การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 61

The 61st Kasetsart University Annual Conference

วันที่ 1-3 มีนาคม 2566 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

"เกษตรศาสตร์เพื่อมวลชน: พัฒนาศาสตร์แห่งแผ่นดิน สู่สุขภาวะอย่างยั่งยืน"

"KASETSART for All: Expanding Knowledge of the Land towards Sustainable Well-Being"

Proceedings NO. 2

SCIENCE TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT

- สาขาวิทยาศาสตร์
  Science
- สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
  Engineering and Architecture
- สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
  Agro-Industry
- สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
  Natural Resources and Environment

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of the 61st Kasetsart University Annual Conference

1-3 มีนาคม 2566 (March 1-3, 2023)

เล่มที่ 2

สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

(Subject: Engineering and Architecture)

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environment)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

(Ministry of Education, Science, Research and Innovation)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม (Ministry of Digital Economy and Society)

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

(Thailand Science Research and Innovation)

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

เครือข่ายวิจัยประชาชื่น (Prachacheun Research Network)

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of the 61st Kasetsart University Annual Conference

วันที่ 1-3 **มีนาคม** 2566 (March 1-3, 2023)

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ครั้งที่ 1 **เดือน เมษายน** 2566

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์เป็นของ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 02-579-5548

ISBN (e-book) (**ชุด**): 978-616-278-768-3

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้จัดการประชุมวิชาการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกปี โดยร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และเครือข่ายวิจัยประชาชื่น จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 ระหว่างวันที่ 1-3 มีนาคม พ.ศ. 2566 ภายใต้หัวข้อ “เกษตรศาสตร์เพื่อมวลชน: พัฒนาศาสตร์แห่งแผ่นดิน สู่สุขภาวะอย่างยั่งยืน” (KASETSART for All: Expanding Knowledge of the Land towards Sustainable Well-Being) เพื่อมุ่งส่งเสริมให้นักวิชาการและคณาจารย์จากสาขาต่างๆ นำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ และความชำนาญ ระหว่างนักวิชาการ คณาจารย์ของภาครัฐและภาคเอกชน ซึ่งจะนำไปสู่ความร่วมมือทางการวิจัยและยังเปิดโอกาสให้นิสิต นักศึกษา ได้แสดงผลงานทางวิชาการ โดยความรู้และวิทยาการใหม่ๆ ดังกล่าว ยังได้ถ่ายทอดเผยแพร่สู่สาธารณชน อันจะนำมาซึ่งความกินดี อยู่ดี และการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

การนำเสนอผลงานวิชาการประกอบด้วยภาคบรรยายจำนวน 167 เรื่อง และภาคโปสเตอร์จำนวน 66 เรื่อง รวม 233 เรื่อง แบ่งออกเป็น 12 สาขา ได้แก่ สาขาพืช สาขาสัตว์ สาขาสัตวแพทยศาสตร์ สาขาประมง สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สาขาศึกษาศาสตร์ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ โดยได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็มใน E-Proceedings จำนวน 216 เรื่อง

เอกสารฉบับนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยเรื่องเต็ม ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ เล่มที่ 2 ประกอบด้วย **สาขาวิทยาศาสตร์** จำนวน 21 เรื่อง **สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์** จำนวน 77 เรื่อง **สาขาอุตสาหกรรมเกษตร** จำนวน 20 เรื่อง และ**สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม** จำนวน 27 เรื่อง ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 ขอขอบคุณ คณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิต นักศึกษา ที่ได้ร่วมนำเสนอผลงานวิจัย และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

(ดร.จงรัก วัชรินทร์รัตน์)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประธานคณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61
ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
และการได้ตีพิมพ์ลงในเอกสารบทคัดย่อ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: kuannualconf@gmail.com

Website: http://annualconference.ku.ac.th,

https://www3.rdi.ku.ac.th/

สารบัญ

สาขาวิทยาศาสตร์ (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	43	การศึกษาโครงสร้างของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยในต่อม Major Ampullate ของแมงมุม *Nephila pilipes* (Fabricius, 1793) ที่พบในประเทศไทย กชกร วรนิตย์, ณัฐพจน์ วาฤทธิ์	2
2	237	Roles of mTOR complex 2 in canonical Wnt signaling in glioblastoma Tankun Banluea, Naphat Chantaravisoot	10
3	89	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าแบบช่วงสำหรับพารามิเตอร์สัดส่วนทวินาม อภิชญา สายหยุด, จุฑาภรณ์ สินสมบูรณ์ทอง, ลี่ลี อิงศรีสว่าง	20
4	243	การประมาณค่าความเข้มของกลุ่มฝน ฉันติ เดชโยธิน, ศรีธรรม ดั่นประดิษฐ์, อริสรา นาคบุรี, นันทพร วันเรียน, ณัฐจิรา อินมนต์, ศิริรัตน์ สุลา, ศศิวิมล ประทักษ์กุลวงศา, ศาตตรา ศิริแก้ว	28
5	254	การประเมินความต้องการน้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้นเชิงพื้นที่บริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย อรุณโรจน์ ศรีเจริญโชติ, สราวุธ อาทยะกุล, มารุต ราชมณี, ณัฐพล เย็นสกุลสุข	36
6	264	การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนจากแบบจำลองสภาพอากาศระยะสั้น WRF เพื่อสร้างแผนที่พารามิเตอร์อากาศชั้นบน สราวุธ อาทยะกุล, ปริญญา อินทรเจริญ, อรุณโรจน์ ศรีเจริญโชติ, ปทาธิป มีแสงเงิน	43
7	261	การวิเคราะห์การปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีในดิน บริเวณเทือกเขาหินแกรนิตของจังหวัดนครศรีธรรมราช ศศิธร ทรัพยาสาร, พวงทิพย์ แก้วทับทิม	51
8	120	การศึกษาความชุกในการสูญเสียการได้ยินของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป จังหวัดพังงา เกศศิริ สมาพงศ์, จันจิรา มหาบุญ	59

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	8	การวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประกอบกิจการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย ธนาภา นิลวิเชียร, สุชีลา พลเรือง	68
2	32	การศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงชนิด Poreflon และชนิด Sterapore ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตไบโอดีเซล วรเมธ เวทยนุกูล, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ	77
3	65	การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่ อรปรีดา ชื่นตา, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ	85
4	103	การนำสังกะสีกลับมาใช้จากขยะอันตรายของการผลิตลวดเหล็กกล้าแรงดึงสูงด้วยกระบวนการทางโลหะวิทยาการละลาย ปณิตา สุตะเขตร์, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ	94
5	84	การกำจัดไมโครพลาสติกโดยระบบกรองถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียในการบำบัดน้ำเสียขั้นตติยภูมิ ฐาทิณี ช่างหล่อ, บงกชรัตน์ สุยะหมุด, จนยุกต์ โลห์วัชรินทร์	102
6	3	ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ บุญนิธิภพ อภิรักษ์, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ชวเลข วณิชเวทิน	110
7	4	ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ของโครงการบ้านจัดสรร ณัฐสรณ์ อยู่ด้วง, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ชวเลข วณิชเวทิน	118
8	173	ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล สุกัญญา คำฉายทอง, วันชัย ยอดสุดใจ, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา	126
9	196	การศึกษาสาเหตุความล่าช้าต่อการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียม พิมพิดา ฝั่งสินธุ์, วัชรินทร์ วิทยกุล, พิพัฒน์ สอนวงษ์	134
10	36	Building a prototype automatic vending machine, then finding satisfaction and ideas for improvement Pakvalunh Panitpichetvong, Borvonsak Markpoon, Phongpitak Suksantilap, Kitti Chomchay, Prathan Satidvengtong, Penpan Laksamiwanit	142
11	105	การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของโรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟิน พงษ์มานัส ลาญดล, สิรางค์ กลั่นคำสอน	150

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
12	126	การประยุกต์การวิเคราะห์ลำดับชั้นแบบคลุมเครือและเทคนิคการจัดอันดับความพึงพอใจที่คล้ายคลึงผลลัพธ์อุดมคติสำหรับการคัดเลือกเทคโนโลยีการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียมในการผลิตน้ำประปาสำหรับโรงงานผลิตน้ำสามเสน 4 ปรินทร์ ศรีเมฆารัตน์, พัชราภรณ์ ญาณภิรัต, ศันสนีย์ สุภาภา	160
13	260	ระบบเฝ้าระวังผู้ขับขี่ด้วยอุปกรณ์วัดคลื่นไฟฟ้าสมองแบบสวมใส่ นันท์นภัส ศิริบุญญพัฒน์, มุสตากีม แหล๊ะหลง, นริสรา หมิดสะแหล้, ยรรยงค์ พันธ์สวัสดิ์	170
14	12	การศึกษาอิทธิพลเทคนิคแสงธรรมชาติต่อปริมาณแสงธรรมชาติในห้องพักผู้ป่วยสูงอายุชาวไทย วีรินทร์ อุดมโสภกิจ, นวลวรรณ ทวยเจริญ	178
15	91	แนวทางการออกแบบด้วยวัสดุและการตกแต่งทางรถไฟยกระดับบริเวณจุดตัดทางรถไฟเหมืองง่า จังหวัดลำพูน กัญญาวีร์ บุญปัญญา, กรุณา รักษวิณ	185
16	119	การประเมินตรอกทางเดินเชื่อมซอยมะยมสู่ถนนข้าวสารด้วยแบบสำรวจการออกแบบสภาพแวดล้อมเพื่อการป้องกันอาชญากรรม ธญา วุฒิมานพ, กรุณา รักษวิณ	192
17	122	การวิเคราะห์จำนวนอาคารในเขตพื้นที่การอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัยของผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ - สบบง - บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ. 2562 อังค์วรา พัวพันธ์รักษกุล, กรุณา รักษวิณ	200
18	27	การพัฒนาต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขโดยใช้พลาสติกฐานพอลิแล็กติกแอซิด มนทัต ท้วมทอง, เจดีย์ เต็มวิจิตร, ชัยกร ฐิติญาณพร, ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ, อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล	208
19	31	การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบอย่างปลอดภัยสำหรับระบบระบายอากาศ นริศ วิภวศุภกร, ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ	215
20	34	การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์อันตรายจากปฏิกิริยาเคมี พัชรมนต์ เบ็ญจโศภิษฐ์, ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ	223
21	40	คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ความปลอดภัยจากการเกิดไฟฟ้าสถิต นภสร สหพรวัฒนานุกูล, ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ	231
22	42	คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อย บุษกร ปานกลาง, ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ	239

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
23	50	โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การติดไฟและการระเบิด ปวิตรา จำปาสัก, ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ	247
24	79	การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางด้วยเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดโดยใช้วิธีทากูชิ เบญจา มุลเสนา, ปณิธิ วิรุฬห์พอจิต, กรรณิกา หัตถะปะนิตย์, นันทิยา หาญศุภลักษณ์	255
25	37	การพัฒนาวัสดุแอสฟัลต์ผิวทางเก่าผสมโพลียูรีเทนเพื่อเป็นวัสดุพื้นผิว วีรยุทธ มหานิล, บารเมศ วรรธนะภูติ, วัชรินทร์ วิทยกุล	262
26	41	Deformation of sheet-pile walls as supporting system for excavation in soft bangkok clay Pachara Khunawong, Pongpipat Anantanasakul	270
27	217	การกอบกู้วัสดุก่อสร้างในระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน: กรณีศึกษาอาคารพาณิชยกรรมในประเทศไทย ธิดารัตน์ มีศรีดี, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	279
28	245	การตรวจสอบพฤติกรรมเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์สำหรับประยุกต์ใช้งานก่อสร้าง ณัฐวัฒน์ เสาะสูงเนิน, จักษดา ธำรงวุฒิ, คีตาญชลี ชายทวีป, ภัทรดนัย โพธิ์ลา, ชาญชัย เงาะปก, กรกต เลิศชัยพงศ์	287
29	246	ผลกระทบจากการใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต บุญญฤทธิ์ ทองบ่อ, จักษดา ธำรงวุฒิ, ศิริวุฒิ อนุศาสนรักษ์, พงศ์ธาดา กาตาสาย, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์, นำชัย จ้อยสูงเนิน	295
30	48	ผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจน ศาศวัต ญานกาย, เพ็ญพิชา สท้านวัตร, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, สรวิศ เผ่าทองศุข	303
31	77	การศึกษาเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ผสมร่วมกับขยะพลาสติกทั่วไปและขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ปณิตา กุลวรานิธิ, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ	310
32	85	ประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในน้ำผิวดินโดยชั้นกรองถ่านชีวภาพแกลบกาแฟสำหรับการผลิตน้ำประปา ชัญญานุช รุ่งชัยวัฒนกุล, นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, เจนยุกต์ โล่ห์วัชรินทร์	317
33	66	การกำจัดไมโครพลาสติกประเภทพอลิสไตรีนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ในห้องปฏิบัติการ สุชีลา พลเรือง, พิมพ์ชนก วงษ์ไทยผดุง, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์	324
34	146	การประเมินผลโครงการปรับปรุงแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุ กรณีศึกษาทางแยกหมู่บ้านสหกรณ์ 3 ศุภณัฐ ศรีสุวรรณ, วัชรินทร์ วิทยกุล, พิพัฒน์ สอนวงษ์	333

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
35	154	ความพึงพอใจต่อโครงสร้างพื้นฐานและบทบาทของโครงสร้างพื้นฐานในการพัฒนาอย่างยั่งยืน มุมมองของประชาชนในกรุงเทพมหานคร ศักดิ์สิทธิ์ งามวงษ์, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	342
36	174	การจัดลำดับความเหมาะสมของเกาะกลางทางหลวงหมายเลข 42 ตอน นาจวก–ดอนยาง ระหว่าง กม.83+605–88+045 ด้วยวิธี AHP อภิชา ใสสะอาดตา, วันชัย ยอดสุดใจ, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา	350
37	229	การศึกษาตัวชี้วัดที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานและเมืองน่าอยู่ ประดิพัฒน์ พิสิฐนฤดม, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	359
38	231	การเปรียบเทียบผลสำเร็จของโครงการก่อสร้างระหว่างโครงการทีมที่มีประสิทธิภาพและไม่มีประสิทธิภาพ ประภัสสร บานสดชื่น, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	367
39	18	การประยุกต์ข้อมูล GRACE-FO เพื่อใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของน้ำบาดาล สิทธิกร แพงพุฒ, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์	374
40	153	การพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการประมาณค่าปริมาณฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม บงกช สุพร, พิพัฒน์ สอนวงษ์, สรวิศ สุภเวชย์	382
41	166	การพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียมสแมป อนามิกา อ่างแก้ว, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์	390
42	188	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำจำหน่ายด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ กรณีศึกษา: การประปานครหลวง อภิรักษ์ นุกูลรัตน์, วัชรินทร์ วิทยกุล, พิพัฒน์ สอนวงษ์	399
43	193	แบบจำลองการจัดการน้ำจากพายุฝนเพื่อการจัดการน้ำจากพายุฝนในเมืองอย่างยั่งยืน กรณีศึกษา: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศุภณัฐ เดือนศิริรัตน์, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	407
44	249	การวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยพิบัติทางธรรมชาติด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงเพื่อการพยากรณ์ อภิวัฒน์ รุ่งเรือง, อนุเผ่า อบแพทย์	415
45	158	การประยุกต์ใช้จีโอแพ็กเกจเทคโนโลยีในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการฉายแผนที่ทรานส์เวิร์สเมอร์คาเตอร์ อตินุช อาตฤณณชากร, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์	424
46	161	การพัฒนาแบบจำลอง เพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียมสแมป ตนุภัทร พรมดี, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์	434

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
47	163	การประเมินความลึกท้องน้ำจากการรับรู้ระยะไกลด้วยภาพถ่ายดาวเทียม ธิติมา พงศ์พฤติ, สรวิศ สุภเวชย์	442
48	165	การศึกษาปริมาณความต้องการใช้น้ำของมะพร้าวที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศ (Climate change): กรณีศึกษาพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาดำเนินสะดวก ธีรภัทร อรุณวงศ์, สรวิศ สุภเวชย์	451
49	195	การศึกษาการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำโดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ กิตติภพ สิมะโชคชัย, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์	460
50	238	การประเมินข้อมูล SAR สำหรับการทำแผนที่และการติดตามชีวมวลป่าไม้ ปิยะวรรณ วีระไพบูลย์, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์	468
51	19	การออกแบบและเปรียบเทียบระบบป้องกันอัคคีภัย: กรณีศึกษาห้องควบคุมในโรงงาน เผ่าพัชร ภูสีเขียว, อนุเผ่า อบแพทย์	477
52	38	การเปรียบเทียบการประมาณราคาต่อหน่วยพื้นที่กรณีศึกษาอาคารโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต ณัฏฐนันท์ เสนีย์วงศ์ ณ อยุธยา, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์, แพรวา วิจิตรธนสาร	485
53	132	การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่เพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินจังหวัดอ่างทอง พงศ์ดนัย พันธุ, พันโท สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์	493
54	185	การจำลองแผนการจัดซื้อวัสดุจาก BIM : กรณีศึกษาโครงการบ้านเดี่ยว 3 ชั้น ชนกนันท์ บุญส่ง, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี, วิทยา ศรีสมบูรณ์	501
55	272	แนวทางการใช้แบบแปลนก่อสร้างบ้านประหยัดพลังงานในการยื่นขออนุญาตก่อสร้างตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ภายในเขตพื้นที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี อัญชสา ประมวลเจริญกิจ, ฉัตรปวีณ์ หอมอ่อน, สุริยา เสนาจันทร์	509
56	7	การศึกษาผลกระทบของเวลาทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติจากการแปรผันความสูงของเพดาน อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน และความไวในการตอบสนองของหัวกระจายน้ำดับเพลิงด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มาเฮศ ราย, ณัฐศักดิ์ บุญมี	520
57	11	การจำลองการเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินระหว่างสถานีสนามไชยถึงสถานีอิสรภาพ ภัทรนันท์ รสภาธร, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	528
58	15	การศึกษาแบบจำลองการเกิดเพลิงไหม้ และการอพยพของสถานีรถไฟสายสีส้ม ชนะภัทร ชูจันทร์, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	537

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
59	44	การจำลองการเกิดเพลิงไหม้และการอพยพหนีไฟภายในโรงแรมที่ดัดแปลงมาจากห้องแถว 4 ชั้น อภิภพ สวนสอน, ชวลิต กิตติชัยการ	547
60	47	ความหนาแน่นของคนที่เหมาะสมในการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคทางอากาศสำหรับพื้นที่อาคารสำนักงานและร้านอาหารที่มีปริมาณการระบายอากาศตามมาตรฐาน พิชชาพร ประพิณศรี, สรัล ศาลากิจ	558
61	164	การศึกษาการอพยพหนีไฟสำหรับอาคารสูงและอาคารสูงระฟ้าเพื่อสร้างเครื่องมือคำนวณเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟด้วยโปรแกรมจำลองการอพยพ ชวนัฎฐ์ อาญาพิทักษ์, เฉลิมพล เปล่งสะอาด	566
62	172	การเปรียบเทียบการจำลองอพยพหนีไฟด้วยโปรแกรม Pathfinder ระหว่างสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ชนิดไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ และระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ชนิดระบุตำแหน่งได้ ในอุตสาหกรรมพลาสติกแห่งหนึ่ง พรรษมน นิถาภรณ์, เอกไท วิโรจน์สกุลชัย	576
63	108	การศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมและการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีการใช้เบรคมือ จิรายุ เจริญชัยสกุล, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	586
64	271	การจำลองการเผาไหม้ของหอหล่อเย็นด้วยโปรแกรมจำลองพลศาสตร์อัคคีภัยโดยคอมพิวเตอร์ วันภพ ลิมป์โกมล, ณัฐศักดิ์ บุญมี	594
65	156	การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากทะลายปาล์ม ธนาเดช ริยาพันธ์, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	603
66	138	การประเมินปริมาณน้ำมันในผลปาล์มโดยการตรวจจับภาพร่วมกับเทคนิคดีพเลิร์นนิ่ง พีรศุษม์ ไชยศรีมณีพรรณ, รยากร นกแก้ว, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	612
67	92	การศึกษาเชิงตัวเลขระบบระบายอากาศสำหรับอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน วรัญญู ทองขาว, ณัฐศักดิ์ บุญมี	620
68	88	การพัฒนาระบบตรวจสอบและเก็บข้อมูลสภาวะตามเวลาจริงของโรงเพาะฟักปูม้า วิทยา ฉัตรรัตนกุลชัย, พิสัย แย้มประสวน, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย	629
69	213	การพัฒนาเครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์อัตโนมัติ พชร จุ้ยพลอย, กฤษณ์ พัวไพโรจน์, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย	637
70	230	การออกแบบและจัดสร้างต้นแบบเครื่อง Dry fractionation วสุ ทาแก้ว, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์, รยากร นกแก้ว	647
71	242	การศึกษาชนิดของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิดแท่งต่อการวัดค่าทางไฟฟ้าเชิงเปรียบเทียบระหว่างแอโนดชนิดแผ่นเรียบและแผ่นขัด ณัฐพงษ์ พรมพิทักษ์, ชมาพร เจียรบุตร	655
72	104	การออกแบบและวิเคราะห์ล้อแบบลูปบนชุดล้อลงจอดของอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง โชติพัชร กสิกรรม, ธภัทร นาชัยเวียง, วิศว์ ศรีพวาทกุล	663

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	248	อิทธิพลอุณหภูมิขาเข้าในของการทำแห้งแบบพ่นฝอย การทำแห้งแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งอบลมร้อนต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลต สหรัฐ แสนแก้ว, ภคมน จิตประเสริฐ	672
2	113	การแปรรูปกะทิผงโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยและสารคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จากกากเนื้อมะพร้าว แก้วมณีจันทร์ อาษา, วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์, สุวิมล เจริญสิทธิ์	681
3	118	Influence of heat, proteases, and time on the hydrolysis of cricket protein Siriprapa Jitmoleerat, Wasaporn Preteseille Chanput	690
4	159	Optimum use of nitrite on the qualities and residual nitrite in emulsion-type sausage with different fat contents Supapich Somboonying, Pitiporn Ritthiruangdej and Kanithaporn Vangnai	698
5	160	Effect of nitrite levels on safety and qualities in Nham (Thai fermented pork sausage) during fermentation Pimwaree Charoensin, Pitiporn Ritthiruangdej, Kanithaporn Vangnai	706
6	215	ผลของปริมาณสตาร์ชทั้งหมดต่อคุณลักษณะของแผ่นแป้งห่ออาหารที่ผลิตจากข้าวอะไมโลสสูงและถั่วเขียว ธนิษฐา พัฒนสิงห์, น้ำฝน ลำดับวงศ์	714
7	218	อิทธิพลของปริมาณน้ำและอัลคาไลน์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อคุณลักษณะทางกายภาพของเจลสตาร์ช อริสรา ตอนสุข, น้ำฝน ลำดับวงศ์	723

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	94	การวิเคราะห์ปัญหาและการจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พระราชบัญญัติอุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 เสาวลักษณ์ วงษ์สวาสดิ์, ขวัญชัย ดวงสถาพร, ปัสสี ประสมสินธ์	732
2	64	ความสัมพันธ์ของปัจจัยสภาพภูมิอากาศจุลภาคและผลผลิตยอดผักหวานป่า ในสวนผักหวานป่า ปลูกร่วมไม้ต้น อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี เกศนีย์ เทือกตาทอง, พฤทธิ์ ราชรักษ์, วิรงรอง ดวงใจ	740

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
3	16	การพัฒนากูเกิลแอปพลิเคชันสำหรับระบบรายงานสภาพอากาศ ณ สถานีควบคุมไฟป่าห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง ศุภกิตติ์ โก่งเกศร, ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล	748
4	176	แบบจำลองสามมิติของซุงไม้สัก คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ณภัทร พึ่งพงษ์, จิรวัฒน์ ยิ่งดี, ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล, ธีระพงษ์ ชุมแสงศรี	756
5	219	การวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับจุดรวมพลในพื้นที่อุทยานแห่งชาติตาดหมอก จังหวัดเพชรบูรณ์ ปัณสิตา พรมเสนะ, ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล	765
6	234	การวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ บริเวณอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง จังหวัดสุราษฎร์ธานี สุขุม จันทโชติ, วันชัย อรุณประภารัตน์, นันทชัย พงศ์พัฒนานุรักษ์	772
7	22	ความหลากชนิดของไม้ต้นในป่าพรุน้ำจืดของอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย พลอยวรีย์ นิทโน, กฤตวิชญ์ สุขอึ้ง, กิตตชัย จันธิมา, สฤทธิ์พร วิทยผดุง	780
8	224	การทดสอบความสามารถในการเป็นราปฏิปักษ์ของเห็ดสกุล *Oudemansiella* ต่อการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรคของยูคาลิปตัส รัญชิดา ขุนไกร, ธารรัตน์ แก้วกระจ่าง	788
9	225	ความหลากชนิดและการปรากฏของหิ่งห้อยบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ณัฐชภัทร โอทอง, วัฒนชัย ตาเสน, กิติพงศ์ ตั้งกิจ, สุภาพร ศรีเสมอ, ภาสิณี วรชนะนันท์, รัฐชา ชัยชนะ	795
10	239	ผลของแหล่งน้ำในพื้นที่การใช้ประโยชน์ต่างกันต่อความหลากชนิดของมดบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ กัญทิมา ยอดประสิทธิ์, วัฒนชัย ตาเสน, วิวัฒน์ หาญวงศ์จิรวัฒน์	803
11	190	ความหลากชนิด ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม บริเวณแนวถนนหลวงหมายเลข 304 แนวเชื่อมต่อป่าอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และอุทยานแห่งชาติทับลาน จังหวัดปราจีนบุรี พัฒนภณ ฉัตรตระกูลดี, รองลาภ สุขมาสรวง	811
12	207	ความหลากชนิด รูปแบบเวลาทำกิจกรรม และการซ้อนทับเชิงเวลาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมบนพื้นดิน ในพื้นที่ป่าฟื้นฟู และพื้นที่อนุรักษ์เทือกเขาหินปูน อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยใช้กล้องดักถ่ายภาพ บุญญาธิพร แก้วดี, รองลาภ สุขมาสรวง	819
13	33	ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพกับการปรากฏปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาแหลม จังหวัดกาญจนบุรี พัทธ์ธีรา แก้วเกตุกาญจน์, วรงค์ สุขเสวต, ประทีป ด้วงแค	827

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
14	222	Particulate matter from residential and roadside areas in Bangkok, Thailand: Carbon composition and their sources Thanaphum Manjantrarat, Rattaporn Saenmuangchin, Mushtaq Ahmad, Wachiraya Rattanawongsa, Wiyong Kangwansupamonkon, Thunyapat Thongyen, Prapat Pongkiatkul, Sirima Panyametheekul	835
15	80	Effect of pond depth on water quality and bacterial vertical variability in oxidation pond Chalisa Tudsnaton, Thanit Pattamapitoon, Onanong Phewnil, Watcharapong Wararum, Sathapat Saneha, Sudaporn Sukchinda, Sivanh Khonesavanh,Parkin Maskulrath	845
16	69	การผลิตโพลีไฮดรอกซีแอลคาโนเอตด้วยสลัดจ์ร่วมกับการเติม *Thauera mechernichensis* (TL1) ภายใต้สภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน จรัสอรุณ เจริญสวัสดิ์, กฤตยพงษ์ จันทรเดช, ภริณดา ทยานุกูล, เบญจพร สุวรรณศิลป์	854
17	233	การผลิต 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอลจากซังข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชันที่ใช้สารละลายร่วมของอะซิโตไนไตรล์และน้ำโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก ฐานพัฒน์ พิมายกลาง, เก้ากันยา สุดประเสริฐ, จักรกฤษณ์ เตชะอภัยคุณ	863
18	269	การศึกษารูปแบบการอุดตันเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสสำหรับบำบัดไดโคลฟีแนคในน้ำสังเคราะห์ อิสรีย์ สนธิรัตน์, ชลอ จารุสุทธิรักษ์, ปวีร์ คล่องเวสสะ	873
19	178	ผลของปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งต่อการเปลี่ยนแปลงแบคทีเรียรอบรากผักตบชวาในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน รัฐศิริ วงศ์สุภาพ, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, ชาลิสา ทัศนาธร, มัลลิกา ศรีชมภู	882
20	179	ผลของปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งต่อประสิทธิภาพการบำบัดแบคทีเรียโคลิฟอร์มในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน จินต์จุฑา นาคขุนทด, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, บงกช สกุลศุภเศรษฐ์, ชาลิสา ทัศนาธร, มัลลิกา ศรีชมภู, ภาคิน มาสกุลรัตน์	889
21	186	ผลของพื้นที่ปกคลุมผิวของผักตบชวาต่อชนิดและปริมาณของแพลงก์ตอนพืชในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ศิริพร หมากสุข, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, มัลลิกา ศรีชมภู, ชาลิสา ทัศนาธร, ภาคิน มาสกุลรัตน์	895
22	181	ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดบีโอดี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียชุมชนด้วยผักตบชวาในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์ วชิรญาณ์ ยิ้มสวัสดิ์, อรอนงค์ ผิวนิว, วัชรพงษ์ วาระรัมย์, มัลลิกา ศรีชมภู, วรัญดา ไตรกิศยาโสภณ, อัจฉรา นาไชยบูรณ์	902

สาขาวิทยาศาสตร์ (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	17	การระบุลักษณะยีน desaturase-like gene (*Ar*Cb5D6D) และอิทธิพลของความเค็มต่อการสังเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอด *Apocyclops royi* สุภิดา เกื้อกอบ, ปิติ อ่ำพายัพ, จันทร์ประภา อิ่มจงใจรัก	912
2	52	การพัฒนากระบวนการนำส่งสารสกัดจุลสาหร่าย *Chlamydomonas reinhardtii* ด้วยอนุภาคนาโนโดยใช้วิธีการฟิล์มบาง ธนยศ เบิกบาน, มัตถกา คงขาว, โชติกา หยกทองวัฒนา	920
3	78	การตรวจวัดทริเทียมระดับต่ำในน้ำประปาส่วนภูมิภาคของประเทศไทยด้วยวิธีการเพิ่มความเข้มข้นด้วยไฟฟ้า จิตรานุช จันทรส, เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง, วันวิสา สุดประเสริฐ, มณฑล ยงค์ประวัติ, จักรกฤช แสงกรกฎ, ดลฤดี โตเย็น	929
4	157	Inhibitory effects of the extract from *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb) on cell viability and proliferation of Squamous Cell Carcinoma (A431 cell line) Rungpailin Khonsap, Nattanan T-Thienprasert, Pichamon Kiatwuthinon, Napachanok Swainson, Attawan Aramrak	937
5	214	Identification of bioactive compounds in the extract of *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb) by thin-layer chromatography and high resolution mass spectrometry Pilairath Meksangsee, Wannarat Phonphoem, Pakorn Wattana-amorn, Attawan Aramrak	945
6	187	การใช้แอคติโนมัยซีทในการควบคุมวัชพืชที่ก่อปัญหาสำหรับการเพาะปลูกพืชในวงศ์ผักกาด พรสวรรค์ พวยอ้วน, พัชรนันท์ อมรรัตนพันธ์	954
7	203	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงินแบบขั้นตอนเดียว: ผลของเงินต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สุวธิดา จีนเดิม, หาญชนะ เกตมาลา, ณัฐธิดา รักกะเปา	964
8	212	การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และศึกษาผลของการเจือกราฟีนออกไซด์ต่อสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ วรันยา ไสไทย, ณัฐธิดา รักกะเปา, หาญชนะ เกตมาลา, ศุภรัตน์ แสงศร, ธาริกานต์ สาคะโร	973

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
9	235	การคัดแยกแบคทีเรียชอบเกลือจากอาหารหมักพื้นบ้านของไทยและคุณสมบัติโพรไบโอติก สาวิตรี ดือราแม, ซาฟียะห์ สะอะ, พัทธินันท์ วาริชนันท์	981
10	241	Identification of *Lactobacillus* spp. isolated from stool and colon biopsy tissues of Thai healthy elderly using MALDI-TOF mass spectrometry Kittipoom Saichan, Surapun Tepaamorndech, Teerasit Techawiwattanaboon, Kanitha Patarakul	990
11	255	การสะสมอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้ายและการตรึงด้วยพอลิเอทิลีนอิมมีนผสมกรดพอลิอะคริลิก ศิริพรรณ นาคพันธ์, หาญชนะ เกตมาลา, ณัฐธิดา รักกะเปา, สุวธิดา จีนเดิม, สุธิดา หมาดโต๊ะซ๊ะ, สาหรี บุญประสพ	997
12	221	ฤทธิ์ต้านทางชีวภาพของเคอร์คิวมินและเคอร์คิวมินอะนาล็อกต่อเชื้อ *Phytophthora palmivora* ที่ก่อโรคในทุเรียน กิติยา เอกเชวง, วชิราภรณ์ อาชวาคม, วราลักษณ์ ไชยชมภู, มยุรา ทองช่วง	1006
13	211	Arm and trunk skeletal muscle percentages negatively correlated to body fat in metabolic syndrome subjects Linn Minn Oo, Sirinapa Thangsiri, Chaowanee Chupeerach, Nattira On-nom, Attasak Jaree, Uthaiwan Suttisansanee	1014

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	10	การศึกษาการหลอมยูเทคติกโซลเดอร์พรีฟอร์มตะกั่วดีบุกปราศจากฟลักซ์โดยใช้กรดฟอร์มิกปิดผนึกเลเซอร์ไดโอดแพคเกจ กัญจน์ กาญจนะพังคะ, ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ	1023
2	14	การวิเคราะห์ความสบายในการโดยสารของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติระหว่างรถไฟฟ้าสายเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิกับรถไฟฟ้าสายสีทอง สมมิศร์ คงศ์มัยลิก, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	1030
3	130	การศึกษาความแตกต่างของแรงดันและปริมาณท่อที่ใช้ในการออกแบบระบบจ่ายน้ำประปารูป แบบระบบท่อประธานกับรูปแบบระบบวงจรรวมโดยใช้โปรแกรมออกแบบโอเพ่นโฟลวส์ วอเตอร์เจมส์ ปกชวัช โมกขมรรคกุล, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ	1039
4	136	Comparison design of constructed and packaged wastewater treatment system for nitrogen and phosphorus removal Chanyoot Aiemsumang, Peerakarn Banjerdkit	1046

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
5	169	การประเมินประสิทธิภาพ และปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอสบีอาร์จำลอง ศุทธิณีย์ เศรษฐวานิช, สุชีลา พลเรือง, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์	1054

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	53	สมบัติทางเคมีกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณสตาร์ชทนการย่อย และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งกล้วยดิบจากกล้วยต่างชนิดพันธุ์ ปราโมทย์ หอมแก่นจันทร์, กัลยาณี สุวิทวัส, วรัญญา เตชะสุขถาวร, จิรารัตน์ อนันตกูล	1062
2	60	ผลของกระบวนการต่อคุณภาพบางประการของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน วรพรต สวนคร้ามดี, เทพกัญญา หาญศีลวัต	1071
3	73	ผลของสารก่อเจลต่อคุณภาพบางประการของมอสซาเรลล่าชีสจากพืช จุฑามาศ สุขดี, เทพกัญญา หาญศีลวัต, นพรัตน์ ปราบสงบ	1080
4	128	การออกแบบและพัฒนาลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติสำหรับเสื้อผ้าเด็กหญิงปฐมวัย อภิชญา ชาญเชี่ยว, กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล	1087
5	141	ความยืดหยุ่นชุมชนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กรณีศึกษาพื้นที่ทุ่งรับน้ำในอำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปาริฉัตร หงสประภาส	1095
6	142	ผลของผงใบกัญชงพันธุ์ Charlotte's Angel (*Cannabis sativa* L.subsp. *sativa*) ต่อคุณภาพขนมชั้น ณิชามาส เกียรติพรโอภาส, กมลวรรณ แจ้งชัด, อนุวัตร แจ้งชัด, ธานี ศรีวงศ์ชัย	1103
7	143	การศึกษาผิวสัมผัสผ้าที่มีผลต่อพฤติกรรมของแมวสายพันธุ์ไทย กลอยทิพย์ สุทธิสารรณกร, พิธาลัย ผู้พัฒน์, ศุฐฐิวีร์ เจิมประไพ, ปวริน ตันตริยานนท์, พรรณภัทร พรหมเพ็ญ	1113
8	167	ผลของใยอาหารจากส้มต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืช ปภาวริน หล่อลีฬหา, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, นันทวัน เทอดไทย	1121
9	182	การศึกษาด้านบุคลิกภาพที่มีผลต่อพฤติกรรมการเลือกรูปแบบการตกแต่ง และกลุ่มสีของชุดผ้าไหมกับกลุ่มผู้บริโภคผู้หญิงเจนเนอเรชั่นวายในเขตกรุงเทพมหานคร นิชดา ตู้จินดา, กฤตินี ประเสริฐพร, นนทพร หล่อเรืองศิลป์, เจนจิรา เหลืองวัฒนะ, พรรณภัทร พรหมเพ็ญ, พิธาลัย ผู้พัฒน์	1128

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
10	223	Combined use of methyl cellulose, k-carrageenan, and calcium salt on enhancing meat-liked texture and good appearance in plant-based chicken breast Thitirat Sirichan, Natcha Wongthongdee	1136
11	227	การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติก ธนพร สำราญวิริยะ, ทานตะวัน พิรักษ์	1143
12	228	Exploring consumer and non-consumer insight (perspective) towards non-alcoholic beer using focus group discussion Chantawat Rungserichai, Tantawan Pirak, Aussama Soontrunnrudrungsri	1150
13	252	Effect of cooling rate on pasting properties of various starch and flour types Chayada Bhatpattana, Duanggamol Jullapanya, Pattharasuda Hanucharoenkul, Rungnaphar Pongsawatmanit	1158

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	99	การกระจายของปูแสมในบริเวณป่าชายเลนบางแก้ว จังหวัดสมุทรสงคราม กรณ์รวี เอี่ยมสมบูรณ์, ชนิดา ว่องวาจานนท์, นฤชล ภัทราปัญญาวงศ์	1167
2	56	การอัพไซเคิลของเสียประเภทโฟมพอลิยูรีเทนเป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์และจีโอพอลิเมอร์ ภาณุวิชญ์ เนสุสินธุ์, จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์	1175
3	98	การสำรวจสารพิษตกค้างในพืชและสิ่งแวดล้อมจากแหล่งปลูกพืชผักในจังหวัดราชบุรี ปภัสรา คุณเลิศ, ประกิจ จันทร์ติ๊บ, ผกาสินี คล้ายมาลา	1183
4	107	การศึกษาคุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ชานนท์ วงศ์ลังกา, จุฑารัตน์ คำเงิน, สุชัญญา ทองเครือ	1199
5	270	การบำบัดไดโคลฟีแนคในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แคลเซียมเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชัน ปพิชญา ชูแก้ว, ชลอ จารุสุทธิรักษ์	1207

สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

การศึกษาโครงสร้างของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยในต่อม Major Ampullate ของแมงมุม *Nephila pilipes* (Fabricius, 1793) ที่พบในประเทศไทย

Studies in silk gene structure in Major Ampullate gland of *Nephila pilipes* (Fabricius, 1793) collected in Thailand

กชกร วรนิตย์*, **ณัฐพจน์ วาฤทธิ์**

Kochakorn Woranit*, Natapot Warrit

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Biology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: 6370045823@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยในต่อมผลิตเส้นใย Major Ampullate (MA) ของแมงมุมใยทองท้องขนาน *Nephila pilipes* (Fabricius, 1793) ที่พบในประเทศไทย เพื่อสร้างองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยในแมงมุม *N. pilipes* ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำคัญในการนำไปใช้คัดเลือกยีนเพื่อพัฒนาเส้นใยสังเคราะห์ (biosynthetic fiber) ในระดับอุตสาหกรรม วิธีการศึกษาประกอบไปด้วยการเก็บตัวอย่างแมงมุม การสกัดอาร์เอ็นเอจากต่อม MA จากนั้นจะนำอาร์เอ็นเอที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ลำดับเบส และทำการระบุยีน โดยเปรียบเทียบกับยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยในแมงมุมชนิดอื่นในฐานข้อมูล NCBI ผลการศึกษาพบว่าสามารถระบุยีนในกลุ่ม *Major ampullate spidroin* (*MaSp*) ได้ 2 ประเภท คือ *MaSp1* และ *MaSp2* และสามารถจำแนกรูปแบบชุดซ้ำของกรดอะมิโนได้ 2 กลุ่ม และ 8 รูปแบบ และผลจากแผนภูมิวงศ์วานวิวัฒนาการแสดงให้เห็นว่ายีนสไปโดรอินของตัวอย่างแมงมุม *N. pilipes* ที่พบในประเทศไทยจัดอยู่ใน clade เดียวกับแมงมุมสกุล *Trichonephila*

คำสำคัญ: ต่อมผลิตเส้นใย, ยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใย, เส้นใยสังเคราะห์

Abstract

This study aims to investigate the silk gene structure in silk gland, Major Ampullate (MA) gland of *Nephila pilipes* (Fabricius, 1793) collected in Thailand. Results from this study will provide the basic knowledge of spider silk in *N. pilipes*, which is important information for future gene selection in developing biosynthetic fiber that can be used for various applications. The methods will comprise spider collecting, RNA extraction from MA gland, sequencing, and gene identification were compared with silk gene sequences from other spider species deposited in the NCBI. For the results, we identified 2 isoforms of *Major ampullate spidroin* (*MaSp*) genes that consist of *MaSp1* and *MaSp2* and categorize motif patterns into 2 groups and 8 patterns. The phylogenetic reveals that spidroin of *N. pilipes* collected in Thailand are grouped in the same clade with spiders from genus *Trichonephila*.

Keywords: Biosynthetic fiber, Silk gene, Silk gland

คำนำ

เส้นใยแมงมุม (spider silk) เป็นเส้นใยโปรตีนที่แมงมุมสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการดำรงชีวิต ไม่ว่าจะเป็นการใช้สำหรับสร้างรังที่เหมาะสม ใช้สำหรับล่าเหยื่อ หรือเพื่อปกป้องไข่และตัวอ่อน (Garrison et al., 2016) ใยแมงมุมถือเป็นวัสดุชีวภาพที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการและมีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลากหลายด้าน (Babb et al., 2017)

เส้นใยแมงมุมสามารถจำแนกออกได้เป็น 7 ชนิด ตามต่อมที่ใช้ผลิตเส้นใย (silk gland) และแต่ละต่อมจะมียีนที่ควบคุมการผลิตเส้นใยที่แตกต่างกัน (Babb et al., 2017)

องค์ประกอบหลักของเส้นใยแมงมุมคือโปรตีนสไปโดรอิน (Spidroin) โดยมีการตั้งชื่อและจำแนกตามชนิดของต่อมที่ใช้ผลิตเส้นใย (Babb et al., 2017) โปรตีนดังกล่าวเป็นโปรตีนขนาดใหญ่ (Garb et al., 2010) มีขนาดโมเลกุลประมาณ 350 กิโลดาลตัน และยาวประมาณ 9,000 เบส หรือมากกว่า (Ayoub et al., 2007) โครงสร้างของโปรตีนสไปโดรอินประกอบด้วย terminal domains เป็นบริเวณที่มีความแปรผันของลำดับกรดอะมิโนต่ำ และ repetitive sequence เป็นบริเวณที่มีความแปรผันของลำดับกรดอะมิโนสูง คิดเป็นร้อยละ 90 ของความยาวโปรตีนทั้งหมด (Garb et al., 2010)

Long-read Isoform Sequencing (Iso-Seq) หรือ SMRT sequencing เป็นวิธีการวิเคราะห์ลำดับเบสยุคใหม่ โดยใช้หลักการวิเคราะห์ลำดับเบสด้วยการสังเคราะห์ดีเอ็น ทำให้ได้ลำดับเบสสายยาวและมีความถูกต้องสูง (Eid et al., 2009; Gonzalez-Garay, 2016) วิธีนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการวิเคราะห์โปรตีนสไปโดรอินที่เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยแมงมุม เนื่องจากเป็นโปรตีนที่มีความยาวมากและพบลำดับชุดซ้ำของกรดอะมิโนสูง (Chaw et al., 2018)

ในปัจจุบันได้มีการถอดรหัสจีโนมด้วยวิธี Long-read Sequencing ของแมงมุม *Trichonephila clavipes* (Linnaeus, 1767) เพื่อหาลำดับเบสของยีนสไปโดรอิน (Babb et al., 2017) ประเทศไทยไม่มีรายงานการค้นพบแมงมุม *T. clavipes* แต่มีการค้นพบแมงมุม *N. pilipes* ซึ่งเป็นแมงมุมในกลุ่ม Golden-orb weaver (Nephilinae) (Kono et al.,2021) และอยู่ในวงศ์เดียวกันกับแมงมุม *T. clavipes* นั่นคือวงศ์ Araneidae (World Spider Catalog, 2023) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษายีนสไปโดรอินของแมงมุม *N. pilipes* ที่พบในประเทศไทย การศึกษาครั้งนี้จึงต้องการวิเคราะห์ลำดับเบสของยีนสไปโดรอินภายในต่อม MA ของแมงมุม *N. pilipes* เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้พัฒนาเส้นใยสังเคราะห์ในระดับอุตสาหกรรม

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างแมงมุมเพื่อนำมาผ่าต่อม MA

เก็บตัวอย่างแมงมุม *N. pilipes* จากแหล่งที่อยู่อาศัยในธรรมชาติ ในเขตสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช ตำบลอุดมทรัพย์ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา โดยจะเก็บอย่างน้อย 20 ตัว และบันทึกข้อมูล GPS และความสูงระดับน้ำทะเล ณ ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ตัวอย่างที่เก็บได้จะถูกรักษาสภาพในไนโตรเจนเหลวในภาคสนามแล้วจึงนำมาเก็บรักษาในตู้เย็นรักษาอุณหภูมิที่ –80 °C ที่อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก่อนที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป

การผ่าต่อม MA ของแมงมุม N. pilipes

นำตัวอย่างแมงมุม มาผ่า exoskeleton ของ abdomen ของแมงมุม โดยใช้ปากคีบและเข็มหมุดในการดึง exoskeleton และเขี่ยเนื้อเยื่อ เพื่อหาตำแหน่งของต่อม MA โดยต่อม MA จะมีลักษณะคล้ายกระเปาะยาว มีสีเหลือง

แสดงดัง Fig.1A หลังจากนั้นนำต่อม MA ใส่ในหลอดเอพเพนดอร์ฟขนาด 1.5 มิลลิลิตร และนำไปใส่ในหลอดพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร แสดงดัง Fig.1B จากนั้นห่อด้วยกระดาษฟอยล์ และนำไปเก็บรักษาสภาพในไนโตรเจนเหลว ก่อนนำไปสกัดอาร์เอ็น-เอ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยจีโนม สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

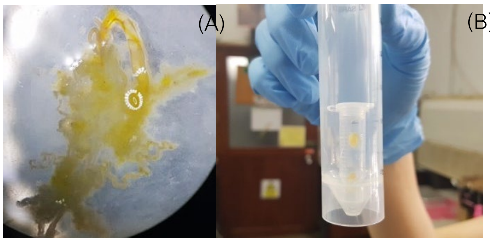


Fig. 1 Major Ampullate (MA) gland of *N. pilipes*: (A) MA gland under stereo microscope.; (B) MA gland was prepared in plastic tube for RNA extraction

การสกัดอาร์เอ็นจากต่อม MA การสร้างดีเอ็นเอสังเคราะห์ (cDNA) และการวิเคราะห์ลำดับเบส

อาร์เอ็นเอจากต่อม MA ถูกสกัดด้วยชุดสกัด RNeasy® Mini Kit (Qiagen) และถูกนำมากำจัด DNA ปนเปื้อนด้วย Ambion® DNA-free™ DNase Treatment and Removal Reagents (Invitrogen) ปริมาณของ RNA ถูกวัดด้วยเครื่อง Fragment Analyzer (FA) (Agilent) จากนั้นทำการสร้าง cDNA จากอาร์เอ็นเอต้นแบบด้วย NEBNext® Single Cell/Low Input cDNA Synthesis & Amplification Module และเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอสายคู่ จากนั้นสร้าง Library ด้วย SMRTbell Express Template Prep Kit 2.0 (PacBio) และหาลำดับเบสด้วยวิธี Iso-Seq จากนั้นจะทำการสร้าง Circular Consensus Sequences (CCS) ที่ได้จากการวิเคราะห์ลำดับเบส ด้วยโปรแกรม ISOSEQ3 v.3.0 และสุดท้ายข้อมูลจะถูกนำมาจัดกลุ่มเพื่อลดความซ้ำซ้อนด้วยโปรแกรม Cd-hit (Li and Godzik, 2006)

การหาข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน การจัดจำแนกรูปแบบชุดซ้ำของกรดอะมิโน และหาความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการ

นำข้อมูล CCS ที่ได้จาก ISOSEQ3 มา blast กับฐานข้อมูลนิวคลีโอไทด์ของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยของแมงมุมชนิดอื่นใน NCBI หลังจากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาหาตำแหน่งกรดอะมิโนตัวเริ่มต้นและกรดอะมิโนตัวสุดท้ายด้วยโปรแกรม TransDecoder v. 5.5.0 จากนั้นนำโปรตีนที่ได้มา blast กับฐานข้อมูลนิวคลีโอไทด์ของโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยของแมงมุมชนิดอื่นใน NCBI และนำข้อมูลที่ได้มาจัดจำแนกรูปแบบชุดซ้ำและหาสัดส่วนของกรดอะมิโนด้วยโปรแกรม Geneious (Kearse et al., 2012) จากนั้นจะนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการ โดยใช้บริเวณ C-terminal domain (CTD) ของโปรตีน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความแปรผันของลำดับกรดอะมิโนต่ำ (Garb et al., 2010) นำกรดอะมิโนบริเวณ CTD มาสร้างแผนภูมิวงศ์วานวิวัฒนาการด้วยวิธี Bayesian analysis ด้วยโปรแกรม BEAST version 1.10.4 (Drummond and Rambaut, 2007) และเลือก *Stegodyphus mimosarum* เป็น outgroup

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่ามี พบว่ามียีน 23,664 เส้น ที่เกี่ยวข้องกับยีนสไปโดรอิน โดยกว่า 22,000 เส้น เป็นยีนสไปโดรอินในกลุ่มของ *Major ampullate spidroin* (*MaSp*) โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ *Major ampullate spidroin 1* (*MaSp1*) และ *Major ampullate spidroin 2* (*MaSp2*) โดยได้คัดเลือกยีน *MaSp* จากแต่ละกลุ่ม ได้แก่ *Major ampullate spidroin 1A* (*MaSp1A*) จำนวน 1 เส้น และ *Major ampullate spidroin 2A* (*MaSp2A*) จำนวน 1 เส้น โดย

ยีนดังกล่าวมีความยาวของกรดอะมิโนมากกว่าหรือเท่ากับ 2,000 ตัว และพบโครงสร้าง terminal domain จึงเลือกเป็นตัวแทนของแต่ละกลุ่ม เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป โดยมีรายละเอียดข้อมูลที่สำคัญ แสดงดัง Table 1

Table 1 IsoSeq contigs selected from *Major ampullate Spidroin* (*MaSp*).

Transcript id	IsoSeq contig length	Amino acid length	Start codon	Stop codon	Gene
Transcript/14200	6004	1,960	3	5882	*MaSp1A*
Transcript/447	9648	3,178	3	9536	*MaSp2A*

MaSp1A มีความยาวของกรดอะมิโน 1,960 ตัว ประกอบด้วยลำดับชุดซ้ำของกรดอะมิโนประมาณ 78 ชุดซ้ำ และ N-terminal domain (NTD) โดยสามารถจำแนกลำดับชุดซ้ำได้ 6 ประเภท ได้แก่ ประเภท A จำนวน 68 ชุดซ้ำ, ประเภท B จำนวน 1 ชุดซ้ำ, ประเภท C จำนวน 1 ชุดซ้ำ, ประเภท D 5 ชุดซ้ำ, ประเภท E 2 ชุดซ้ำ และประเภท F 1 ชุดซ้ำ แสดงดัง Fig. 2

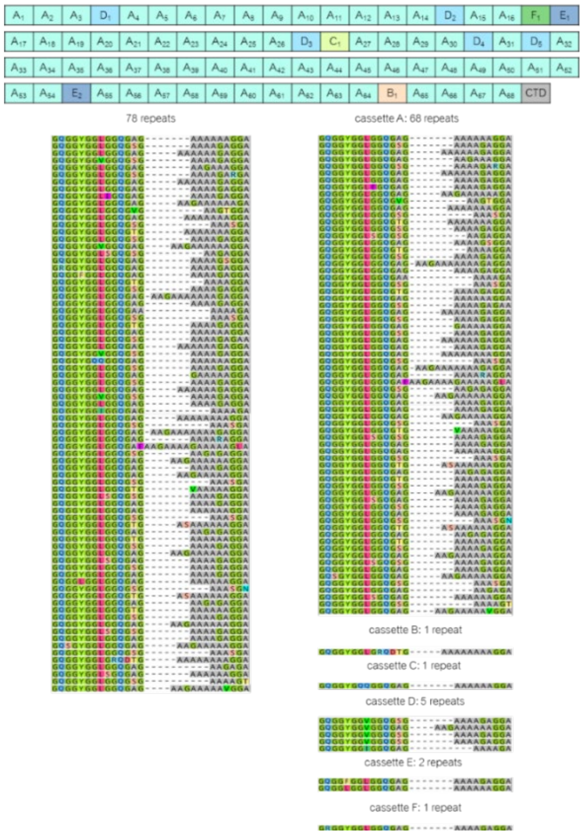


Fig. 2 Protein structure of *MaSp1A* that consist of N-terminal domain (NTD) and 78 amino acid repeats and categorized amino acid repeats into 6 cassettes; cassette A: 68 repeats, cassette B: 1 repeat, cassette C: 1 repeat, cassette D: 5 repeats, cassette E: 2 repeats and cassette F: 1 repeat

MaSp2A มีความยาวของกรดอะมิโน 3,178 ตัว ประกอบด้วย N-terminal domain (NTD), ชุดซ้ำของกรดอะมิโนประมาณ 63 ชุดซ้ำ และ C-terminal domain (CTD) โดยสามารถจำแนกลำดับชุดซ้ำได้ 4 ประเภท ได้แก่ ประเภท A จำนวน 43 ชุดซ้ำ, ประเภท B จำนวน 2 ชุดซ้ำ, ประเภท C จำนวน 8 ชุดซ้ำ และประเภท D จำนวน 10 ชุดซ้ำ แสดงดัง Fig. 3

Fig. 3 Protein structure of *MaSp2A* that consist of N-terminal domain (NTD), 63 amino acid repeats and C-terminal domain (CTD) and categorized amino acid repeats into 4 cassettes; cassette A: 43 repeats, cassette B: 2 repeats, cassette C: 8 repeats and cassette D: 10 repeats

จากนั้นนำข้อมูลลำดับชุดซ้ำของกรดอะมิโนทั้งหมดของทั้ง 2 ยีน มาจำแนกประเภทของกรดอะมิโนที่พบในแต่ละลำดับชุดซ้ำ ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม และมีรูปแบบทั้งหมด 8 รูปแบบ อ้างอิงจากการศึกษาของ Babb และคณะเมื่อปี 2017 (Babb et al., 2017) กลุ่มที่ 1 คือ Known motif groups ประกอบด้วยรูปแบบลำดับชุดซ้ำของกรดอะมิโน 3 รูปแบบ ได้แก่ multi A, multi A with variants และ multi GA และ กลุ่มที่ 2 คือ Known motif groups with novel variants ประกอบด้วยรูปแบบชุดซ้ำของกรดอะมิโน 5 รูปแบบ ได้แก่ XGGXGGX, GXGGX, GXSGPG, GPXXQ และ GPG โดย *MaSp1A* สามารถจำแนกรูปแบบชุดซ้ำของกรดอะมิโนได้ 2 กลุ่ม และ 4 รูปแบบ คือ Known motif groups ได้แก่ multi A และ multi GA และกลุ่ม Known motif groups with novel variants ได้แก่ XGGXGGX และ GXGGX และ *MaSp2A* สามารถจำแนกรูปแบบชุดซ้ำของกรดอะมิโนได้ 2 กลุ่ม และ 8 รูปแบบ คือ Known motif groups ได้แก่ multi A, multi A with variants และ multi GA และกลุ่ม Known motif groups with novel variants ได้แก่ XGGXGGX, GXGGX, GXSGPG, GPXXQ และ GPG แสดงดัง Table 2

Table 2 Category of motif patterns which found in *MaSp1A* and *MaSp2A*

Gene	Known motif groups			Known motif groups with novel variants				
	multi A	multi A with variants	multi GA	XGGXGGX	GXGGX	GXSGPG	GPXXQ	GPG
MaSp1A	✓		✓	✓	✓			
MaSp2A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

และหากพิจารณาสัดส่วนกรดอะมิโน (amino acid composition) ของยีน *MaSp1A* และ *MaSp2A* พบว่าสัดส่วนของกรดอะมิโน Glycine (Gly) และ Alanine (Ala) มีสัดส่วนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะมิโนชนิดอื่น แสดงดัง Fig. 4

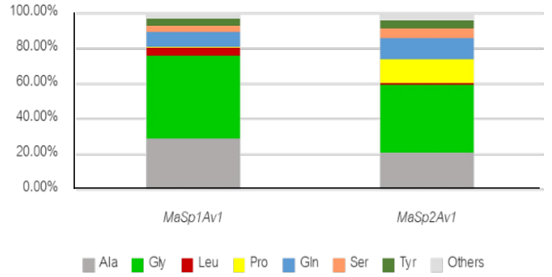


Fig. 4 Amino acid composition from *MaSp1A* and *MaSp2A* including Alanine (Ala), Glycine (Gly), Leucine (Leu), Proline (Pro), Glutamine (Gln), Serine (Ser) and Tyrosine (Tyr)

และหากพิจารณาผลการสร้างแผนภูมิวงศ์วานทางวิวัฒนาการพบว่าลำดับกรดอะมิโนบริเวณ CTD ของยีน *MaSp1A* ของแมงมุม *N. pilipes* จัดอยู่ใน clade เดียวกับยีน *MaSp1* ของแมงมุม *Trichonephila inaurata madagascariensis* โดยมีค่า posterior probability เท่ากับ 1 แสดงดัง Fig. 5

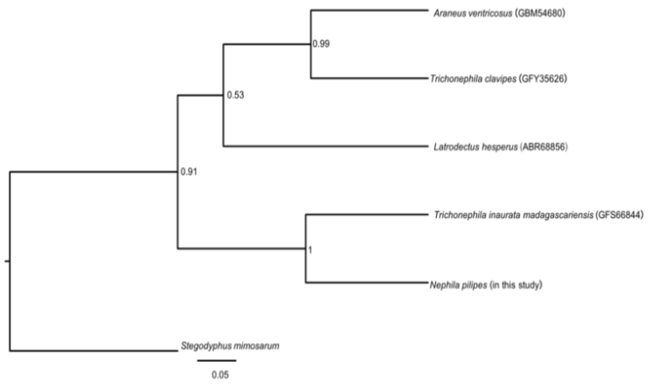


Fig. 5 Phylogenetic gene tree of CTD of *MaSp1* from 6 species and rooted with a *S. mimosarum*

และลำดับกรดอะมิโนบริเวณ CTD ของยีน *MaSp2A* ของแมงมุม *N. pilipes* จัดอยู่ใน clade เดียวกับยีน *MaSp2* ของแมงมุมสกุล *Trichonephila* โดยมีค่า posterior probability เท่ากับ 1 แสดงดัง Fig. 6

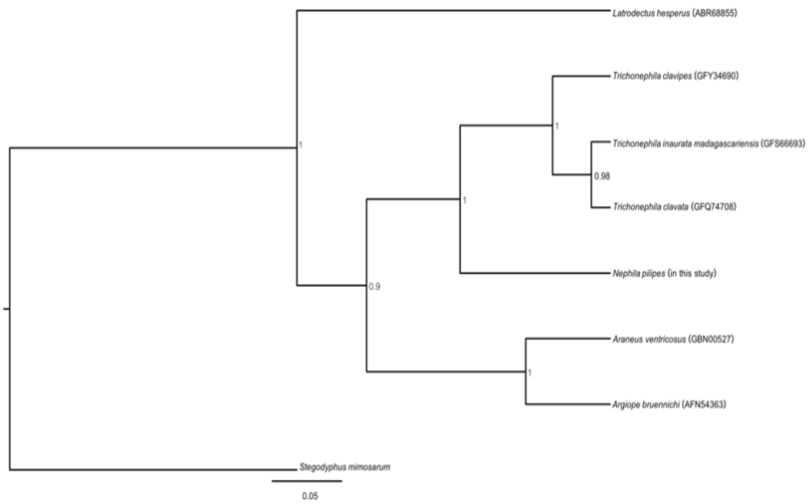


Fig. 6 Phylogenetic gene tree of CTD of *MaSp2* from 8 species and rooted with a *S. mimosarum*

สรุป

การหาข้อมูลของลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยในแมงมุมใยทอง *N. pilipes* จากต่อม MAด้วยเทคนิค Iso-Seq สามารถระบุยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยของแมงมุมในกลุ่ม *MaSp* ได้ 2 กลุ่มหลัก คือ *MaSp1* และ *MaSp2* และจากการคัดเลือกยีนในแต่ละกลุ่มมาอย่างละ 1 เส้น ได้แก่ *MaSp1A* และ *MaSp2A* พบว่าในแต่ละโครงสร้างของยีนประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วน terminal domains และส่วนของลำดับชุดซ้ำของกรดอะมิโน และในแต่ละชุดซ้ำของกรดอะมิโนมีประเภทของชุดซ้ำที่หลากหลาย ตั้งแต่ 4–6 ประเภท และพบสัดส่วนของกรดอะมิโน Alanine และ Glycine มากที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะมิโนชนิดอื่น เนื่องจากสัดส่วนของกรดอะมิโน Alanine ที่สูงจะส่งผลให้เกิดการม้วนพับเป็นโครงสร้างแบบ beta sheet มีผลทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติแข็งแรง และสัดส่วนของ Glycine ที่สูงจะส่งผลให้เกิดการม้วนพับเป็นโครงสร้างแบบ helix มีผลทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติยืดหยุ่น (Zhao et al., 2017) และผลจากการสร้างแผนภูมิวงศ์วานวิวัฒนาด้วยลำดับกรดอะมิโนบริเวณ CTD ของยีน *MaSp1A* และ *MaSp2A* ของแมงมุม *N. pilipes* พบว่าจัดอยู่ใน clade เดียวกับแมงมุมสกุล *Trichonephila* ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแมงมุมทั้ง 2 สกุล จัดอยู่ในวงศ์เดียวกัน (World Spider Catalog, 2023) และเป็นแมงมุมในกลุ่ม Golden-orb weaver ซึ่งลักษณะของเส้นใยในแมงมุมกลุ่มจะสร้างใยแบบ orb web และจะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายกัน จึงทำให้ลำดับกรดอะมิโนบริเวณ CTD ของโปรตีนสไปโดรอินของแมงมุมทั้ง 2 สกุล มีความใกล้เคียงกัน (Kono et al., 2021) ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ สร้างฐานข้อมูลในการนำไปใช้คัดเลือกยีนเพื่อพัฒนาเส้นใยสังเคราะห์ ในระดับอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ของประเทศไทยต่อไปได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพจน์ วาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดงานวิจัย และขอขอบพระคุณ คุณรังสิมา ตัณฑเลขา ผู้อำนวยการโปรแกรมอาวุโสของฝ่ายบริหารวิจัยเพื่อสนับสนุนยุทธศาสตร์ชาติ สวทช. และขอขอบพระคุณ ดร.สิทธิโชค ตั้งภัสสรเรือง และคณะจากศูนย์โอมิกส์แห่งชาติ สวทช. ที่ให้คำแนะนำ การสกัดอาร์เอ็นเอ การวิเคราะห์ลำดับเบสและการวิเคราะห์ Bioinformatics เบื้องต้นแก่ผู้วิจัย

เอกสารอ้างอิง

Ayoub, N.A., Garb, J.E., Tinghitella, R.M., Collin, M.A., Hayashi, C.Y. 2007. Blueprint for a high-performance biomaterial: full-length spider dragline silk genes. PloS One 2: 1–13.

Babb, P.L., Lahens, N.F., Correa-Garhwal, S.M., Nicholson, D.N., Kim, E.J., Hogenesch, J.B., Kuntner, M., Higgins, L., Hayashi, C.Y., Agnarsson, I. 2017. The *Nephila clavipes* genome highlights the diversity of spider silk genes and their complex expression. Nature Genetics 49: 895–906.

Chaw, R.C., Collin, M., Wimmer, M., Helmrick, K.L., Hayashi, C.Y. 2018. Egg case silk gene sequences from *Argiope* spiders: Evidence for multiple loci and a loss of function between paralogs. G3. 8: 231–238.

Drummond, A.J., Rambaut, A. 2007. BEAST: Bayesian evolutionary analysis by sampling trees. BMC Evol. Biol. 7: 1–8.

Eid, J., Fehr, A., Gray, J., et al. 2009. Real-time DNA sequencing from single polymerase molecules. Science 323: 133–138.

Garb, J.E., Ayoub, N.A., Hayashi, C.Y. 2010. Untangling spider silk evolution with spidroin terminal domains. Biomedical Central of Evolutionary Biology 10: 1–16.

Garrison, L.N., Rodringuez, J., Agnarsson, I., Coddington, A.J., Griswold, E.C., Hamilton, A.C., Hedin, M., Kocot, M.K., Ledford, M.J., Bond, E.J. 2016. Spider phylogenomics: Untangling the Spider Tree of Life. PeerJ. 4: 1–35.

Gonzalez-Garay, M.L. 2016. Introduction to Isoform Sequencing Using Pacific Biosciences Technology (Iso-Seq). In: Wu, J. (Eds). Transcriptomics and Gene Regulation. Translational Bioinformatics. Springer, Dordrecht, the Netherlands. pp. 141–160.

Kearse, M., Moir, R., Wilson, A., Stones-Havas, S., Cheung, M., Sturrock, S., Buxton, S., Cooper, A., Markowitz, S., Duran, C., Thierer, T., Ashton, B., Meintjes, P., Drummond, A. 2012. Geneious Basic: An integrated and extendable desktop software platform for the organization and analysis of sequence data. Bioinformatics. 12: 1647–1649.

Kono, N., Nakamura, H., Mori, M., Yoshida, Y., Ohtoshi, R., Malay, A.D., Moran, D.A.P., Tomita, M., Numata, K., Arakawa, K. 2021. Multicomponent nature underlies the extraordinary mechanical properties of spider dragline silk. In: Proceedings of the National Academy of Sciences. No. 31. United States.

Li, W., Godzik, A. 2006. Cd-hit: A fast program for clustering and comparing large sets of protein or nucleotide sequences. Bioinformatics 22: 1658–1659.

World Spider Catalog (WSC). 2023. World Spider Catalog. Version 24. Natural History Museum Bern. https://wsc.nmbe.ch/, 3 January 2023.

Zhao, Y., Hien, K.T.T., Mizutani, G., Rutt, H.N. 2017. Second-order nonlinear optical microscopy of spider silk. Applied Physics B. 123: 1–8.

Roles of mTOR complex 2 in canonical Wnt signaling in glioblastoma

Tankun Banque, Naphat Chantaravisoot*
Department of Biochemistry, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: cnaphat@gmail.com

Abstract

Glioblastoma (GBM) represents 75% of primary brain tumors in adults. Failure of GBM treatments is relevant to the group of cells expressing stemness characteristics called glioblastoma stem cells (GSCs). The Wnt signaling plays an essential role in regulating stem cell homeostasis, while mTORC2 signaling controls cell growth and metabolism in GBM. However, the crosstalk between Wnt and mTORC2 pathways in GBM remains unclear. This research aimed to study the stemness-related regulation mechanisms collaboratively controlled by mTORC2 and canonical Wnt signaling pathways in glioblastoma. The study was based on 3D spheroid culture. Our results showed that mTORC2 inhibition decreased GBM spheroid volume. Moreover, the inactivation of mTORC2 activity led to the impairment of self-renewal capacity and reduced secondary spheroid formation. Moreover, the transcriptional activity of Wnt signaling was investigated. The expression of *Axin2* gene was significantly decreased as a result of mTORC2 inactivation. Conversely, when mTORC2 was inhibited, an increase of β-catenin phosphorylation at Ser552 was observed. We hypothesized that it could be a part of the feedback mechanisms of the cancer cells. Thus, these data implicated that mTORC2 might regulate the stemness properties of glioblastoma stem cells through the inhibition of Wnt signaling pathway. However, its inactivation could also lead to the feedback mechanisms of GBM cells to promote cancer cell survival.

Keywords: Cancer stem cell, Glioblastoma, mTOR, Wnt signaling

Introduction

Malignant glioma represents 75% of primary brain tumors in adults. Glioblastoma multiforme (GBM) has been classified by World Health Organization (WHO) as a grade 4 malignant brain tumor with the histological feature of astrocytic cell lineage (54.25% of malignant glioma) (Lapointe, Perry, and Butowski 2018; Wen and Kesari 2008). It is the most common and lethal primary brain cancer in adults (Wen and Kesari 2008; Almutrafi et al. 2020). GBM has a five-year survival rate of patients lower than 5%, and age-adjusted incidence range from 0.59 to 3.69 per 100,000 persons in the US (Ostrom et al. 2014). The conventional treatment for GBM is surgical resection. After surgery, patients would be treated with radiotherapy combined with chemotherapy (Omuro and DeAngelis 2013). However, several studies have reported GBM resistance to chemotherapy and radiotherapy, therefore reducing their therapeutic efficacies (Goffart et al. 2017; Ou et al., 2020)

Most primary glioblastoma development rapidly arises *de novo* in patients with increasing genetic abnormalities, worsening cell cycle control, regulatory signaling, and DNA damage repair (Wen and Kesari 2008). The molecular classification pathogenesis of tumors has been observed in various cancers. Glioblastomas have a molecular genetic profile that includes *IDH1* mutation. The previous study reported that primary glioblastoma was clinically diagnosed as an *IDH1* mutation in only 3.4%. On the other hand, more than 80% of secondary glioblastoma carries *IDH1* (Ohgaki and Kleihues 2013). Furthermore, a common mutation type of primary glioblastoma is epidermal growth factor receptor (EGFR) abnormalities such as signaling amplification and receptor overexpression. The activation of the downstream pathway includes the phosphoinositide 3-kinase (PI3K)/AKT/mammalian target of rapamycin (mTOR) pathway. Both signaling cascades provide survival and proliferative properties to glioblastoma. Moreover, PTEN is a phosphatase working as an endogenous inhibitor of PI3K. PTEN is inactivated in up to 50% of glioblastoma, resulting in the activation of the downstream signaling pathways and subsequently promoting the cellular activities of glioblastoma, such as proliferation, invasion, and cell survival programming (Wen and Kesari 2008; Verhaak et al. 2010; Ohgaki and Kleihues 2013).

Glioblastoma stem-like cells

Highly diverse cancer cell populations could coordinately promote cell survival. Interestingly, only a small number of populations in the solid tumor might be involved with tumorigenesis, namely cancer stem-like cells (CSCs) or tumor-initiating cells (TICs). CSCs are responsible for giving rise to heterogeneous lineages of differentiated cancer cells and carrying the self-renewal properties themselves. Moreover, this small proportion is involved with the initiation and relapse of several cancers (Bomken et al. 2010). Glioblastoma is a heterogenous and aggressive malignancy with glioblastoma stem-like cells (GSCs) embedded inside the solid mass. Because the brain microenvironment is complex, the differences in inter-heterogeneity subclones in GSCs lead to the difficulty in defining GSCs' biomarkers. However, there still are key specific markers for GSCs used in research, including CD133, CD15, CD44, and A2B5 (Dirkse et al. 2019).

GSCs drive many cell survival mechanisms, including resistance to treatments such as chemotherapy, radiotherapy, and surgery. Considering the origin of GSCs based on previous knowledge, stemness properties of CSCs originated from subclones within the CSCs pool. The major subclones of CSCs include active CSCs that are responsible for self-renewal and contribute to tumorigenesis and quiescent CSCs that do not facilitate tumor growth. However, after chemotherapy or radiotherapy, the quiescent CSCs population can initiate cancer colonies and relapse (Jackson, Hassiotou, and Nowak 2015). A previous study has shown that a few $CD133^+$ GSCs (approximately 100 cells) can trigger tumorigenesis (Singh et al. 2004). In contrast, a large number of

$CD133^-$ GSCs (approximately 1,000,000 cells) cannot recapitulate tumors (Singh et al. 2004). The data have shown in glioblastoma that $CD133^+$ GSCs can resist radiotherapy compared to GSCs with low positive stemness marker CD133. Taken together, CSCs and GSCs have been correlated with increased therapeutic resistance and poor overall survivorship (Manoranjan et al. 2020).

Wnt signaling pathway

The aberrant mechanistic signaling pathways of glioblastoma involve several oncogenic pathways, such as proliferation, invasion, and therapeutic resistance that support cell survival. Wnt signaling is one of the crucial mechanisms controlling stemness and development during embryonic stages. Moreover, Wnt signaling has been implicated in cancer, including glioblastoma. Specifically, heterogeneous CSCs have been strongly associated with the Wnt signaling pathway for promoting self-renewal and tumorigenesis (Barzegar Behrooz et al. 2022).

Wnt signaling is responsible for the differentiation of neural stem cells (NSCs) during development in the brain and promotes the expansion of central nervous system (CNS) progressions. The cascade can be divided into two distinguished pathways, which are dependent β-catenin (canonical) and independent β-catenin (non-canonical). Both pathways are commonly associated with cancers. In the inactivating canonical Wnt signaling, β-catenin is phosphorylated by the destruction complex containing several components, including Axin, APC, casein CK1, and kinase GSK3β. In this inactive state, CK1 phosphorylates β-catenin at Ser45, and GSK3β phosphorylates β-catenin at Ser33, Ser37, and Thr41 (Amit et al. 2002; MacDonald, Tamai, and He 2009; Kahlert et al. 2015; Zhan, Rindtorff, and Boutros 2017). The destabilized β-catenin is then targeted for proteasome degradation leading to the suppression of transcriptional activity and downregulation of the multiple target genes. Activation of canonical Wnt signaling can be triggered by the binding of Wnt ligands to specific cell surface receptors, including Frizzled (FZD) receptor and low-density lipoprotein receptor-related protein 5,6 (LRP5/6) as a co-receptor. After the ligands bind to the FZD receptor, Dishevelled (Dvl) proteins are recruited to the nearby membrane and polymerize with the cytosolic part of LRP5/6 co-receptor. Dvl protein subsequently inactivates the destruction complex, resulting in stabilizing and accumulating β-catenin in the cytoplasm (Zhan, Rindtorff, and Boutros 2017).

PI3K/AKT/mTOR and WNT signaling interactions

PI3K/AKT/mTOR signaling cascade has long been reported to contribute to glioblastoma growth and invasion. The mTOR signaling pathway is hyperactivated in glioblastoma, leading to growth, invasion, and angiogenesis. For glioblastoma stem cells, this small population is responsible for developing the malignancy by activating several signaling pathways, including Wnt/ β-catenin and PI3K/AKT/mTOR signaling. Many recent studies have shown an association between PI3K/AKT/mTOR and Wnt/β-catenin signaling pathway. In addition, the CD133, a marker of cancer stem cells, functions as a putative cell surface receptor for AKT-dependent Wnt/β-catenin activation (Manoranjan et al. 2020). Moreover, phosphorylation of CD133 receptor at tyrosine 828 promotes the cytosolic domain of CD133 to interact with PI3K and subsequently activates AKT in glioma stem cells(Wei et al. 2013).

After mTORC2 phosphorylates AKT at residue S473, the activated AKT subsequently phosphorylates several downstream targets, including GSK3β. Moreover, GSK3β plays a critical role in the inhibition of β-catenin by phosphorylating β-catenin at residues Ser33, Ser37, and Thr4, leading to inactivated Wnt/β-catenin signaling pathway. However, the activation of AKT results in GSK3β phosphorylation at residues Ser9 and inactivates GSK3β. Phosphorylated GSK3β can affect TSC2 activation resulting in the suppression of mTORC1

activity. Conversely, inhibiting GSK3β by activating the Wnt/β-catenin signaling pathway dismisses the mTOR pathway's suppressor and stimulates phosphorylation of S6, S6K, and 4EBP1 (Majewska and Szeliga 2017).

Material and Method

Culture of U87 cell lines and spheroid initiation

To prepare a human glioblastoma cell line (U87), the cells were expanded into T75 culture flasks or 10 cm^2 dishes. U87 cells were maintained in Gibco Dulbecco's Modified Eagle Medium-low glucose (DMEM), supplemented with 10% FBS, penicillin, and streptomycin, in a humidified atmosphere with 5% CO_2 and incubated at 37 ºC. Cell lines would be subcultured for more than one passage but not more than the 20th passage before culturing spheroid.

The U87 spheroids were generated by growing cells in an ultralow attachment 96 well plate)Costar(. The physiological state of the spheroid apparently depends on time and the number of seeding cell densities. Cells will initially be seeded at 10,000 cells per well in a humidified atmosphere with 5% CO_2 and incubated at 37ºC. This step is critical for the spheroid formation and avoids agitation. Moreover, cells would not be seeded at the edge of the ultralow attachment 96 well plate because the medium could evaporate, resulting in the cells being unable to form a spheroid. After seeding, the spheroid would reach the standard size of approximately 370–400 μm on day 4. The spheroid formation, morphology, and size were observed using Evos FL Auto2)Invitrogen by Thermo Fisher Scientific(, then the spheroids were collected for further experiments.

The study is based on 3D spheroid culture, a preferable model for studying cancer stem cells and stemness-related gene expression patterns.

The study aims to investigate the cellular mechanisms of mTOR and Wnt/β-catenin signaling pathways using small molecule inhibitors. After day 4 of spheroid initiation, the U87 spheroids were divided into four groups for small molecule treatments.

1. In the activation condition, U87 spheroids standard culture medium was replaced by serum-starved medium (without 10% FBS), incubated in a humidified atmosphere with 5% CO_2 at 37 ºC for 24 hours. The mTOR pathway is not activated in starved conditions. Then, after 24 hours of serum starvation, the medium was replaced with a standard medium for reactivating the mTOR pathway for 24 hours. The spheroids were collected on day 6.

2. In the starvation condition, U87 spheroids were maintained in standard media up to day 5 before being serum-starved and incubated in a humidified atmosphere with 5% CO_2 at 37ºC for 24 hours. The spheroids were collected on day 6.

3. In the AZD condition, AZD8055 is known as an mTORC1/2 inhibitor. On day 4, 24 hr-starved U87 spheroids were replaced with standard medium with AZD8055 at 1 μg/*ul* final concentration, incubated in a humidified atmosphere with 5% CO_2 at 37ºC for 24 hours. The spheroids were collected on day 6.

4. In the rapamycin condition, rapamycin is known as an mTORC1 inhibitor. On day 4, 24 hr-starved U87 spheroids were replaced with standard medium with rapamycin at 0.1 μg/*ul* final concentration, incubated in a humidified atmosphere with 5% CO_2 at 37ºC for 24 hours. The spheroids were collected on day 6.

Quantitative reverse-transcription polymerase chain reaction

Each spheroid treatment was prepared for RNA isolation. The minimum number of spheroids for RNA extraction was approximately 30 spheroids. The U87 spheroids were collected by pooling about 60 spheroids for RNA extraction using RNeasy kit (QIAGEN) following the manufacturer's protocol. Total RNA was measured

using Nanodrop, and 100 ng of total RNA was used to acquire complementary DNA (cDNA) via reverse transcription with M-MuLV Reverse Transcriptase (BioLabs). The cDNA of each sample was performed on RT-PCR Quanstudio5 (applied biosystems by Thermo Fisher Scientific). *Axin2* is known as a Wnt target gene. The transcriptional activity of Wnt/β-catenin signaling will be validated with *Axin2* transcriptional expression. The data will be analyzed using the $\Delta\Delta$Ct. The Ct values of gene expression were compared to TATA-binding protein (TBP), glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase (GAPDH), and β-actin, which are known as housekeeping genes and glioblastoma's endogenous control.

Western immunoblotting

Each spheroid treatment was performed for protein extraction. The number of spheroids for western immunoblotting is approximately 60 spheroids. The spheroids were lysed in lysis buffer. The lysates were centrifuged for 5 minutes at 13,000 X g and 4°C. The denatured protein (20 μg) of each treatment condition was separated by 10% SDS-PAGE and transferred to a nitrocellulose membrane. The membrane was blocked with Odyssey blocking buffer overnight at 4 $^{\circ}$C, then probed with primary antibodies for 2 hours at room temperature. The primary antibodies: total β-catenin, active β-catenin (Ser552), β-catenin (Ser33, Ser37, and Thr41), total AKT, pAKT (Ser473), total S6, pS6 (Ser235/236), and GAPDH as endogenous control. The primary antibodies were washed with TBST 5 times, 5 minutes each. The membrane was incubated with a secondary antibody for 1 hour at room temperature. The bands were visualized by the Odyssey imaging system.

Tumorsphere formation assay

The *in vitro* tumorsphere formation assay validates the self-renewal capacity and multipotency of the cancer stem cells within a solid tumor or cancer cell line. After 4 days of spheroid formation, U87 spheroids were enzymatically or mechanically digested. The single-cell suspension was prepared for growing secondary tumor spheroid by diluting the single-cell suspension into 100, 25, and 10 cells/well in medium 100 μl. Incubate tumorspheres in a humidified atmosphere with 5% CO_2 and incubate at 37°C. The spheroid was selected with a mean diameter of > 150 μM after 14 days. Aggregates with < 80 μM should never be counted as positive. The number of spheroids was counted and divided by the total seeding number of wells and then multiplied by 100 to determine the number of spheroids.

Statistical analysis

Data were represented as mean ± standard error. Independent t-test analyses were performed for the statistical analyses between each group. To compare more than three categorical groups, one-way ANOVA was performed using SPSS or GraphPad. The statistical significance is set to *P*-value < 0.05. At least three biological replicates were performed in each experiment.

Results and Discussion

Inactivation of mTORC2 activity impaired U87 growth and self-renewal capacity

To determine whether mTORC1 and mTORC2 could initiate spheroid formation using small molecule inhibitors, we compared volumes of spheroids from each group after 96 hours of treatments. Spheroids in the control group were the largest in size, with an average volume of 28 x 10^7 μm^3. Interestingly, the AZD8055 group significantly created the smallest spheroid with an average volume of 16 x 10^7 μm^3 (Fig. 1). In contrast,

the spheroid volume of the rapamycin group slightly decreased. The results suggested that mTORC2 might be involved in tumor spheroid formation and growth.

Cancer stem cells are responsible for initiating tumor and maintaining self-renewal throughout the passages. The tumorsphere formation assay is a powerful method to investigate stemness properties. GBM cells were isolated from primary spheroid to reconstruct the secondary spheroid. Thus, the aforementioned assay was performed to evaluate the mTORC2-mediated stemness properties in U87 stem-like cells. The secondary spheroid formation was generated by diluting the single-cell suspension into 100, 25, and 10 cells/well. Every treatment showed a percentage of secondary spheroid formation at 100 cells/well and had the capacity for self-renewal. Interestingly, the percentage of secondary spheroid formation in AZD8055 treatment significantly decreased when cells were serially diluted. Seeding of 25 and 10 cells/well in AZD8055 treatment shown in Fig. 2 revealed that only 25 and 8 percent, respectively, formed secondary spheroids. Thus, cancer stem cells in GBM helped maintain self-renewal through passaging, enabling cancer cells to initiate spheroids. Moreover, inhibiting mTORC2 activity was shown to decrease the self-renewal capacity of secondary spheroid formation. These data suggested that mTORC2 could also be involved in regulating the stemness properties of glioblastoma stem cells.

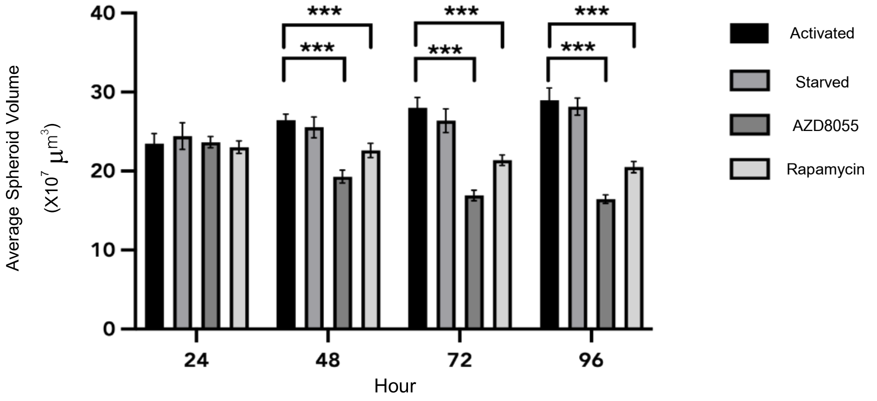


Fig. 1 Average U87 spheroid volumes after incubating with the small molecule inhibitors for 96 hours

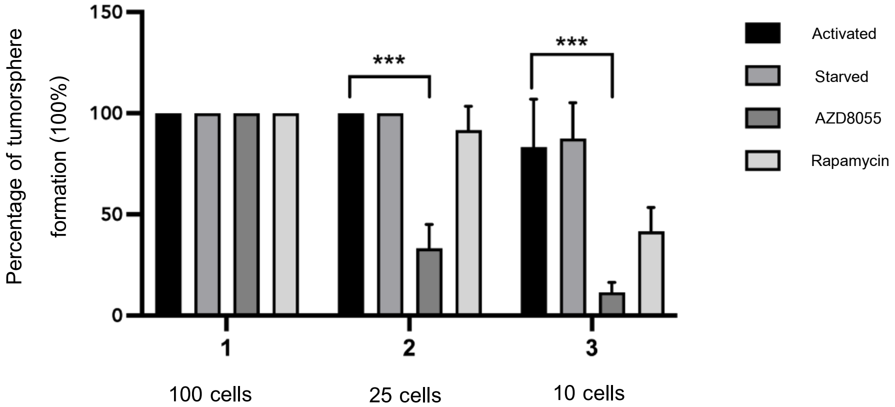


Fig. 2 The self-renewal capacity of U87 spheroids after small molecule inhibitor treatments using *in vitro* tumorsphere formation assay

Inactivation of mTORC2 signaling affected downstream target genes of the Wnt signaling pathway

After inhibiting mTORC1/2, the stemness markers and Wnt target genes were validated using the qRT-PCR technique. *Axin2* is known as the Wnt target gene. The results showed that the transcription level of *Axin2*

significantly decreased in AZD8055-treated cells compared to the activated group (Fig. 3A). Conversely, the stemness-related genes such as *OCT4, SOX2*, and *LIN28B* were upregulated in starved, AZD8055 and rapamycin conditions (Fig. 3B, 3C, 3D). The mechanisms of cancer stem-like properties are involved in several signaling pathways, including transcriptional factors, i.e., OCT4, SOX2, and LIN28B (Chien et al. 2015). The results implicated that mTORC2 may not significantly contribute to cancer stemness-related gene expression in a 3D spheroid culture setting. However, it could not be totally concluded since mTORC2 inhibition also caused ablation of tumorsphere formation, which required stemness properties of the cells. In addition, the activation of Wnt/β-catenin signaling results in the translocation of β-catenin into the nucleus. They lead to a combination of β-catenin-TCF/LEF and regulation of downstream responsive target genes of the Wnt signaling pathway. The inhibition of mTORC2 impaired Wnt/β-catenin signaling activity. Interestingly, the Wnt signaling pathway was reported as an upstream activator of *OCT4* (Mohiuddin, Wei, and Kang 2020). Inactivation of Wnt/β-catenin signaling by mTORC2 inhibition may activate *OCT4* transcription. Protein levels of OCT4, SOX2, and LIN28B will need to be observed. These findings suggested that the inactivation of mTORC2 might prevent β-catenin translocation into the nucleus.

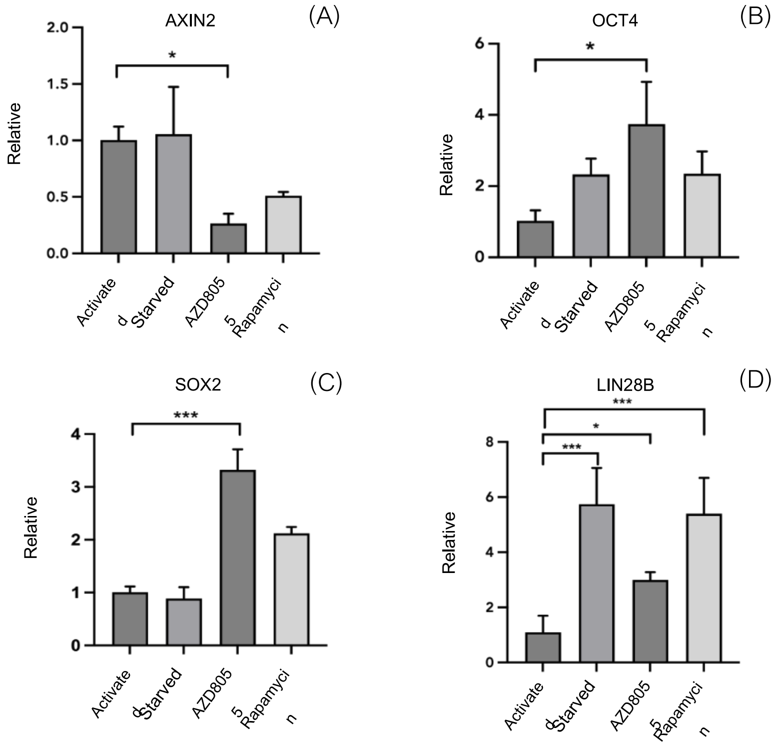


Fig. 3 Transcriptional activities of WNT signaling effector, *Axin2*, and stemness-related genes: (A) Relative expression of *Axin2*; (B) Relative expression of *OCT4*; (C) Relative expression of *SOX2*; Relative expression of *LIN28B* (p < 0.05*, p < 0.01***)

Western blot analysis of mTOR and WNT signaling pathways

Activated mTORC2 subsequently phosphorylates AKT, while active AKT leads to an inactivation of GSK3β (Daisy Precilla et al. 2022). Moreover, AKT also phosphorylates β-catenin and enhances Wnt/β-catenin signaling activity (Shah and Kazi 2022). Here, the critical regulatory proteins between mTOR and Wnt/β-catenin signaling were observed using western blotting analysis. Interestingly, the results showed after incubating the spheroid with AZD8055 for 24 hours, phosphorylated AKT at Ser473 was completely depleted. However, the

phosphorylation of β-catenin at Ser552 was increased compared to other conditions, especially the activated group (Fig. 4). The phospho-β-catenin (Ser552) inhibits ubiquitination, stabilization, and transcriptional regulation. The results showed that without phosphorylation from AKT, other protein kinases were still responsible for the phosphorylation of β-catenin at Ser552, correlating with previous studies that several kinases might be involved with the phosphorylation of β-catenin at Ser552 (Shah and Kazi 2022). One study revealed that protein kinase A (PKA) phosphorylated β-catenin at Ser552 and Ser675, stabilizing β-catenin (Hino et al. 2005; Taurin et al. 2006). However, there has been no evidence that PKA phosphorylation promotes β-catenin nuclear accumulation in GBM. Thus, our results suggested that loss of AKT phosphorylation might reduce nuclear translocation of β-catenin since the expression of *Axin2* was downregulated, but the β-catenin was still stabilized by other kinases such as PKA. This effect might be involved in the negative feedback mechanisms of the cancer cells.

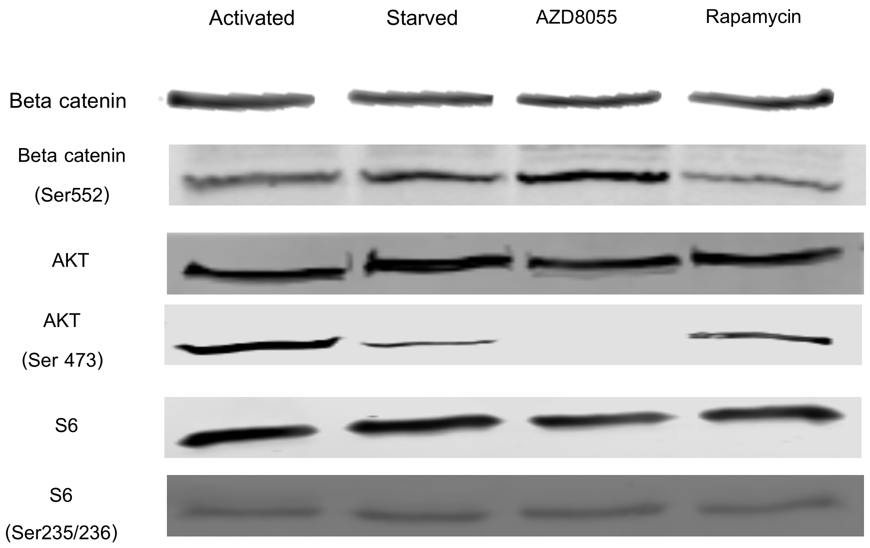


Fig. 4 The major regulatory proteins in mTOR and Wnt/β-catenin signalings

Conclusion

β-catenin is the crucial downstream regulator of the Wnt signaling pathway. Stabilization and nuclear translocation of β-catenin require activation of AKT via the mTORC2 signaling pathway. Inhibition of mTORC2 leads to a decrease in U87 spheroid growth, in addition to the impairment of the self-renewal capacity of secondary spheroid formation. Interestingly, the inactivation of mTORC2 signaling subsequently reduces the transcription of a key downstream target gene of the Wnt signaling pathway but does not downregulate stemness-related transcriptional factors. However, inhibition of active AKT by mTORC1/2 inhibitor increases phosphorylation of β-catenin (Ser552), but the downstream target gene of Wnt signaling is still impaired. These results suggest that the activation of the Wnt signaling pathway requires AKT phosphorylation at Ser473 to fully activate β-catenin. Additionally, the inactivation of mTORC2 potentially stimulates negative feedback mechanisms of the GBM cells to promote cell survival.

Acknowledgements

This work has been supported by Dr.Naphat Chantaravisoot, the Development and Promotion of Science and Technology talents project (DPST) Royal Government of Thailand Scholarship and the Department of Biochemistry, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University.

References

Almutrafi, A., Bashawry, Y., AlShakweer, W., Al-Harbi, M., Altwairgi, A., Al-Dandan, S. 2020. The epidemiology of primary central nervous system tumors at the National Neurologic Institute in Saudi Arabia: A ten-year single-institution study. J. Cancer Epidemiol. 2020: 1429615. doi.org/10.1155/2020/1429615

Amit, S., Hatzubai, A., Birman, Y., Andersen, J.S., Ben-Shushan, E., Mann, M., Ben-Neriah, Y., Alkalay, I. 2002. Axin-mediated CKI phosphorylation of beta-catenin at Ser 45: A molecular switch for the Wnt pathway. Genes. Dev. 16(9): 1066–1076. doi.org/10.1101/gad.230302

Barzegar Behrooz, A., Talaie, Z., Jusheghani, F., Łos, M. J., Klonisch, T., Ghavami, S. 2022. Wnt and PI3K/Akt/mTOR survival pathways as therapeutic targets in glioblastoma. Int. J. Mol. Sci. 23(3). doi.org/10.3390/ijms23031353

Bomken, S., K. Fiser, O. Heidenreich, J. Vormoor. 2010. Understanding the cancer stem cell. Br. J. Cancer 103(4): 439–445. doi.org/10.1038/sj.bjc.6605821

Chien, C. S., Wang, M.L., Chu, P.Y., Chang, Y.L., Liu, W.H., Yu, C.C., Lan, Y.T., Huang, P.I., Lee, Y.Y., Chen, Y.W., Lo, W.L., Chiou, S.H. 2015. Lin28B/Let-7 Regulates Expression of Oct4 and Sox2 and Reprograms Oral Squamous Cell Carcinoma Cells to a Stem-like State. Cancer Res. 75(12): 2553–2565. doi.org/10.1158/0008-5472.Can-14-2215

Precilla, D., Biswas, S.I., Kuduvalli, S.S., Anitha, T.S. 2022. Crosstalk between PI3K/AKT/mTOR and WNT/β-Catenin signaling in GBM - Could combination therapy checkmate the collusion? Cellular Signalling 95: 110350. doi.org/10.1016/j.cellsig.2022.110350

Dirkse, A., Golebiewska, A., Buder, T., Nazarov, P.V., Muller, A., Poovathingal, S., Brons, N.H.C., Leite, S., Sauvageot, N., Sarkisjan, D., Seyfrid, M., Fritah, S., Stieber, D., Michelucci, A., Hertel, F., Herold-Mende, C., Azuaje, F., Skupin, A., Bjerkvig, R., Deutsch, A., Voss-Böhme, A. Niclou, S.P. 2019. "Stem cell-associated heterogeneity in Glioblastoma results from intrinsic tumor plasticity shaped by the microenvironment. *Nat Commun* 10(1): 1787. doi.org/10.1038/s41467-019-09853-z

Goffart, N., Lombard, A., Lallemand, F., Kroonen, J,. Nassen, J., Di Valentin, E., Berendsen, S., Dedobbeleer, M., Willems, E., Robe, P., Bours, V., Martin, D., Martinive, P., Maquet, P., Rogister, B. 2017. CXCL12 mediates glioblastoma resistance to radiotherapy in the subventricular zone. *Neuro. Oncol.* 19(1): 66-77. doi.org/10.1093/neuonc/now136

Hino, S., Tanji, C., Nakayama, K.I., Kikuchi, A. 2005. Phosphorylation of beta-catenin by cyclic AMP-dependent protein kinase stabilizes beta-catenin through inhibition of its ubiquitination. Mol. Cell. Biol. 25(20): 9063–9072. doi.org/10.1128/mcb.25.20.9063-9072.2005

Jackson, M., Hassiotou, F., Nowak, A. 2015. Glioblastoma stem-like cells: At the root of tumor recurrence and a therapeutic target. Carcinogenesis 36(2): 177–185. doi.org/10.1093/carcin/bgu243

Lapointe, S., Perry, A., Butowski, N.A. 2018. Primary brain tumours in adults. *Lancet* 392 (10145): 432-446. doi.org/10.1016/s0140-6736(18)30990-5

Ulf D.K., Suwala, A.K., Katharina, K., Natsumeda, M., Orr, B.A., Hayashi, M., Maciaczyk, J., Eberhart, C.G. 2015. Pharmacologic Wnt inhibition reduces proliferation, survival, and clonogenicity of glioblastoma Cells. Journal of Neuropathology & Experimental Neurology 74(9): 889–900. doi.org/10.1097 /nen.0000000000000227

MacDonald, B.T., Tamai, K., He, X. 2009. Wnt/beta-catenin signaling: components, mechanisms, and diseases. Dev. Cell. 17(1): 9–26. doi.org/10.1016/j.devcel.2009.06.016

Majewska, E., Szeliga, M. 2017. AKT/GSK3β Signaling in Glioblastoma. Neurochem. Res. 42(3): 918–924. doi.org/10.1007/s11064-016-2044-4

Manoranjan, B., Chokshi, C., Venugopal, C., Subapanditha, M., Savage, N., Tatari, N., Provias, J.P., Murty, N.K., Dobl,e M., Singh, S.K. 2020. A CD133-AKT-Wnt signaling axis drives glioblastoma brain tumor-initiating cells. Oncogene 39(7): 1590–1599. doi.org/10.1038/s41388-019-1086-x

Mohiuddin, I.S., Wei, S.J., Kang, M.H. 2020. Role of OCT4 in cancer stem-like cells and chemotherapy resistance. Biochim, Biophys Acta. Mol. Basis Dis. 1866(4): 165432. doi.org/10.1016/j.bbadis.2019.03.005

Ohgaki, H., Kleihues, P. 2013. The definition of primary and secondary glioblastoma. Clin. Cancer Res. 19(4): 764–772. doi.org/10.1158/1078-0432.Ccr-12-3002

Omuro, A., DeAngelis, L.M. 2013. Glioblastoma and other malignant gliomas: A clinical review. JAMA 310(17): 1842–1850. doi.org/10.1001/jama.2013.280319

Ostrom, Q.T., Luc Bauchet, F.G., Isabelle Deltour, D., Fisher, J.L., Chelsea, E.L., Pekmezci, M., Schwartzbaum, J.A., Turner, M.C., Walsh, K.M., Wrensch, M.R., Barnholtz-Sloan, J.S. 2014. The epidemiology of glioma in adults: A state of the science review. Neuro-Oncology 16(7): 896–913. doi.org/10.1093/neuonc/nou087

Ou, A., W. Yung, K. A., Majd, N. 2020. Molecular mechanisms of treatment resistance in Glioblastoma. Int. J. Mol. Sci. 22(1). doi.org/10.3390/ijms22010351

Shah, K., Kazi J.U. 2022. Phosphorylation-dependent regulation of WNT/Beta-catenin signaling. Front. Oncol. 12: 858782. doi.org/10.3389/fonc.2022.858782

Singh, S.K., Hawkins, C., Clarke, I.D., Squire, J.A., Bayani, J., Hide, T., Henkelman, R.M., Cusimano, M.D., Dirks, P.B. 2004. Identification of human brain tumour initiating cells. Nature 432: 396-401. doi.org/10.1038/nature03128

Sorribes, I.C., Handelman, S.K., Jain H.V. 2020. Mitigating temozolomide resistance in glioblastoma via DNA damage-repair inhibition. J. R. Soc. Interface. 17(162): 20190722. doi.org/10.1098/rsif.2019.0722

Taurin, S., Sandbo, N., Qin, Y., Browning, D., Dulin, N.O. 2006. Phosphorylation of beta-catenin by cyclic AMP-dependent protein kinase. J. Biol. Chem. 281(15): 9971–9976. https://doi.org/10.1074/jbc.M508778200

Verhaak, R.G., Hoadley, K.A., Purdom, E., Wang, V., Qi, Y., Wilkerson, M.D., Miller, C.R., Ding, L., Golub, T., Mesirov, J.P. Alexe, G., Lawrence, M., O'Kelly, M., Tamayo, P., Weir, B.A., Gabriel, S., Winckler, W., Gupta, S., Jakkula, L., Feiler, H.S., Hodgson, J.G., James, C.D., Sarkaria, J.N., Brennan, C., Kahn, A., Spellman, P.T., Wilson, R.K., Speed, T.P., Gray, J.W., Meyerson, M., Getz, G., Perou, C.M., Hayes D.N. 2010. Integrated genomic analysis identifies clinically relevant subtypes of glioblastoma characterized by abnormalities in PDGFRA, IDH1, EGFR, and NF1. Cancer Cell 17(1): 98–110. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2009.12.020

Wei, Y., Jiang, Y., Zou, F., Liu, Y., Wang, S., Xu, N., Xu, W., Cui, C., Xing, Y., Liu, Y., Cao, B., Liu, C., Wu, G., Ao, H., Zhang, X., Jiang, J. 2013. Activation of PI3K/Akt pathway by CD133-p85 interaction promotes tumorigenic capacity of glioma stem cells. Proc. Natl. Acad. Sci. 110(17): 6829–6834. doi.org/10.1073/pnas.1217002110

Wen, P. Y., Kesari, S. 2008. Malignant gliomas in adults. N. Engl. J. Med. 359(5): 492–507. doi.org/10.1056/NEJMra0708126

Zhan, T., Rindtorff, N., Boutros, M. 2017. Wnt signaling in cancer. Oncogene 36(11): 1461–1473. doi.org/10.1038/onc.2016.304.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าแบบช่วงสำหรับพารามิเตอร์สัดส่วนทวินาม

Efficiency gomparison of the interval estimation methods for a binomial proportion parameter

<u>อภิชญา สายหยุด</u>*, จุฑาภรณ์ สินสมบูรณ์ทอง, ลี่ลี อิงศรีสว่าง

<u>Aphichaya Saiyud</u>*, Juthaphorn Sinsomboonthong, Lily Ingsrisawang

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Statistics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: aphichaya.saiy@ku.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าแบบช่วงที่ระดับ 95% สำหรับพารามิเตอร์สัดส่วนทวินาม 3 วิธี ได้แก่ วิธีสคอร์ วิธีสูตรแม่นยำ และ วิธี KJ ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นและความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่น จำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลให้มีการแจกแจงทวินาม ซึ่งกำหนดขนาดตัวอย่าง 3 ระดับคือ ตัวอย่างขนาดเล็ก (n = 10, 20) ตัวอย่างขนาดกลาง (n = 50, 70) และ ตัวอย่างขนาดใหญ่ (n = 200, 500) กำหนดพารามิเตอร์ p มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 รวมสถานการณ์ที่ศึกษาทั้งหมด 54 สถานการณ์ ผลการวิจัยพบว่าวิธีสูตรแม่นยำมีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อตัวอย่างมีขนาดกลางและใหญ่และพารามิเตอร์ p มีค่าเท่ากับ 0.5 ยกเว้นกรณีขนาดตัวอย่าง 200 ส่วนวิธีสคอร์มีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพดีกับทุกขนาดตัวอย่างและเกือบทุกค่าของพารามิเตอร์ p และ นอกจากนี้วิธี KJ มีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพดีกรณีตัวอย่างขนาดกลางและใหญ่เกือบทุกค่าของพารามิเตอร์ p

คำสำคัญ: การประมาณค่าแบบช่วง, ความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่น, ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น, พารามิเตอร์สัดส่วนทวินาม

Abstract

The objective of this research was to compare the efficiency of three confidence interval estimation methods for a binomial proportion parameter, namely Score, Rigorous formula and KJ methods. Evaluation of the efficiency for these methods were demonstrated via a simulation study to compare the confidence coefficients and average widths of the three confidence intervals. The binomial distributed data were generated for 54 situations as follows: three levels of the sample size — small sample size (n = 10, 20), medium sample size (n = 50, 70) and large sample size (n = 200, 500) — were studied with the binomial proportion parameter p was defined at 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9. The results are showed that Rigorous formula method tends to have a good performance for medium and large sample sizes with the value of parameter p is 0.5 except for the large sample of size 200. Next, Score method tends to have a good performance for all sample sizes and almost all levels of the parameter p. In addition, KJ method still tends to have a good efficiency for medium and large sample sizes with almost all levels of the parameter p.

Keywords: Average width of the confidence interval, Binomial proportion parameter, Confidence coefficient, Confidence interval estimation

คำนำ

การประมาณค่าพารามิเตอร์ในทางสถิติ มีแนวคิดโดยทั่วไปว่าพารามิเตอร์เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าเนื่องจากเป็นค่าที่ต้องคำนวณจากข้อมูลประชากร จึงเป็นเรื่องยากที่จะเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดจากประชากรที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงศึกษาข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างมาคำนวณตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ สำหรับอนุมานไปยังพารามิเตอร์ในประชากร วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์มี 2 ชนิด คือ การประมาณค่าแบบจุด (Point estimation) และการประมาณค่าแบบช่วง (Interval estimation) การประมาณค่าแบบช่วงเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ของประชากรว่าอยู่ในช่วงใดช่วงหนึ่งที่จะครอบคลุมค่าของพารามิเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นในการประมาณค่าและขนาดตัวอย่างที่สุ่ม (กัลยา, 2546) การประมาณค่าพารามิเตอร์สัดส่วนในการแจกแจงทวินามนั้นมีความสำคัญต่อการดำเนินการอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะภาคธุรกิจและเศรษฐศาสตร์ เช่น กระทรวงพาณิชย์ต้องการประมาณสัดส่วนของมูลค่าสินค้าเกษตรที่ส่งออกจำหน่ายตลาดต่างประเทศเทียบกับมูลค่าส่งออกทั้งหมด สำนักงานการท่องเที่ยวต้องการประมาณสัดส่วนของนักท่องเที่ยวที่เดินทางมาเที่ยวจังหวัดเชียงใหม่ในช่วงเทศกาลสงกรานต์ เป็นต้น (ทรงเกียรติ, 2545) งานวิจัยเกี่ยวกับการประมาณค่าพารามิเตอร์สัดส่วนทวินามจึงมีความสำคัญดังจะเห็นได้จาก งานวิจัยของ รักตาภา (2552) พบว่า วิธีสคอร์จะมีประสิทธิภาพดีในกรณีตัวอย่างขนาดเล็ก เมื่อ $p \le 0.1$ และ ตัวอย่างขนาดกลาง เมื่อ $0.05 \le p \le 0.1$ วิธีสูตรแม่นยำจะมีประสิทธิภาพดีในกรณีตัวอย่างขนาดกลางและขนาดใหญ่ เมื่อ $0.2 \le p \le 0.5$ นอกจากนี้ งานวิจัยของณัฏฐวรรณและคณะ (2559) พบว่าวิธีสคอร์จะมีประสิทธิภาพดีในทุกขนาดตัวอย่างเมื่อพารามิเตอร์ p มีค่ามาก ในปี ค.ศ. 2022 Junsik and Woncheol ได้เสนอวิธี KJ ซึ่งเป็นวิธีการประมาณแบบใหม่โดยนำวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบช่วงของ Agresti and Coull (1998) มาปรับใหม่เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าช่วงความเชื่อมั่นสำหรับการประมาณพารามิเตอร์สัดส่วนทวินาม 3 วิธี คือ วิธีสคอร์ วิธีสูตร และวิธี KJ โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น และค่าความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่น ซึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพดี คือวิธีที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นตามที่กำหนดและความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นน้อยที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

1. สร้างข้อมูลตัวอย่างสุ่มให้มีการแจกแจงทวินามทั้งหมด 54 สถานการณ์ โดยใช้โปรแกรม SAS versions 9.4 ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล โดยกำหนดขนาดตัวอย่าง 3 ระดับ คือ

กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ได้แก่ n = 10, 20

กลุ่มตัวอย่างขนาดกลาง ได้แก่ n = 50, 100

กลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ ได้แก่ n = 200, 500

กำหนดค่าของพารามิเตอร์ (p) ของการแจกแจงทวินาม 9 ระดับ ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 โดยในแต่ละสถานการณ์มีการทดลองซ้ำ 5,000 ครั้ง

2. สร้างช่วงความเชื่อมั่น 95% ของพารามิเตอร์สัดส่วนทวินามทั้ง 3 วิธี ได้แก่

2.1 วิธีสคอร์ (Score method)

Wilson (1927) ได้เสนอช่วงความเชื่อมั่นของวิธีสคอร์ โดยสร้างขึ้นจากการทดสอบสมมุติฐาน $H_0 : p = p_0$ เทียบกับ $H_1 : p \ne p_0$ ที่ระดับนัยสำคัญ α ซึ่งจะยอมรับสมมุติฐานหลัก H_0 เมื่อ

$$\frac{|\hat{p}-p_0|}{\sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{n}}} \le Z_{\frac{\alpha}{2}}$$

โดยจัดให้อยู่ในรูปของสมการกำลังสอง (Quadratic equation) แล้วแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ p_0 โดยกำหนดให้ $p = p_0$ จะได้ขีดจำกัดล่าง (L_S) และ ขีดจำกัดบน (U_S) ของช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ $(1-\alpha)100\%$ เป็นดังนี้

$$L_S = \frac{2n\hat{p} + z_{\alpha/2}^2 - z_{\alpha/2}\sqrt{4n\hat{p}(1-\hat{p}) + z_{\alpha/2}^2}}{2(n+z_{\alpha/2}^2)}$$

$$U_S = \frac{2n\hat{p} + z_{\alpha/2}^2 + z_{\alpha/2}\sqrt{4n\hat{p}(1-\hat{p}) + z_{\alpha/2}^2}}{2(n+z_{\alpha/2}^2)}$$

เมื่อ $\hat{p} = \frac{Y}{n}$ คือ สัดส่วนการเกิดลักษณะที่สนใจในตัวอย่าง; Y คือ จำนวนครั้งของการเกิดลักษณะที่สนใจในตัวอย่างขนาด n ; n คือ ขนาดตัวอย่าง และ $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ คือ ค่าควอนไทล์ที่ $1-\frac{\alpha}{2}$ ของการแจกแจงปรกติมาตรฐาน

2.2 วิธีสูตรแม่นยำ (Rigorous formula method)

Chen et al. (2007) ได้เสนอวิธีอย่างง่ายในการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์สัดส่วนทวินาม โดยอาศัยทฤษฎีบทของ Massart (1990) และ ทฤษฎีบทของ Clunies-Ross (1958) ซึ่งสามารถหาค่า p ได้จาก Equation 1:

$$\exp\left[-\frac{n\left(p-\frac{Y}{n}\right)^2}{2\left(\frac{2}{3}p+\frac{Y}{3n}\right)\left(1-\frac{2}{3}p-\frac{Y}{3n}\right)}\right] = \frac{\alpha}{2} \qquad (1)$$

จะได้ขีดจำกัดล่าง (L_R) และ ขีดจำกัดบน (U_R) ของช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ $(1-\alpha)100\%$ เป็นดังนี้

$$L_R = \hat{p} + \frac{3}{4}\frac{1-2\hat{p}-\sqrt{1+4\frac{9}{8\ln(2/\alpha)}Y(1-\hat{p})}}{1+\frac{9}{8\ln(2/\alpha)}n}$$

$$U_R = \hat{p} + \frac{3}{4}\frac{1-2\hat{p}+\sqrt{1+4\frac{9}{8\ln(2/\alpha)}Y(1-\hat{p})}}{1+\frac{9}{8\ln(2/\alpha)}n}$$

เมื่อ $\hat{p} = \frac{Y}{n}$ คือ สัดส่วนการเกิดลักษณะที่สนใจในตัวอย่าง; Y คือ จำนวนครั้งของการเกิดลักษณะที่สนใจในตัวอย่างขนาด n และ n คือ ขนาดตัวอย่าง

2.3 วิธี KJ (Kim-Jang method)

Junsik and Woncheol (2022) ได้นำวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์สัดส่วนทวินามแบบช่วงโดยนำช่วงความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ ของ Agresti and Coull (1998) มาปรับใช้ในการคำนวณหาขีดจำกัดล่าง (L_{KJ}) และขีดจำกัดบน (U_{KJ}) ของช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ $(1-\alpha)100\%$ โดยนำเสนอใหม่เป็นดังนี้

$$L_{KJ} = \frac{Y+a}{n+2a} - z_{\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\frac{Y+c}{n+2c}\times\frac{n-Y+c}{n+2c}\times\frac{1}{n+d}}$$

$$U_{KJ} = \frac{Y+a}{n+2a} + z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{Y+c}{n+2c} \times \frac{n-Y+c}{n+2c} \times \frac{1}{n+d}}$$

โดย $a = 2.1 - \frac{1}{\sqrt{n}}$; $c = 1.7 - \frac{2}{\sqrt{n}}$; $d = 4 - \frac{1}{\sqrt{n}}$ และ $z_{\frac{\alpha}{2}}$ คือ ค่าควอนไทล์ที่ $1-\frac{\alpha}{2}$ ของการแจกแจงปรกติมาตรฐาน

3. คำนวณค่าประมาณสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น ($\hat{c}$) จากช่วงที่ได้ของแต่ละวิธี

4. ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของช่วงความเชื่อมั่นที่ได้จากวิธีการประมาณแบบช่วงทั้ง 3 วิธี ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นตามที่กำหนด (c_0) ไว้หรือไม่ โดยใช้การทดสอบสมมุติฐาน ด้วยสถิติทดสอบ Z ดังนี้

กำหนดให้ c_0 = 0.95

4.1 สมมุติฐาน

H_0 : สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด $(c \geq c_0)$

H_1 : สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด $(c < c_0)$

4.2 กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) 0.05

4.3 ตัวสถิติทดสอบ $z = \frac{\hat{c} - c_0}{\sqrt{c_0(1-c_0)/m}}$

4.4 บริเวณวิกฤติ คือ จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $Z < -Z_\alpha$ หรือ $\hat{c} < c_0 - Z_\alpha \sqrt{c_0(1-c_0)/m}$

เนื่องจาก m = 5000 จะได้ $\hat{c} < 0.945$ ดังนั้นจะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $\hat{c} < 0.945$

5. คำนวณความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่น เฉพาะกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นที่กำหนด ที่ระดับ 95% เท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$AW = \frac{\sum_{i=1}^{5,000} (U_i - L_i)}{5,000}$$

6. เปรียบเทียบความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นแต่ละวิธี

7. สรุปผลการวิจัยในแต่ละสถานการณ์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าแบบช่วงที่ระดับ 95% สำหรับพารามิเตอร์สัดส่วนทวินาม 3 วิธี ได้แก่ วิธีสคอร์ วิธีสูตรแม่นยำ และ วิธี KJ การพิจารณาว่าวิธีการประมาณค่าแบบช่วงวิธีใดเหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากการตรวจสอบว่าช่วงความเชื่อมั่นนั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นที่กำหนดก่อน จึงจะหาความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่น และวิธีการประมาณค่าใดให้ความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นน้อยที่สุดจะถือว่าวิธีการประมาณค่านั้นเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งค่าประมาณสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นและความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นทั้ง 3 วิธี แสดงดัง Table 1 และ Table 2

Table 1 The estimated confidence coefficient of the 95% confidence interval for three methods.

Sample size (*n*)		Methods	Parameter *p*								
			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Small	10	S	0.895	0.993*	0.947*	0.986*	0.976*	0.986*	0.947*	0.993*	0.895
		R	1.000*	1.000*	0.999*	0.999*	1.000*	0.999*	0.999*	1.000*	1.000*
		KJ	0.895	0.993*	0.947*	0.986*	0.976*	0.986*	0.947*	0.993*	0.895
	20	S	0.953*	0.971*	0.977*	0.962*	0.954*	0.962*	0.977*	0.971*	0.953*
		R	0.953*	0.971*	0.947*	0.962*	0.954*	0.962*	0.947*	0.971*	0.953*
		KJ	0.953*	0.971*	0.977*	0.962*	0.954*	0.962*	0.977*	0.971*	0.953*
Medium	50	S	0.977*	0.956*	0.962*	0.941	0.930	0.941	0.962*	0.956*	0.977*
		R	0.998*	0.994*	0.997*	0.996*	0.994*	0.996*	0.997*	0.994*	0.998*
		KJ	0.977*	0.956*	0.962*	0.941	0.930	0.941	0.962*	0.956*	0.977*
	100	S	0.940	0.945*	0.941	0.961*	0.943	0.961*	0.941	0.945*	0.940
		R	0.998*	0.996*	0.993*	0.995*	0.994*	0.995*	0.993*	0.996*	0.998*
		KJ	0.956*	0.945*	0.954*	0.961*	0.943	0.961*	0.954*	0.945*	0.956*
Large	200	S	0.961*	0.963*	0.952*	0.954*	0.945*	0.954*	0.952*	0.963*	0.961*
		R	0.995*	0.995*	0.996*	0.996*	0.995*	0.996*	0.996*	0.995*	0.995*
		KJ	0.961*	0.963*	0.952*	0.954*	0.945*	0.954*	0.952*	0.963*	0.961*
	500	S	0.955*	0.949*	0.955*	0.950*	0.943	0.950*	0.955*	0.949*	0.955*
		R	0.994*	0.994*	0.994*	0.993*	0.994*	0.993*	0.994*	0.994*	0.994*
		KJ	0.955*	0.949*	0.955*	0.950*	0.943	0.950*	0.955*	0.949*	0.955*

* is the case where the estimation method that provides an estimate of the confidence coefficient not lower than the specific confidence coefficient for each situation.

Table 2 The average width of the 95% confidence interval for three estimation methods.

Sample size (*n*)		Methods	Parameter *p*								
			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Small	10	S	--	0.45**	0.48**	0.49**	0.50**	0.49**	0.48**	0.45**	--
		R	0.58**	0.63	0.67	0.70	0.71	0.70	0.67	0.63	0.58**
		KJ	--	0.46	0.48**	0.50	0.51	0.50	0.48**	0.46	--
	20	S	0.28**	0.33**	0.36**	0.38**	0.39**	0.38**	0.36**	0.33**	0.28**
		R	0.38	0.46	0.51	0.54	0.55	0.54	0.51	0.46	0.38
		KJ	0.29	0.33**	0.37	0.39	0.39**	0.39	0.37	0.33**	0.29
Medium	50	S	0.17**	0.22**	0.24**	--	--	--	0.24**	0.22**	0.17**
		R	0.23	0.30	0.34	0.36**	0.37**	0.36**	0.34	0.30	0.23
		KJ	0.17**	0.22**	0.24**	--	--	--	0.24**	0.22**	0.17**
	100	S	--	0.15**	--	0.19**	--	0.19**	--	0.15**	--
		R	0.16	0.21	0.24	0.26	0.27**	0.26	0.24	0.21	0.16
		KJ	0.12**	0.16	0.18**	0.19**	--	0.19**	0.18**	0.16	0.12**
Large	200	S	0.08**	0.11**	0.13**	0.13**	0.14**	0.13**	0.13**	0.11**	0.08**
		R	0.12	0.15	0.17	0.19	0.19	0.19	0.17	0.15	0.12
		KJ	0.08**	0.11**	0.13**	0.13**	0.14**	0.13**	0.13**	0.11**	0.08**
	500	S	0.05**	0.07**	0.08**	0.09**	--	0.09**	0.08**	0.07**	0.05**
		R	0.07	0.10	0.11	0.12	0.12**	0.12	0.11	0.10	0.07
		KJ	0.05**	0.07**	0.08**	0.09**	--	0.09**	0.08**	0.07**	0.05**

-- The average width of the confidence interval that are not calculated because the confidence coefficient lower than the specific confidence coefficient.

** is the estimation method that provides the smallest average width of the confidence interval for each situation.

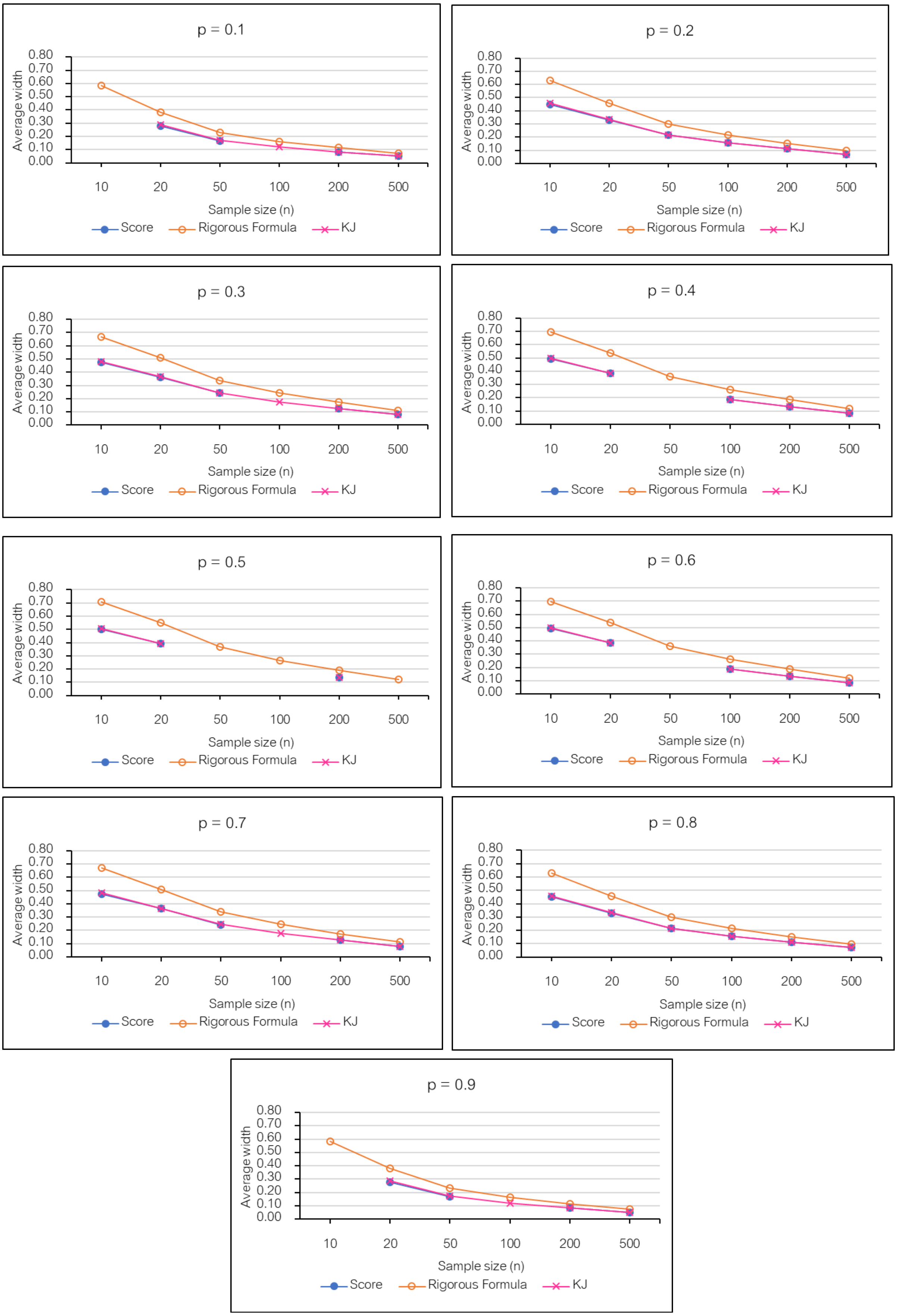


Fig. 1 Comparison of the average width for the 95% confidence interval of three estimation methods

จาก Table 1 พบว่า วิธีสคอร์และวิธี KJ ส่วนใหญ่มีแนวโน้มให้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นที่กำหนดในเกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นกรณีขนาดตัวอย่าง 10 พารามิเตอร์ p มีค่า 0.1 และ 0.9 และ กรณีขนาดตัวอย่าง 50 พารามิเตอร์ p มีค่า 0.4 ถึง 0.6 และ กรณีขนาดตัวอย่าง 100 พารามิเตอร์ p มีค่า 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 ส่วนวิธีสูตรแม่นยำมีแนวโน้มให้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นที่กำหนดในทุกสถานการณ์

จาก Table 2 พบว่า เมื่อตัวอย่างมีขนาดเล็ก วิธีสคอร์มีแนวโน้มให้ค่าความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นน้อยที่สุดในทุกสถานการณ์ ยกเว้นเมื่อพารามิเตอร์ p มีค่า 0.1 และ 0.9 เมื่อตัวอย่างมีขนาดกลาง วิธีสคอร์และวิธี KJ มีแนวโน้มให้ค่าความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นน้อยที่สุด ยกเว้นเมื่อขนาดตัวอย่าง 50 และพารามิเตอร์ p มีค่า 0.4 ถึง 0.6 ส่วนวิธีสูตรแม่นยำจะมีแนวโน้มให้ค่าความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นน้อยที่สุดเมื่อขนาดตัวอย่าง 50 และพารามิเตอร์ p มีค่า 0.4 ถึง 0.6 และขนาดตัวอย่าง 100 และพารามิเตอร์ p มีค่า 0.5 เมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่ วิธีสคอร์และวิธี KJ มีแนวโน้มให้ค่าความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นน้อยที่สุดในเกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นเมื่อขนาดตัวอย่าง 500 และพารามิเตอร์ p มีค่า 0.5

จาก Fig. 1 เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่าความกว้างเฉลี่ยของทุกวิธีมีแนวโน้มลดลงทุกระดับของพารามิเตอร์ p

สรุป

เมื่อนำทุกสถานการณ์ของวิธีการประมาณที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นที่กำหนดมาเปรียบเทียบความกว้างเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่น สรุปได้ว่าวิธีการประมาณค่าแบบช่วงความเชื่อมั่นที่เหมาะสมในแต่ละสถานการณ์ ดัง Table 3

Table 3 The proper 95% confidence interval estimation method of a binomial proportion parameter p for each situation

Sample size (n)		Parameter p								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Small	10	R	S	S, KJ	S	S	S	S, KJ	S	R
	20	S	S, KJ	S	S	S, KJ	S	S	S, KJ	S
Medium	50	S, KJ	S, KJ	S, KJ	R	R	R	S, KJ	S, KJ	S, KJ
	100	KJ	S	KJ	S, KJ	R	S, KJ	KJ	S	KJ
Large	200	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ
	500	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ	R	S, KJ	S, KJ	S, KJ	S, KJ

S = Score Method, R = Rigorous formula Method, KJ = Kim-Jang Method

จาก Table 3 พบว่า ตัวอย่างมีขนาดกลางและขนาดใหญ่ และพารามิเตอร์ p มีค่า 0.5 วิธีสูตรแม่นยำมีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ยกเว้นกรณีขนาดตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 200 และ วิธีสคอร์มีแนวโน้มจะให้ประสิทธิภาพดีในทุกขนาดตัวอย่างและเกือบทุกค่าของพารามิเตอร์ p นอกจากนี้ วิธี KJ มีแนวโน้มจะให้ประสิทธิภาพดีกรณีที่ขนาดตัวอย่างมีขนาดกลางและขนาดใหญ่เกือบทุกค่าของพารามิเตอร์ p

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.จุฑาภรณ์ สินสมบูรณ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เป็นประโยชน์ จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และให้ข้อคิดเพื่อนำไปปรับปรุง ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2546. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติสำหรับการบริหารและการวิจัย. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ณัฏวรรณ ทิพย์เลิศ, ปรภาว์ วิบูลย์เจริญศรี, มินตรา อ่วมกระทุ่ม, อินทุอร ตานี. 2559. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณแบบช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ค่าสัดส่วนในการแจกแจงทวินาม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 24(5): 706–716.

ทรงเกียรติ วิสุทธิพิทักษ์กุล. 2545. การใช้สถิติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

พิศมัย หาญมงคลพิพัฒน์. 2550. หลักสถิติ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

รักตาภา คูหาพัฒนกุล. 2552. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประมาณช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบทวินาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Agresti, A. Coull, B.A. 1998. Approximate is Better than Exact for Interval Estimation of Binomial Proportions. The American Statistician. 52(2): 119-126.

Chen, X., Zhou, K. Aravena, J.L. 2007. Explicit formula for constructing binomial confidence interval with guaranteed coverage probability. Louisiana State University.

Clunies-Ross, C.W. 1958. Interval estimation for the parameter of a binomial distribution. Biometrika 45(1/2): 275–279.

Junsik, K. Woncheol, J. 2022. A generalized Agresti–Coull type confidence interval for a binomial proportion. J. Korean Stat. Soc. 51: 356–377.

Massart, P. 1990. The tight constant in the Dvoretzky-Kiefer-Wolfowitz inequality. Ann. Probab. 18(3): 1269–1283.

Wilson, E.B. 1927. Probable inference, the law of succession, and statistical inference. J. Am. Stat. Assoc. 22: 209–212.

การประมาณค่าความเข้มของกลุ่มฝน

The storm intensity interpolation techniques

ฉันติ เดชโยธิน, ศรีธรรม ดั่นประดิษฐ์*, อริสรา นาคบุรี, นันทพร วันเรียน, ณัฐจิรา อินมนต์, ศิริรัตน์ สุลา, ศศิวิมล ประทักษ์กุลวงศา, ศาตตรา ศิริแก้ว

Chanti Detyotin, Sritam Danpradit*, Arisara Nakburee, Nanthaphon Wanrian, Natjira Inmon, Sirirat Sula, Sasiwimol Pratakkulwongsa, Sattra Sirikaew

กรมฝนหลวงและการบินเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Inside Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

Corresponding author. E-mail address: Sritamdan@gmail.com

บทคัดย่อ

การประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวงด้วยการนำข้อมูลเรดาร์จากหลายสถานีมาประมวลผลร่วมกันในรูปแบบเรดาร์คอมโพสิตแต่ยังมีข้อมูลกลุ่มฝนบางส่วนขาดหายไปด้วยข้อจำกัดในการตรวจวัดและกระบวนการสร้างข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการประมาณค่าข้อมูลความเข้มการสะท้อนกลับที่ขาดหายไปด้วย 3 วิธีการ คือ วิธีการประมาณค่าจากตำแหน่งใกล้ที่สุด วิธีการประมาณค่าแบบเส้นคู่ และวิธีการประมาณค่าแบบการประสานเชิงลูกบาศก์ โดยประมวลผลผ่านโปรแกรมที่พัฒนาจากโครงการพัฒนาการประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง ผลการวิจัยพบว่าวิธีการประมาณค่าแบบเส้นคู่มีความแม่นยำมากที่สุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MAPE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)มีค่า 3.04 dBZ 4.12 dBZ 41.67% และ 0.83 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การขัดขวางของลำบีมจากภูมิประเทศข้างเคียง, การประมาณค่า, การสะท้อนกลับจากเรดาร์, เรดาร์ตรวจอากาศ

Abstract

The radar-rainfall estimation is used to evaluate areas and the amount of daily rainmaking operation rainfall for the department of royal rainmaking and agricultural aviation (DRRAA). However, the missing storm reflectivity data can be found from the radar measurement limitations such as beam blockage and some errors from radar data generation. To find the best interpolation techniques, the performance comparison between three popular image processing interpolation techniques, Nearest Neighbor (NN), Bilinear (BL), and Cubic Convolution (CC) was presented in this study. The interpolation process of the storm intensities data was carried out using developed programs under the Development of Evaluation Technique for the Royal Rainmaking Operation Project. The results showed that the BL method gave the best performance with MAE, RMSE, and MAPE at 3.04 dBZ, 4.12 dBZ, and 41.67%, respectively, while r was 0.83.

Keywords: Beam blockage, Interpolation, Radar reflectivity, Weather radar

บทนำ

การประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนโดยใช้ข้อมูลการสะท้อนกลับจากเรดาร์ (Radar Reflectivity) เป็นหนึ่งในวิธีการตรวจวัดที่ได้ข้อมูลเชิงพื้นที่มาก มีความละเอียดสูง และรวดเร็ว โดยทั่วไปข้อมูลการตรวจวัดจากเรดาร์ตรวจอากาศ (Weather Radar) จะแสดงผลในรูประดับความเข้มของกลุ่มฝนในหน่วย dBZ ทั้งนี้จากการตรวจวัดดังกล่าวพบว่าข้อมูลกลุ่มฝนบางส่วนขาดหายไปด้วยข้อจำกัดจากการตรวจวัดของเรดาร์และกระบวนการประมวลผลซึ่งจะทำให้การคำนวณพื้นที่และปริมาณน้ำฝนคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาคือการเพิ่มข้อมูลจากค่าหรือข้อมูลที่ทราบค่าที่อยู่ใกล้เคียงโดยใช้ความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งตำแหน่ง เส้น หรือพื้นที่ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า การประมาณค่า (Interpolation) (Malczewski, 1999)

การประมาณค่าด้วยวิธีหาค่าของจุดสี (Pixel Value) จากจุดรอบข้างที่ทราบค่าเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อประมวลผลข้อมูลภาพและปรับปรุงคุณภาพของภาพให้มีความคมชัดขึ้น (Suresha and Prakash, 2016) ปัจจุบันวิธีการประมาณค่าได้พัฒนามาอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพของภาพได้เป็นอย่างดี (Patel and Mistree, 2013; Parsania and Virparia, 2014; Singh and Bhide, 2016) เช่น Nearest Neighbor Interpolation (Rukundo and Cao, 2012) Bi-Linear Interpolation (Smith, 1981) Cubic Convolution Interpolation (Keys, 1981; Meijering and Unser, 2003) Bi-Cubic Convolution Interpolation (Lin et al., 2008; Aiazzi et al., 2013) และวิธีการประมาณค่าโดยใช้วิธีหรือเทคนิคอื่น ๆ (Plaziac, 1999; Go et al., 2000; Geiss and Hardin, 2020) เป็นต้น โดยมีรายงานการศึกษาวิจัยวิธีการประมาณค่าซึ่งได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ ด้าน เช่น ด้านการแพทย์ (Pan et al., 2012) ด้านอุตุนิยมวิทยา (Geiss and Hardin, 2020) และด้านอื่น ๆ (Ashraf et al., 2017) เป็นต้น

กรมฝนหลวงและการบินเกษตรเป็นหนึ่งในหน่วยงานที่ใช้ข้อมูลเรดาร์ในการประเมินและติดตามกลุ่มฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง การพยากรณ์ระยะสั้นสำหรับเตือนภัยล่วงหน้า และการวิจัย โดยใช้ข้อมูลเรดาร์จากหลายหน่วยงานและหลายสถานีมาประมวลผลร่วมกันในรูปแบบเรดาร์คอมโพสิต (Radar Composite) โดยทั่วไปใช้วิธีคอมโพสิตด้วยข้อมูลเรดาร์ (Raw data) แต่การวิจัยนี้ใช้วิธีคอมโพสิตด้วยวิธีการประมวลผลจากภาพเรดาร์ (Image processing) ซึ่งสามารถลดความซับซ้อนในการประมวลผลข้อมูลเรดาร์จากหลายแหล่งข้อมูล สามารถประมวลผลได้เร็ว ใช้ได้กับเรดาร์ทุกประเภทและชนิดข้อมูลเรดาร์ที่แตกต่างกัน ถึงแม้จะนำข้อมูลเรดาร์จากหลายสถานีมารวมกันแต่ยังมีข้อมูลกลุ่มฝนบางส่วนขาดหายไปเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีสิ่งกีดขวางแนวการตรวจวัดของเรดาร์ กระบวนการสร้างข้อมูล เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าความเข้มของกลุ่มฝนจากข้อมูลการสะท้อนกลับจากเรดาร์ที่ขาดหายไปโดยใช้วิธีการประมาณค่า 3 วิธี คือ วิธีการประมาณค่าจากตำแหน่งใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor interpolation: NN) วิธีการประมาณค่าแบบเส้นคู่ (Bi-Linear interpolation: BL) และวิธีการประมาณค่าแบบการประสานเชิงลูกบาศก์ (Cubic Convolution interpolation: CC) และคัดเลือกวิธีการประมาณค่าที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดสำหรับเติมเต็มข้อมูลความเข้มของกลุ่มฝนบางส่วนที่ขาดหายไป

การดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพเรดาร์ Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) ของสถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบในปี ค.ศ. 2020 และจำแนกกลุ่มฝนด้วยโปรแกรมที่พัฒนาภายใต้โครงการพัฒนาการประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง เพื่อให้ได้ข้อมูลกลุ่มฝนแต่ละกลุ่ม แล้วจึงนำไปทดสอบและวิเคราะห์ประมาณค่าความเข้มของกลุ่มฝน ดังนี้

การทดสอบการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝน

การทดสอบหาวิธีการประมาณค่าข้อมูลความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝนที่ขาดหายไป มีขั้นตอนดังนี้

1. คัดเลือกตัวอย่างกลุ่มการสะท้อนที่เป็นกลุ่มฝนแบบ Single Cell จากภาพเรดาร์ แสดงดัง Fig. 1 (a)

2. เลือกกลุ่มฝนที่ให้ค่าการสะท้อนที่มีข้อมูลครบถ้วนเป็นภาพอ้างอิง (Reference) แสดงดัง Fig. 1 (b)

3. สุ่มตัดข้อมูลความเข้มการสะท้อนในบางพิกเซลของภาพหรือกลุ่มฝนอ้างอิงจากข้อ 2 แสดงดัง Fig. 2

4. ประมาณค่าข้อมูลในพิกเซลที่ถูกตัดข้อมูลออกในข้อ 3 ด้วยวิธีการประมาณค่า โดยประมวลผลผ่านโปรแกรมที่พัฒนาจากโครงการพัฒนาการประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลดังกล่าวจะอยู่ในรูปของไฟล์ .csv

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยศึกษาวิธีการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนโดยใช้วิธีการประมาณค่า 3 วิธี (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552) ดังนี้

4.1 วิธีการประมาณค่าจากตำแหน่งใกล้ที่สุด (NN) เป็นวิธีการแทนค่าด้วยระดับค่าสีของจุดภาพเดิมที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดกับจุดภาพที่ทำการสุ่มซ้ำ วิธีการนี้สามารถรักษาค่าความสว่างให้ภาพใหม่ใกล้เคียงกับภาพก่อนปรับแก้ได้มากที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ค่อนข้างง่ายและใช้เวลาในการประมวลผลสั้น

4.2 วิธีการประมาณค่าแบบเส้นคู่ (BL) เป็นวิธีการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นคู่ด้วยการคำนวณระยะทางโดยน้ำหนักระหว่างจุด 4 จุดภาพที่อยู่รอบจุดนั้น ซึ่งจุดภาพที่อยู่ใกล้จะให้น้ำหนักมากกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป โดยภาพใหม่ที่ได้จะเรียบและมีความต่อเนื่อง (Smooth) มีรายละเอียดลดลงจากข้อมูลภาพเริ่มต้น และใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่าวิธี NN

4.3 วิธีการประมาณค่าแบบการประสานเชิงลูกบาศก์ (CC) เป็นวิธีการใช้ค่าระดับสีของจุดภาพใกล้เคียงกับจุดภาพที่ทำการสุ่มตัวอย่างซ้ำจำนวน 9 หรือ 16 จุดภาพ เพื่อการคำนวณค่าใหม่ วิธีดังกล่าวนี้จะสร้างความสัมพันธ์ในลักษณะโพลีเมียลระดับสูงในการดำเนินการ (มากว่า 1st order) โดยค่าใหม่จะเป็นค่าเฉลี่ยจากจุดภาพโดยรอบทั้งหมด ดังนั้นภาพที่ได้จะมีความคมชัดและต่อเนื่องซึ่งอาจจะแตกต่างไปจากภาพเดิมมากขึ้นอยู่กับปริมาณจุดภาพเดิมที่ใช้ ดังนั้นวิธีนี้จึงค่อนข้างมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่าวิธี NN และ BL

5. นำไฟล์ .csv มาพล็อตค่าความเข้มที่ระบุไว้ในพิกเซล และนำค่าที่ได้จากการประมาณค่าดังกล่าวเปรียบเทียบกับค่าของพิกเซลในภาพอ้างอิง คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนและความแม่นยำระหว่างค่าของพิกเซลอ้างอิงและพิกเซลที่ได้จากการประมาณค่าของแต่ละวิธีการด้วยระเบียบวิธีทางสถิติ (รายละเอียดดังอธิบายในหัวข้อการวิเคราะห์ความแม่นยำจากการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝน)

6. เลือกวิธีการประมาณค่าที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากเกณฑ์ทางสถิติ

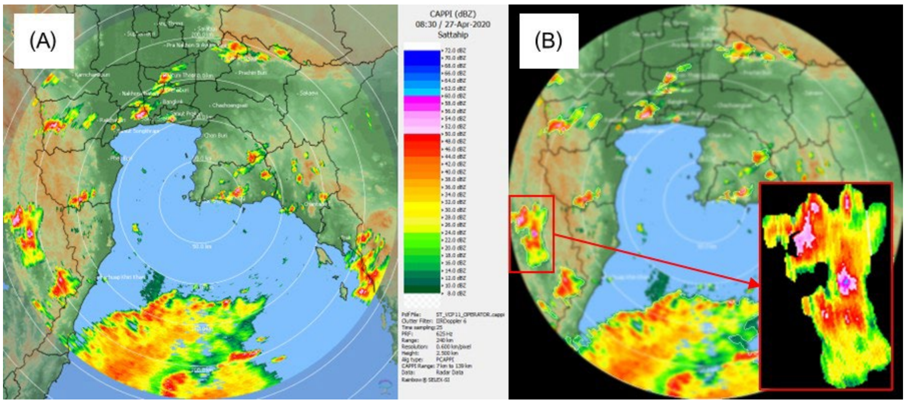


Fig.1 (A) Radar CAPPI product and (B) storm cell identify example

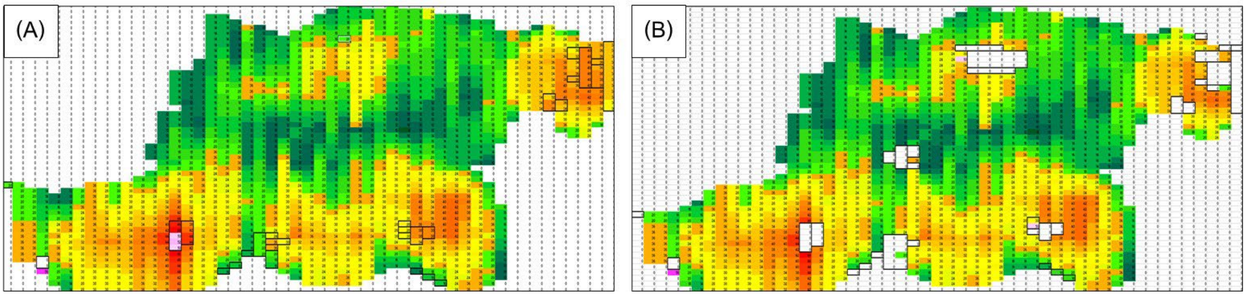


Fig. 2 (A) The reference radar reflectivity storm cell; and (B) the partially removed radar reflectivity storm cell

การวิเคราะห์ความแม่นยำจากการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝน

การวิเคราะห์ความแม่นยำจากการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝนเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติของกลุ่มฝนที่เกิดขึ้นจริงกับข้อมูลที่เกิดจากการประมาณค่าโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางสถิติ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error: RMSE) ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: r) คำนวณได้ดัง Equation (1) – (4) ตามลำดับ (Chantraket et al., 2013; ธีร์ธวัช และคณะ, 2560)

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|F_i - A_i\right| \tag{1}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(F_i - A_i\right)^2} \tag{2}$$

$$\mathrm{MAPE} = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{F_i - A_i}{F_i}\right| \tag{3}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{4}$$

เมื่อ A_i และ F_i คือ ข้อมูลอ้างอิงและข้อมูลจากการพยากรณ์ลำดับ i ตามลำดับ x_i และ $\bar{x}$ คือ ตัวแปร x ลำดับ i และตัวแปร x เฉลี่ย ตามลำดับ y_i และ $\bar{y}$ คือ ตัวแปร y ลำดับ i และตัวแปร y เฉลี่ย ตามลำดับ และ n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค่า MAE และ RMSE เข้าใกล้ 0 และ MAPE ต่ำ (แสดงค่าอยู่ในรูปร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์) แสดงให้เห็นว่าค่าจากการพยากรณ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง ขณะที่ค่า r ซึ่งมีค่า $-1 \le r \le 1$ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร โดยค่า r เข้าใกล้ -1 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันในเชิงตรงกันข้าม ค่า r เข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ขณะที่ค่า r เท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้ง 2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน

ผลการวิจัย

ผลการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝน

ผลการการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝนโดยใช้วิธีการประมาณค่า 3 วิธี คือ NN BL และ CC สำหรับประมาณค่าความเข้มของกลุ่มฝนที่สุ่มตัดออกในบางพิกเซลจากภาพอ้างอิง พบว่าค่าที่ได้จากการประมวลผลผ่านโปรแกรมที่พัฒนาจากโครงการพัฒนาการประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง สามารถประมาณค่าความเข้มที่ระบุในแต่ละพิกเซลโดยแสดงการเปรียบเทียบกับภาพอ้างอิงได้ดัง Fig. 3

จาก Fig. 3 พบว่าภาพที่ได้จากการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนด้วยวิธี NN และ BL มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับภาพอ้างอิง ขณะที่ภาพที่ได้จากการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนด้วยวิธี CC มีความเรียบเนียนซึ่งไม่สอดคล้องกับภาพอ้างอิง หรืออาจกล่าวได้ว่าภาพดังกล่าวค่อนข้างเปลี่ยนแปลงไปจากภาพอ้างอิง นอกจากนี้ผลการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนตามวิธีต่าง ๆ ข้างต้นจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังสามารถแสดงได้ดัง Fig. 4

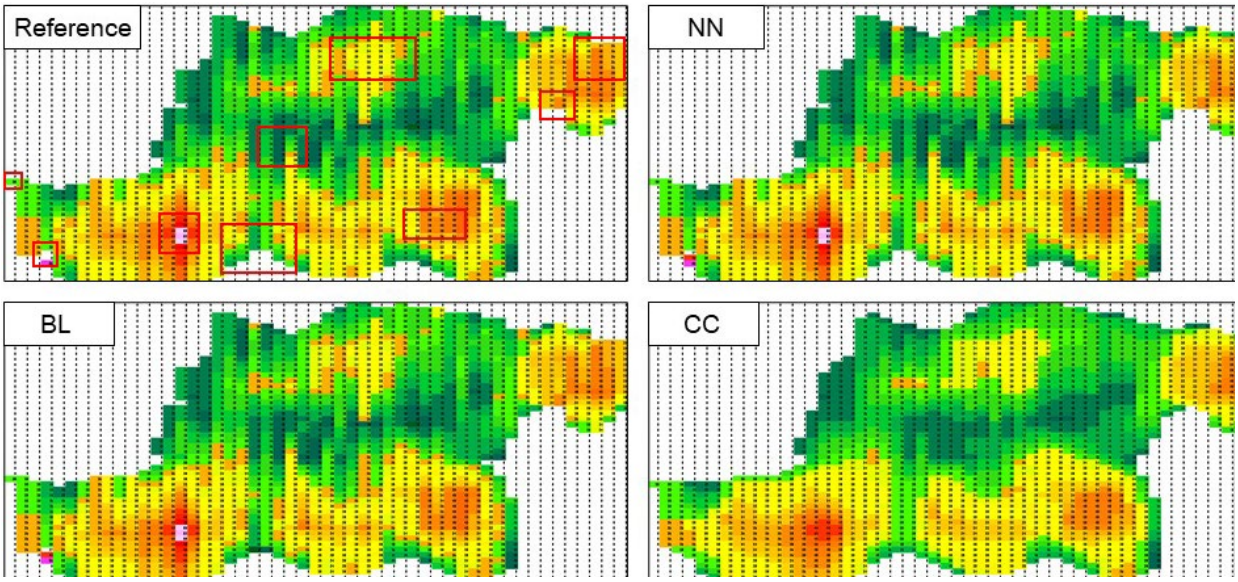


Fig. 3 Reference and modified radar reflectivity storm cell using nearest neighbor interpolation, bi-linear interpolation, and cubic convolution interpolation

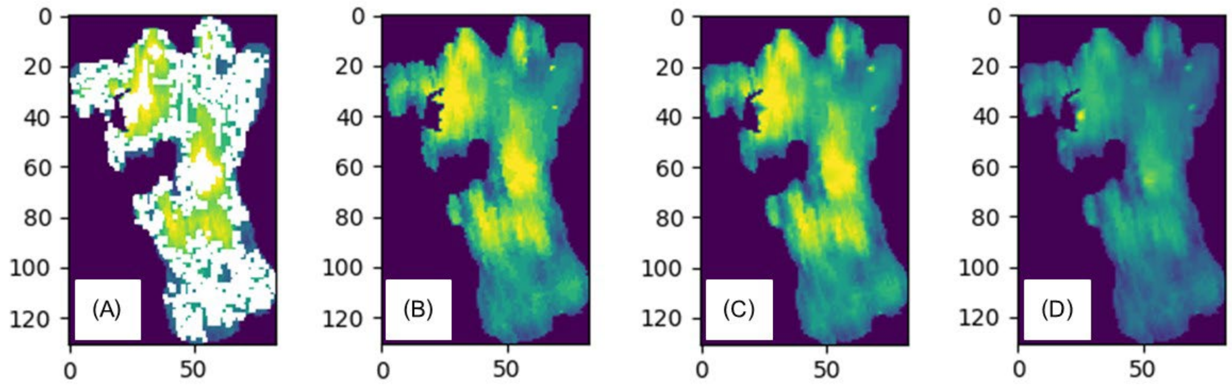


Fig. 4 (A) The original image storm cell and the image storm cell from program processing using; (B) nearest neighbor interpolation; (C) bi-linear interpolation; and (D) cubic convolution interpolation

ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำจากการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝน

ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำจากการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝนด้วยระเบียบวิธีทางสถิติสามารถแสดงได้ดัง Table 1 พบว่าการประมาณค่าทั้ง 3 วิธี ค่า MAE และ RMSE มีค่าอยู่ในช่วง 3.04–3.05 dBZ และ 4.12–4.63 dBZ ตามลำดับ ขณะที่ค่า MAPE และ r มีค่าอยู่ในช่วง 41.67%–50.10% และ 0.76–0.83 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าทั้ง 3 วิธี พบว่าวิธีการประมาณค่าที่มีมีความแม่นยำมากที่สุด คือ BL CC และ NN ตามลำดับ โดยค่า MAE มีค่า 3.04 3.04 และ 3.05 dBZ ตามลำดับ RMSE มีค่า 4.12 4.41 และ 4.63 dBZ ตามลำดับ และ MAPE มีค่า 41.67% 47.36% และ 50.10% ตามลำดับ ขณะที่ r มีค่า 0.83 0.80 และ 0.76 ตามลำดับ

Table 1 Statistical analysis results for the accurate forecasting

Interpolation	MAE (dBZ)	RMSE (dBZ)	MAPE (%)	r
Nearest neighbor interpolation (NN)	3.05	4.63	50.10	0.76
Bi-linear interpolation (BL)	<u>3.04</u>	<u>4.12</u>	<u>41.67</u>	<u>0.83</u>
Cubic convolution interpolation (CC)	3.04	4.41	47.36	0.80

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การประมาณค่าความเข้มการสะท้อนของกลุ่มฝนโดยผู้วิจัยเลือกตัวอย่างการสะท้อนของกลุ่มฝนที่มีลักษณะเป็น Single Cell เพื่อใช้ในการศึกษาการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนโดยสุ่มตัดความเข้มการสะท้อนที่แตกต่างกันในบางพิกเซลและประมาณค่าความเข้มการสะท้อนดังกล่าวโดยใช้การประมาณค่า 3 วิธีการ คือ NN BL และ CC โดยประมวลผลผ่านโปรแกรมที่พัฒนาจากโครงการพัฒนาการประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง ความแม่นยำของการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนดังกล่าวได้พิจารณาภายใต้ระเบียบวิธีทางสถิติ 4 เกณฑ์ คือ MAE RMSE MAPE และ r ผลการวิจัยพบว่าการประมาณค่าด้วยวิธี BL มีความแม่นยำมากที่สุด โดย MAE RMSE MAPE และ r มีค่า 3.04 dBZ 4.12 dBZ 41.67% และ 0.83 ตามลำดับ ขณะที่การประมาณค่าด้วยวิธี NN มีความแม่นยำน้อยที่สุด โดย MAE RMSE MAPE และ r มีค่า 3.05 dBZ 4.63 dBZ 50.10% และ 0.76 ตามลำดับ การนำวิธีการประมาณค่าความเข้มการสะท้อนแบบ BL ที่ให้ค่าความแม่นยำและใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดในการเติมเต็มข้อมูลกลุ่มฝนที่มีค่าการสะท้อน

บางส่วนที่ขาดหายไป จะทำให้การประเมินปริมาณน้ำฝน พื้นที่การตกของฝน และความรุนแรงการตกของกลุ่มฝนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของเรดาร์คอมโพสิตในช่วงเวลาต่าง ๆ มีความถูกต้องมายิ่งขึ้นและจะส่งผลต่อความแม่นยำในการประเมินน้ำฝนและน้ำท่า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการพัฒนาการประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง จากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

ธีร์ธวัช แก้ววิจิตร, นิตยา เกิดประสพ, กิตติศักดิ์ เกิดประสพ. 2560. การเพิ่มประสิทธิภาพซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันในการพยากรณ์อนุกรมเวลา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 36: 452–458.

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน). 2552. ตำราเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์. อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง. กรุงเทพฯ.

Aiazzi, B., Baronti, S., Selva, M., Alparone, L. 2013. Bi-cubic interpolation for shift-free pan-sharpening. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 86: 65–76.

Ashraf, I., Hur, S., Park, Y. 2017. An investigation of interpolation techniques to generate 2D intensity image from LIDAR data. IEEE Access. 5: 8250–8260.

Chantraket, P., Detyothin, C., Suknarin, A. 2013. Radar reflectivity derived rain-storm characteristics over northern Thailand. EA. 6: 24–33.

Geiss, A., Hardin, J.C. (2020). Radar super resolution using a deep convolutional neural network. J. Atmos. Ocean. Technol. 37: 2197–2207.

Go, J., Sohn, K., Lee, C. 2000. Interpolation using neural networks for digital still cameras. IEEE Trans. Consum. Electron. 46: 610–616.

Keys, R. 1981. Cubic convolution interpolation for digital image processing. IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing 29: 1153–1160.

Lin, C.C., Sheu, M.H., Chiang, H.K., Liaw, C., Wu, Z.C. (2008, May). The efficient VLSI design of BI-CUBIC convolution interpolation for digital image processing. In: 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Seattle, Washington, WA, USA, pp. 480–483.

Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons. New Jersey, NJ, USA.

Meijering, E., Unser, M. 2003. A note on cubic convolution interpolation. IEEE Trans. Image Process. 12: 477–479.

Pan, M.S., Yang, X.L., Tang, J.T. 2012. Research on interpolation methods in medical image processing. J. Med. Syst. 36: 777–807.

Parsania, P., Virparia, D.P.V. 2014. A review: image interpolation techniques for image scaling. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2: 7409–7414.

Patel, V., Mistree, K. 2013. A review on different image interpolation techniques for image enhancement. Int. J. Emerging Technol. Adv. Eng. 3: 129–133.

Plaziac, N. 1999. Image interpolation using neural networks. IEEE Trans. Image Process. 8: 1647–1651.

Rukundo, O., Cao, H. 2012. Nearest neighbor value interpolation. Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl. 3: 1–6.

Singh, M.R., Bhide, A.S. 2016. A review of image retrieval using different types of interpolation techniques. Int. Res. J. Eng. Technol. 3: 1423–1426.

Smith, P.R. (1981). Bilinear interpolation of digital images. Ultramicroscopy 6: 201–204.

Suresha, D., Prakash, H. N. (2016, July). Single picture super resolution of natural images using N-Neighbor Adaptive Bilinear Interpolation and absolute asymmetry based wavelet hard thresholding. In 2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT). Bangalore, India, pp. 387–393.

การประเมินความต้องการน้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้นเชิงพื้นที่บริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย

The assessment of fruit tree and perennial water requirements in Eastern Thailand

อรุณโรจน์ ศรีเจริญโชติ*, สราวุธ อาทยะกุล, มารุต ราชมณี, ณัฐพล เย็นสกุลสุข

Aroonroth Sricharoenchot*, Sarawut Arthayakun, Marut Ratmanee, Nattapon Yensakunsuk

กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฝนหลวง กรมฝนหลวงและการบินเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Royal Rainmaking Technology Research and Development Division, Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation, Bangkok 10900, Thailand

Corresponding author. E-mail address: aroonroth.ta@gmail.com

บทคัดย่อ

การประเมินความต้องการน้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้นบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย จากข้อมูลการใช้ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน ปี พ.ศ.2563 โดยได้ทำการสกัดข้อมูลไม้ผลและไม้ยืนต้นที่สำคัญ จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ ยางพารา ไม้ผลผสม ปาล์มน้ำมัน ลำไย ทุเรียน สับปะรด มะม่วง เงาะ และมังคุด เพื่อประเมินความต้องการใช้น้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้น โดยการประเมินจากค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET) ซึ่งคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (K_c) คูณกับค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) หักลบกับค่าปริมาณฝนใช้การ (Re) และสร้างแผนที่ความต้องการใช้น้ำของไม้ผลและไม้ต้นยืน ร่วมกับการลงสำรวจข้อมูลภาคสนาม (Ground truth) ด้วยวิธีการประเมินความถูกต้องของชุดข้อมูล (Accuracy assessment) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ตามช่วงการเจริญเติบโตของพืช พบว่า ค่าความถูกต้องของข้อมูลโดยรวม คิดเป็นร้อยละ 72.27 เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการวางแผนการปฏิบัติการฝนหลวง

คำสำคัญ: ข้อมูลเชิงพื้นที่, ความต้องน้ำของพืช, ไม้ผล, ไม้ยืนต้น

Abstract

The study investigates the assessment of fruit tree and perennial water requirements in Eastern Thailand. The Land Development Department’s 2020 land use data were analyzed to assess the evapotranspiration (ET) rate of 9 major crops namely para rubber, mix fruit tree, oil palm, longan, durian, pineapple, mango, and mangosteen. The ET rate was calculated from the crop coefficient (K_c) multiplied with reference crop evapotranspiration (ET_o) and deducted with effective rainfall (Re). The processed data were shown as a map of crop water requirement together with ground truth data by accuracy assessment according to crop growth period. The result revealed that the overall data accuracy is 72.27 percent. The assessment of crop water requirement benefits rainmaking operation planning.

Keywords: Crop water requirements, Fruit tree, Perennial, Spatial data

คำนำ

การปฏิบัติการฝนหลวงให้มีประสิทธิภาพ ถูกที่ ถูกเวลา จำเป็นต้องมีข้อมูลสภาพพื้นที่ (Landscapes) และข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่การเกษตรที่มีการเพาะปลูกในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ และข้อมูลความต้องการน้ำของพืชเกษตรกรรมเหล่านั้นตามช่วงการเจริญเติบโตที่สอดคล้องกับปริมาณฝนใช้การของพืชที่ตกสะสมในพื้นที่ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจะมีลักษณะข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงเป็นข้อมูลสำคัญที่จะต้องนำมาประกอบการตัดสินใจวางแผน และกำหนดพื้นที่เป้าหมายสอดคล้องกับสภาพอากาศชั้นบนที่เหมาะสมต่อการปฏิบัติการฝนหลวง ดังนั้นหากทราบข้อมูลเชิงพื้นที่ดังกล่าวข้างต้น ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของแต่ละพื้นที่ มาเป็นข้อมูลมาประกอบการตัดสินใจจะช่วยเสริมให้การปฏิบัติการฝนหลวงมีผลสัมฤทธิ์ และเพิ่มประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น

ตั้งแต่ปี 2561 กรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้มีการพัฒนาระบบการประเมินความต้องการน้ำของพืชเศรษฐกิจ 4 ชนิดหลักของประเทศ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เพื่อใช้สนับสนุนการวางแผนการปฏิบัติการฝนหลวงประจำวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในหลายพื้นที่ยังมีการผลิตพืชเศรษฐกิจที่สำคัญนอกจากพืชหลัก 4 ชนิด โดยเฉพาะภาคตะวันออกของประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตผลไม้ที่สำคัญ ได้แก่ ทุเรียน มังคุด เงาะ ลำไย เป็นต้น ดังนั้นการผลิตไม้ผลเหล่านี้ให้ได้คุณภาพต้องมีการบริหารจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม้ผลมีความต้องการน้ำที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตหากในช่วงติดผลไม้ผลได้รับน้ำไม่เพียงพอจะส่งผลกระทบต่อไม้ผลทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพผลผลิต

ดังนั้น การพัฒนาแผนที่ความต้องการใช้น้ำของไม้ผลและไม้ต้นภาคตะวันออกของประเทศไทย ในช่วงเวลาต่าง ๆ ตามช่วงการเจริญเติบโต ที่สอดคล้องกับปริมาณฝนใช้การของพืชที่ตกสะสมในพื้นที่ จึงเป็นชุดข้อมูลที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้ประกอบการวางแผนการปฏิบัติการฝนหลวง อันนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิผลการปฏิบัติการฝนหลวงให้สามารถช่วยเหลือเกษตรกรให้มีผลผลิตตามเป้าหมาย และสร้างรายได้ตรงตามความต้องการ

ข้อมูลและวิธีการ

การดำเนินงานเชิงพื้นที่ครอบคลุมพื้นที่การเพาะปลูกไม้ผลและไม้ยืนยืนที่สำคัญบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย ประกอบด้วย 8 จังหวัด ได้แก่ ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ตราด ฉะเชิงเทรา นครนายก ปราจีนบุรี และสระแก้ว ระยะเวลาทั้งหมด 1 ปี ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ.2563 โดยมีวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

1. ทำการสกัดข้อมูลไม้ผลและไม้ยืนต้นที่สำคัญจากข้อมูลการใช้ที่ดิน ปี พ.ศ.2563 ของกรมพัฒนาที่ดิน เพื่อทำการสร้างชุดข้อมูลพื้นที่การเพาะปลูก

2. ทำการสำรวจภาคสนาม (Ground truth) เพื่อเก็บข้อมูลช่วงเวลาต่าง ๆ ตามช่วงการเจริญเติบโต และทำการประเมินความถูกต้องของชุดข้อมูล (Accuracy assessment)

3. คำนวนหาค่าความต้องการน้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้น โดยประเมินปริมาณการใช้น้ำของพืช (Crop evapotranspiration: ET) จากค่าสัมประสิทธิ์พืช (Crop coefficient: K_c) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference crop evapotranspiration: ET_o) ตาม Equation 1:

$$ET = K_c \times ET_o \qquad (1)$$

โดยที่ ET = ปริมาณการใช้น้ำของพืช (มม./วัน)

K_c = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

ET_o = ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (มม./วัน)

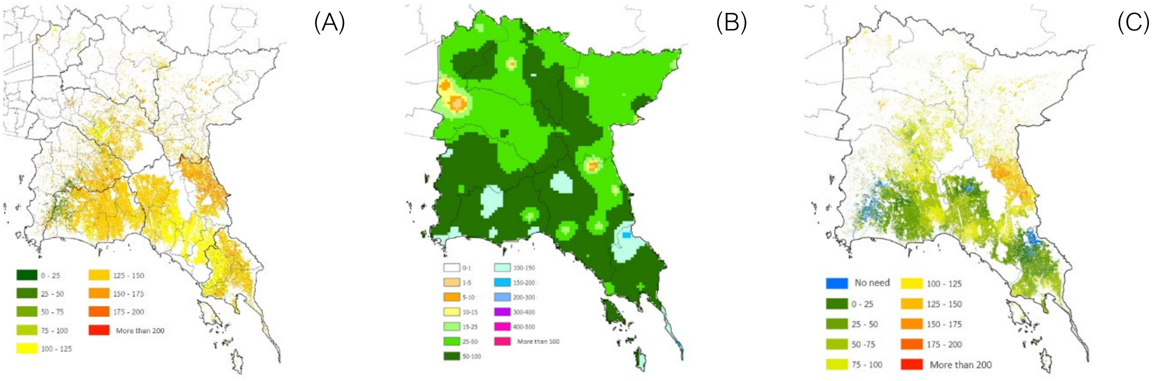
ในงานวิจัยครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ทั้ง 9 ชนิด ซึ่งค่า K_c ที่นำมาใช้อ้างอิงมาจากงานวิจัย ดังนี้ มะม่วง (กรมชลประทาน, 2555) ลำไย (นฤพล และคณะ, 2553) ยางพารา (ประภาศิริ, 2555) และปาล์มน้ำมัน (อุดม เกียรติ และคณะ, 2551) ในส่วนของ สับปะรด (ชูศักดิ์ และคณะ, 2553) ทุเรียน มังคุด เงาะ และไม้ผลผสม (ดิเรก และคณะ, 2545) จะนำค่า K_c อ้างอิงจากงานวิจัยมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลช่วงเวลาต่าง ๆ ตามช่วงการเจริญเติบโต ที่ได้จาก การสำรวจภาคสนาม แสดงดัง Table 1

Table 1 Crop coefficient (K_c)

Major crops	Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Para rubber	0.51	0.51	0.45	0.68	0.90	1.13	1.56	1.87	1.66	1.50	0.82	0.49
Mixed fruit tree	0.90	0.95	1	0.85	0.85	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0.80
Oil palm	1.86	1.95	1.45	2.27	1.11	1.73	2.15	2.16	1.82	2.06	2.37	2.28
Longan	1.31	1.19	1.09	1.24	0.98	0.89	0.86	0.86	1.08	1.43	1.55	1.53
Durian	0.80	0.95	1	0.90	0.90	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0.85
Pineapple	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Mango	2.10	2.46	2.53	2.28	2.29	2.50	1.90	1.69	1.61	1.27	1.24	1.19
Rambutan	0.90	0.95	1	0.85	0.85	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0.80
Mangosteen	0.85	0.95	1	0.90	0.90	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0.80

ส่วนค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ด้วยวิธี Penman Monteith เป็นวิธีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำ ของพืชจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา โดย FAO ได้แนะนำให้ใช้สมการนี้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการคำนวณปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง (Allen et al., 2006; กรมชลประทาน, 2554)

4. จัดทำแผนที่ความต้องการน้ำของไม้ผลและไม้ต้นยืนที่สำคัญในพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยนำ ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET) หักลบกับค่าปริมาณฝนใช้การ (Effective rainfall: Re) ที่คำนวณจากข้อมูลปริมาณน้ำฝน จากสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำฝนของกรมอุตุนิยมวิทยาและสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) โดย ตัวอย่างการวิเคราะห์ แสดงดัง Fig. 1



ET (mm/month) Re (mm/month) ET-Re (mm/month)

Fig. 1 Example analysis result of crop water requirements in April 2020

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. พื้นที่ปลูกพืชเกษตรของภาคตะวันออก

จากข้อมูลการใช้ที่ดินของภาคตะวันออกปี 2563 ของกรมพัฒนาที่ดิน พื้นที่ปลูกพืชเกษตรของภาคตะวันออกมีพื้นที่รวมทั้งหมด 13,126,112 ไร่ ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ปลูกไม้ยืนต้น คิดเป็นร้อยละ 39.24 รองลงมาเป็นพื้นที่นา พื้นที่ปลูกพืชไร่ พื้นที่ปลูกไม้ผล และพื้นที่ปลูกพืชสวน โดยคิดเป็น 24.96, 20.96, 14.57 และ 0.29 ตามลำดับ โดยมีไม้ผลและไม้ยืนต้นที่สำคัญ จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ ยางพารา ไม้ผลผสม ปาล์มน้ำมัน ลำไย ทุเรียน สับปะรด มะม่วง เงาะ และมังคุด แสดงดัง Table 2 และ Fig. 2

Table 2 Area of fruit tree and perennial in Eastern Thailand

Province	Area (Rai)								
	Para rubber	Mixed fruit tree	Oil palm	Longan	Durian	Pineapple	Mango	Rambutan	Mangosteen
Chanthaburi	826,131	311,348	31,200	364,195	168,648	2,770	4,131	75,013	69,501
Chachoengsao	387,687	44,193	46,872	1,322	90	12,224	50,782	45	27
Chonburi	372352	45,864	126,486	482	81	68,524	19,657	45	583
Trat	543,070	64,042	89,223	2,754	29,902	21,778	272	52,573	22,306
Prachinburi	64,477	12,861	19,869	943	308	61	18,864	506	619
Rayong	1,000,513	102,515	40,843	4,329	45,664	78,831	8,542	3,260	17,685
Sakaeo	164,535	23,333	40,348	25,673	59	98	28,077	13	-
NakhonNayok	923	21,880	5,581	15	101	-	6,574	204	361
Total	3,359,688	626,036	400,422	399,713	244,853	184,286	136,899	131,659	111,082
%	60.05	11.19	7.16	7.14	4.38	3.29	2.45	2.35	1.99

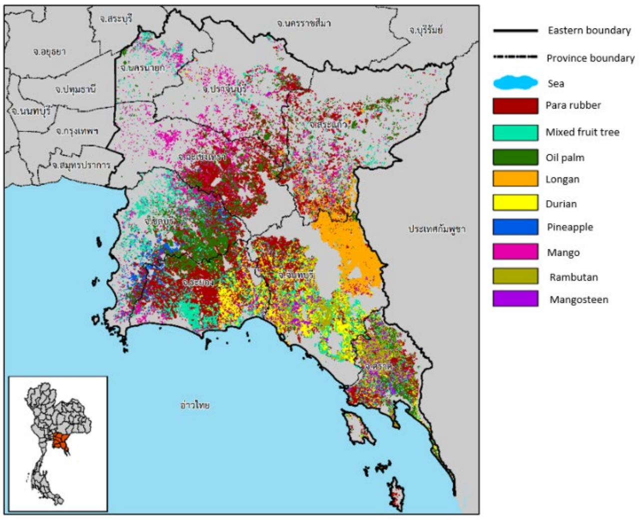


Fig. 2 Major crops areas

2. การประเมินความถูกต้องของข้อมูล

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้การประเมินความถูกต้องของการจำแนกด้วยวิธี Classification error matrix (Congalton And Green, 1999) โดยแสดงเป็นตาราง Error matrix เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำแนกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Classification data) กับข้อมูลที่ได้จากการลงสำรวจพื้นที่จริง (Reference data) พบว่า ค่าความถูกต้องของข้อมูลโดยรวม คิดเป็นร้อยละ 72.27 แสดงดัง Table 3

Table 3 Accuracy assessment result

	Para rubber	Mixed fruit tree	Oil palm	Longan	Durian	Pineapple	Mango	Rambutan	Mangosteen	Total	Reference's accuracy
Para rubber	35	2	2	0	3	1	0	0	1	44	79.55
Mixed fruit tree	1	10	1	1	2	0	1	2	0	18	55.56
Oil palm	0	0	11	0	1	0	0	0	0	12	91.67
Longan	1	1	0	8	0	0	1	0	0	11	72.73
Durian	1	1	1	0	8	0	0	0	0	11	72.73
Pineapple	1	0	1	0	0	5	0	0	0	7	71.43
Mango	0	1	0	1	0	0	6	0	0	8	75.00
Rambutan	1	3	0	0	0	0	0	2	0	6	33.33
Mangosteen	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	50.00
Total	40	19	16	10	14	6	8	4	2	119	
Classification 's accuracy	87.50	52.63	68.75	80.00	57.14	83.33	75.00	50.00	50.00		72.27

3. การจัดทำแผนที่ความต้องการน้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้นที่สำคัญของภาคตะวันออกของประเทศไทย

การจัดทำแผนที่ความต้องการน้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้นที่สำคัญของภาคตะวันออกของประเทศไทย จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ ยางพารา ไม้ผลผสม ปาล์มน้ำมัน ลำไย ทุเรียน สับปะรด มะม่วง เงาะ และมังคุด มาทำการวิเคราะห์หาค่าความต้องการใช้น้ำของพืช (ET) หลังจากนั้นจึงนำค่าฝนใช้การ (Re) มาลบค่าความต้องการใช้น้ำของพืช (ET) เพื่อระบุพื้นที่ที่มีความต้องการใช้น้ำและไม่ต้องการน้ำรายเดือน Fig. 3

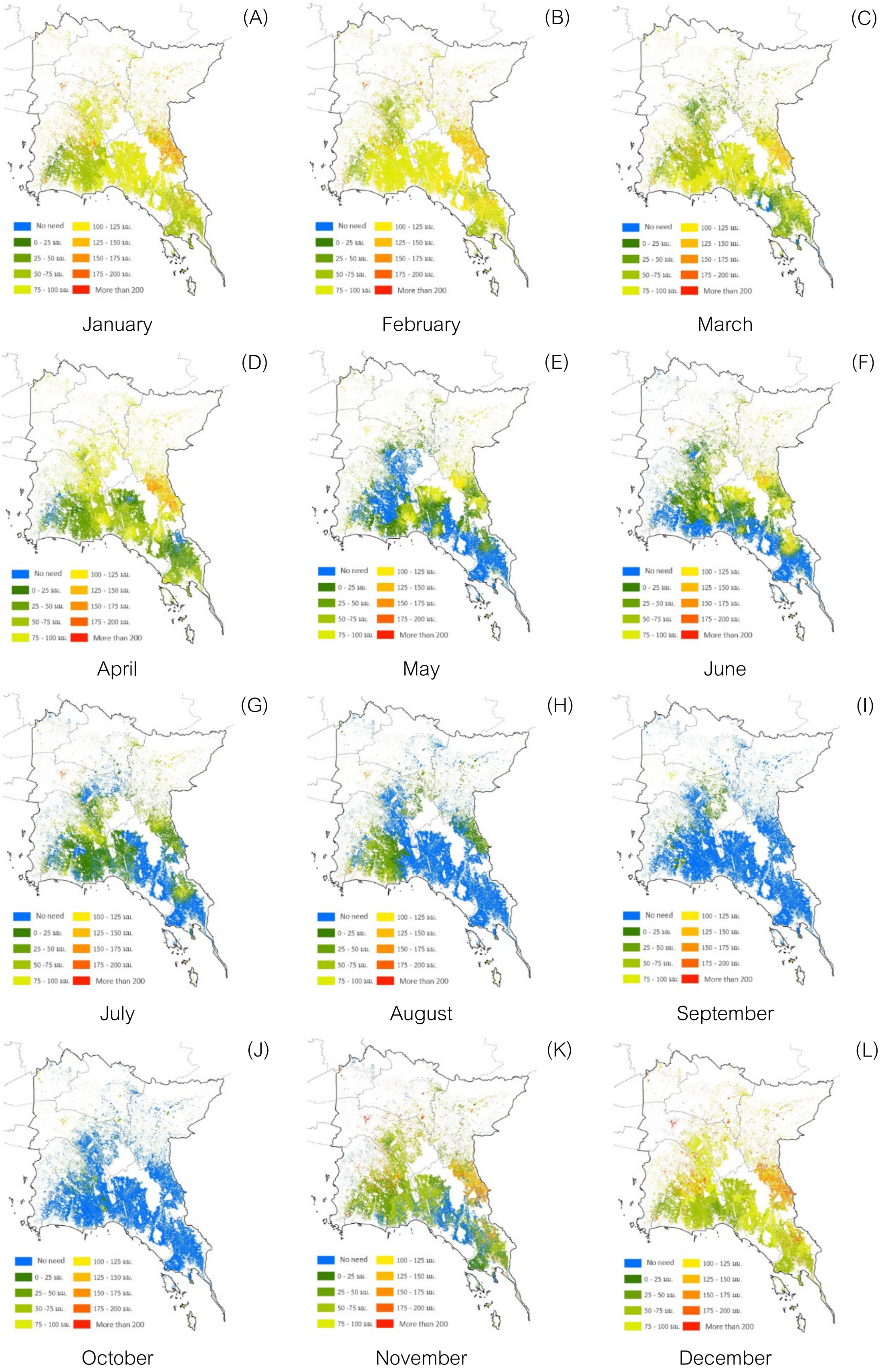


Fig. 3 Monthly crop water requirements in 2020 (ET-Re) (mm/month)

สรุป

จากการศึกษาความต้องการใช้น้ำของไม้ผลและไม้ยืนต้นที่สำคัญของภาคตะวันออกของประเทศไทย พบว่าพืชแต่ละชนิดมีความต้องการน้ำที่แตกต่างกันตามช่วงการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะช่วงที่พืชมีการพัฒนาผลแก่จะมีความต้องการน้ำมากกว่าในช่วงอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (K_c) และเมื่อนำข้อมูลความต้องการน้ำของพืชมาวิเคราะห์ร่วมกับปริมาณฝนใช้การเชิงพื้นที่ จะทำให้เห็นว่าบริเวณและช่วงเวลาใดของพื้นที่ภาคตะวันออกที่พืชมีความต้องการน้ำและไม่ต้องการน้ำ โดยนำข้อมูลมาใช้วางแผนและตัดสินใจการปฏิบัติการฝนหลวงประจำวัน ในขั้นตอนการกำหนดพื้นที่เป้าหมายเพื่อจัดลำดับความสำคัญของพื้นที่ที่ต้องให้ความช่วยเหลือเร่งด่วน และพื้นที่ที่ควรหลีกเลี่ยง ที่อาจเกิดผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตร แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้แผนที่มีความถูกต้องแม่นยำควรปรับปรุงข้อมูลการใช้ที่ดินให้เป็นปัจจุบันอย่างสม่ำเสมอ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฝนหลวง กรมฝนหลวงและการบินเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และขอขอบคุณ กองนโยบายและแผนการใช้ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลการใช้ที่ดินประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2554. ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธีของ Penman – Monteith. ส่วนการใช้น้ำชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ, กรุงเทพฯ, หน้า 5–6.

กรมชลประทาน. 2555. ค่าสัมประสิทธิ์พืชโดยวิธี Penman – Monteith. ส่วนการใช้น้ำชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ, กรุงเทพฯ, หน้า 13

ชูศักดิ์ สัจจพงษ์, จินดารัตน์ ชื่นรุ่ง, รพีพร ศรีสถิต, บพิตร อุไรพงษ์, เหรียญทอง พานสานตา. 2553. ศึกษาการผลิตสับปะรดบริโภคสดด้วยการให้น้ำ การให้ปุ๋ย และวัสดุคลุมดิน. ใน: ผลการปฏิบัติงาน ประจำปีงบประมาณ 2553 เล่ม 2. สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, ขอนแก่น, หน้า 352–362.

ดิเรก ทองอร่าม, วิทยา ตั้งก่อสกุล, นาวี จิระชีวี, อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2545. การออกแบบและเทคโนโลยีการให้น้ำแก่พืช. เจริญรัฐการพิมพ์. กรุงเทพฯ.

นฤพล สีตบุตร, วัลลภ ภู่ทองสุข, วราลักษณ์ งามสมจิตร, สุจิน จรูญศักดิ์, ธีระพล ตั้งสมบุญ, สิโรจน์ ประคุณหังสิต. 2553. การศึกษาการใช้ระบบชลประทานน้ำหยดและไมโครสปริงเกลอร์ ในแปลงปลูกลำไยและลิ้นจี่ (ปี 5). กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ.

ประภาศิริ คงศิริ, พรเพ็ญ โพธิ์ทอง, นิภาภรณ์ ชูสีนวน, สุพินยา จันทร์มี, หทัยกาญน์ สิทธา. 2555. การประเมินศักยภาพพื้นที่ปลูกยางพาราของประเทศไทย ปี 2555. สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการเกษตร, ฉะเชิงเทรา.

อุดมเกียรติ เกิดสม, สัมภาษณ์ ตระกูลอภิสิทธิ์, วีระ ภูตะมี, สุจิน จรูญศักดิ์, สิโรจน์ ประคุณหังสิต. 2551. การศึกษาหาปริมาณการใช้น้ำของปาล์มน้ำมันพันธุ์เทเนอร่า ปีที่ 3. กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (2006). FAO Irrigation and Drainage Paper No.56: Crop Evapotranspiration. FAO.

Congalton, R.G., Green, K. (1999) Assessing the accuracy of remotely sensed data principles and practices. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, FL, USA.

การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนจากแบบจำลองสภาพอากาศระยะสั้น WRF เพื่อสร้างแผนที่พารามิเตอร์อากาศชั้นบน

Evaluation and analysis of upper air forecasting data from WRF model for generating upper air parameter maps

สราวุธ อาทยะกุล*, **ปริญญา อินทรเจริญ**, **อรุณโรจน์ ศรีเจริญโชติ**, **ปทาธิป มีแสงเงิน**

Sarawut Arthayakun*, Parinya Intaracharoen, Aroonroth Sricharoenchot, Patathip Meesangngern

กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฝนหลวง กรมฝนหลวงและการบินเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Royal Rainmaking Technology Research and Development Division, Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sarawut.atk@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นจากแบบจำลองสภาพอากาศระยะสั้น WRF ก่อนนำไปวิเคราะห์ดัชนีเสถียรภาพอากาศและพารามิเตอร์อากาศชั้นบน สร้างแผนที่สำหรับคาดการณ์สภาพอากาศ โอกาสเกิดเมฆ หรือพายุฝนฟ้าคะนองบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ คือ ผลตรวจอากาศชั้นบน เดือนมีนาคม–ตุลาคม 2564 จำนวน 547 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา คือ 07.00–11.00 น. และ 12.00–16.00 น. ผลการวัดประสิทธิภาพพบว่าข้อมูลคาดการณ์อุณหภูมิสอดคล้องกับผลการตรวจวัด โดยมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์สูง และค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.83–1.18 K ความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับผิวพื้นถึง 10,000 ฟุต มีค่า RMSE 7.97–13.56% และคลาดเคลื่อนมากขึ้นในระดับที่สูงขึ้น ความเร็วลมในช่วงเช้าค่า RMSE เฉลี่ยเท่ากับ 6.30 m/s และในช่วงบ่าย 6.77 m/s ทิศทางลมเมื่อแปลงจากหน่วยองศาเป็นทิศทางตาม เข็มทิศ และจำแนกเป็น 4, 8 และ 16 ทิศทาง มีค่าความถูกต้องแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 77.34%, 56.04% และต่ำกว่า 50% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ดัชนีเสถียรภาพอากาศ, แบบจำลองสภาพอากาศ, พยากรณ์อากาศ, อากาศชั้นบน

Abstract

This study aimed to evaluate the WRF upper air forecasting's performance and generate maps of upper air parameters to predict the weather, cloud formations, and thunderstorms in Eastern Thailand. The observational data, 547 samples, were collected from March to October 2021 and divided into two periods; 00–04 UTC and 05–09 UTC. The result showed that the forecast temperature was close to the actual value with RMSE between 0.83–1.18 K. The RMSE of relative humidity at the surface to 10,000 ft. was between 7.97–13.56%. Furthermore, there were more errors when the altitude increased. The average RMSE of wind speed was 6.30 m/s in the morning and 6.77 m/s in the afternoon. Lastly, the wind direction was accurate at 70% when converted from degrees to four cardinal directions, then decreased to 56.04%, and lower than 50% for eight and sixteen ways, respectively.

Keywords: Stability indices, Upper air verification, Weather forecasting, WRF

คำนำ

ข้อมูลอากาศชั้นบนเป็นหนึ่งในชุดข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการวางแผนและตัดสินใจปฏิบัติการฝนหลวงประจำวัน โดยกรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้มีการตรวจอากาศชั้นบนทุกเช้า เวลา 07.00 น. เพื่อนำไปวิเคราะห์สภาวะอากาศชั้นบนประกอบการตัดสินใจดัดแปรสภาพอากาศ (ฉันติ และคณะ, 2557) เนื่องด้วยค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดที่ค่อนข้างสูง จึงตรวจวัดเฉพาะช่วงเช้า จำนวน 12 สถานี ซึ่งปัจจุบันการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction) ถูกนำมาใช้คาดหมายสภาพลมฟ้าอากาศอย่างแพร่หลาย เป็นหนึ่งในข้อมูลสนับสนุนการคาดการณ์ลักษณะสภาพอากาศ โอกาสเกิดเมฆ พายุฝนฟ้าคะนอง รวมถึงการตัดสินใจดัดแปรสภาพอากาศ (Gayatri et al., 2022) เนื่องจากผลการคาดการณ์จากแบบจำลองมีความถี่ทั้งเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ที่มีความละเอียดสูง การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงได้ทดลองนำข้อมูลจากแบบจำลองคาดการณ์สภาพอากาศระยะสั้น (Weather Research and Forecasting: WRF) ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) มาใช้งาน โดยในเบื้องต้น รติ และคณะ (2564) ได้มีการหาพารามิเตอร์คิวมูลัสที่เหมาะสมสำหรับคาดการณ์อากาศชั้นบน และประเมินประสิทธิภาพผลคาดการณ์ โดยใช้ผลตรวจอากาศชั้นบนจากสถานีเรดาร์ฝนหลวง จำนวน 4 สถานี ในช่วงวันที่ 26–28 กรกฎาคม 2560 บทความนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนให้ครอบคลุมตลอดระยะเวลาปฏิบัติการฝนหลวงประจำปีเพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของข้อมูล รวมถึงศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลสร้างแผนที่พารามิเตอร์อากาศชั้นบน เพื่อนำไปใช้ต่อยอดพัฒนาการวิเคราะห์ศักยภาพของอากาศชั้นบนที่เหมาะสมต่อการดัดแปรสภาพอากาศต่อไป

ข้อมูลและวิธีการ

การรวบรวมข้อมูล

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลผลการตรวจอากาศชั้นบน และข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบน จำนวน 10 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม ถึงวันที่ 31 ตุลาคม 2564 โดยมีรายละเอียดของข้อมูลดังนี้

ข้อมูลผลตรวจอากาศชั้นบน เป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบนประจำวันของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร ด้วยเครื่องวิทยุหยั่งอากาศ (Radio sonde) ซึ่งถูกผูกติดกับบอลลูนและปล่อยจากผิวพื้นขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ผลตรวจวัดที่ได้ประกอบด้วย ความกดอากาศ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วและทิศทางลม พิกัดละติจูดและลองจิจูด งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสถานีเรดาร์ฝนหลวง แบบประจำที่ จำนวน 5 สถานี ได้แก่ สถานีเรดาร์ฝนหลวงอมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่ สถานีเรดาร์ฝนหลวงตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย จังหวัดนครราชสีมา สถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ จังหวัดชลบุรี และสถานีเรดาร์ฝนหลวงพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี สรุปจำนวนข้อมูลแบ่งตามสถานีและช่วงเวลาดัง Table 1

Table 1 Summary of the upper air observation data between March and October 2021

Time	Omkoi	Takhli	Pimai	Sattahip	Phanom	Total
00–04 UTC	110	112	101	104	107	534
05–09 UTC	1	0	3	6	3	13

ข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบน เป็นข้อมูลการจำลองอากาศชั้นบนด้วยแบบจำลองคาดการณ์สภาพอากาศระยะสั้นของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) ซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลองสภาพอากาศ WRF (Weather Research and Forecasting) (ทิพย์วรรณ และคณะ, 2557) ในมิติเชิงพื้นที่ ผลการคาดการณ์แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ โดเมนที่ 1 (D1) ความละเอียด 27×27 กิโลเมตร โดเมนที่ 2 (D2) ความละเอียด 9×9 กิโลเมตร และโดเมนที่ 3 (D3) ความละเอียด 3×3 กิโลเมตร แสดงดัง Fig. 1 ในการศึกษาวิจัยเลือกใช้ข้อมูลโดเมนที่ 3 เนื่องจากมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงที่สุด และครอบคลุมพื้นที่ศึกษาเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้คาดการณ์ลักษณะสภาพอากาศ ด้านมิติเชิงเวลาได้ดำเนินการจัดเก็บข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนรายชั่วโมง จำนวน 14 เวลาต่อวัน ตั้งแต่เวลา 07.00–20.00 น. โดยข้อมูลในแต่ละเวลามีขนาด 283,140 กริด ในแต่ละกริด ประกอบด้วยผลคาดการณ์อากาศชั้นบนในแนวตั้ง จำนวน 901 ชั้น ตั้งแต่ระดับความกดอากาศที่ 1,000 ถึง 100 เฮกโตปาสคาล ในแต่ละชั้นประกอบด้วย ค่าความกดอากาศ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และทิศทางลม

การวัดประสิทธิภาพข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบน

ข้อมูลผลตรวจอากาศชั้นบน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด (Observational data) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบน (Forecast data) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการคาดการณ์ของแบบจำลองคาดการณ์สภาพอากาศระยะสั้น WRF โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

เริ่มต้นจากการจัดเตรียมข้อมูล ในขั้นตอนนี้จะทำความสะอาดข้อมูลผลการตรวจอากาศชั้นบน โดยลบแถวข้อมูลที่มีค่าเท่ากับ -32768 ซึ่งเป็นค่าสูญหาย (Missing value) เกิดจากความขัดข้องในการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องวิทยุหยั่งอากาศกับสถานีภาคพื้น จากนั้นดึงข้อมูลตั้งแต่ระดับความกดอากาศที่ 1,000 ถึง 100 เฮกโตปาสคาล ด้วยความถี่ 1 เฮกโตปาสคาล ในกรณีที่ระดับความกดอากาศใดไม่มีข้อมูล ให้ใช้ข้อมูลที่ระดับความกดอากาศที่ใกล้เคียงที่สุดแทน ถัดมาในการจับคู่ข้อมูลผลการตรวจอากาศชั้นบน กับข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบน เพื่อลดความลำเอียงให้น้อยที่สุด การจับคู่ข้อมูลในแต่ละระดับความกดอากาศจะผันแปรไปตามพิกัดการเคลื่อนที่ของเครื่องวิทยุหยั่งอากาศ โดยนำพิกัดของข้อมูลผลการตรวจอากาศชั้นบนและพิกัดของข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนไปคำนวณหาระยะห่างด้วยสมการ Haversine ตาม Equation 3 และเลือกจับคู่ข้อมูลที่มีระยะห่างสั้นที่สุด

$$\Delta \mathrm{lat} = \mathrm{lat_fcast} - \mathrm{lat_obs} \tag{1}$$

$$\Delta \mathrm{lon} = \mathrm{lon_fcast} - \mathrm{lon_obs} \tag{2}$$

$$\mathrm{distance} = 2.\mathrm{R}^{*}.\arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta \mathrm{lat}}{2}\right) + \cos(\mathrm{lat_fcast}).\cos(\mathrm{lat_obs}).\sin^2\left(\frac{\Delta \mathrm{lon}}{2}\right)}\right) \tag{3}$$

R^{*} is the radius of the earth which is 6,371 kilometers (Carroll and Hughes, 2013).

จากนั้นทำความสะอาดข้อมูลอีกหนึ่งครั้ง โดยลบแถวข้อมูลที่ข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนมีค่าความกดอากาศ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และทิศทางลมเท่ากับ 0 รวมถึงแถวข้อมูลที่มีค่า 9.96921e+36 ซึ่งเป็นค่าสูญหาย (Missing value) ของแบบจำลองคาดการณ์สภาพอากาศระยะสั้น สำหรับข้อมูลทิศทางลมจะมีการแปลงมาตรวัดจากองศา (Degree direction) เป็นทิศทางตามเข็มทิศ (Cardinal direction) และจำแนกออกเป็น 4 ทิศทาง (N, E, S, W) 8 ทิศทาง (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) และละเอียดที่สุด จำนวน 16 ทิศทาง (N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S,

SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW) สรุปรายละเอียดดังนี้ ค่าความกดอากาศ หน่วยเฮกโตปาสคาล (hPa) อุณหภูมิ หน่วยเคลวิน (K) ความชื้นสัมพัทธ์ หน่วยเปอร์เซ็นต์ (%), ความเร็วลม หน่วยเมตรต่อวินาที (m/s) และทิศทางลมตามเข็มทิศ

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) ใช้สำหรับวัดความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสองตัวแปร โดยในบทความนี้คือตัวแปรอากาศชั้นบนที่ได้จากการตรวจวัดจริง กับค่าที่ได้จากการคาดการณ์ ผลการวิเคราะห์จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 โดยค่าที่เข้าใกล้ -1.0 หรือ +1.0 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันมากที่สุด หากมีค่าเป็น 0 แสดงว่าตัวแปรที่ทดสอบไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงตาม Equation 4:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{fcast_i}-\overline{\mathrm{fcast}})(\mathrm{obs_i}-\overline{\mathrm{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{fcast_i}-\overline{\mathrm{fcast}})^2 \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{obs_i}-\overline{\mathrm{obs}})^2}} \quad (4)$$

ถัดมารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE (Root Mean Squared Error) เป็นตัวชี้วัดที่ปรับปรุงมาจากค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย MSE (Mean Square Error) ด้วยการเพิ่มรากที่สองทำให้หน่วยของค่าความเคลื่อนเท่ากับหน่วยของค่าพยากรณ์ หากค่า RMSE ยิ่งน้อย แสดงว่าผลการคาดการณ์นั้นใกล้เคียงกับการตรวจวัดจริง ดังแสดงตาม Equation 5:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{fcast_i} - \mathrm{obs_i})^2} \quad (5)$$

และความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) ในบทความนี้ได้นำมาใช้วัดประสิทธิภาพผลคาดการณ์ทิศทางลมที่ถูกแปลงเป็นทิศทางตามเข็มทิศ ผลที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องแม่นยำ ดังแสดงตาม Equation 6

$$\mathrm{Accuracy} = \frac{\textit{Number of correct predictions}}{\textit{Total number of predictions}} \times 100 \quad (6)$$

การวิเคราะห์ข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบน

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบน โดยใช้พื้นฐานการคำนวณจากไลบรารี MetPy (May et al., 2022) ความท้าทายในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ข้อมูลผลคาดการณ์อากาศชั้นบนมีขนาดใหญ่และมีเวลาในการประมวลผลข้อมูลที่จำกัด ต้องพร้อมสำหรับการวิเคราะห์วางแผนปฏิบัติการฝนหลวงประจำวันในช่วงเช้า การจัดเตรียมและทำความสะอาดข้อมูลจึงใช้ไลบรารี Xarray (Hoyer and Hamman, 2017) ซึ่งมีความสามารถด้านการทำงานกับข้อมูลหลากหลายมิติ (Multidimensional arrays) โดยประมวลผลสร้างพารามิเตอร์ ได้แก่ ดัชนีเสถียรภาพอากาศชั้นบน (Stability Indices) ประกอบด้วย LI (Lifted Index), SI (Showalter Index), KI (K Index), TTI (Total Totals index), SWI (SWEAT Index), CAPE (Convective Available Potential Energy), CIN (Convective Inhibition), PW (Precipitable Water), SRH (Storm Relative Helicity), Shear (Bulk Shear), LCL (Lifted Condensation Level), LFC (Level of Free Convection), EL (Equilibrium Level), CCL (Convective Condensation Level), TC (Convective Temperature), FZL (Freezing Level) และ WLD (Warm Layer Depth) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจดัดแปรสภาพอากาศตามงานวิจัยของ Gayatri et al. (2022) นอกจากนี้เป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าคาดการณ์อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ทิศทางลม และความเร็วลม ตามระดับความสูง 5 ช่วง ได้แก่ ระดับผิวพื้น ถึง 5,000 ฟุต, ระดับผิวพื้น ถึง 10,000 ฟุต, 5,000–10,000 ฟุต, 10,000–15,000 ฟุต, และ 15,000–20,000 ฟุต ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไป

แสดงผลในรูปแบบแผนที่ ความละเอียด 3×3 กิโลเมตร โดยบทความนี้ได้สร้างแผนที่บริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย ขนาด 8,720 กริด ครอบคลุมพื้นที่ปฏิบัติการฝนหลวงของศูนย์ปฏิบัติการฝนหลวงภาคตะวันออก แสดงดัง Fig. 1

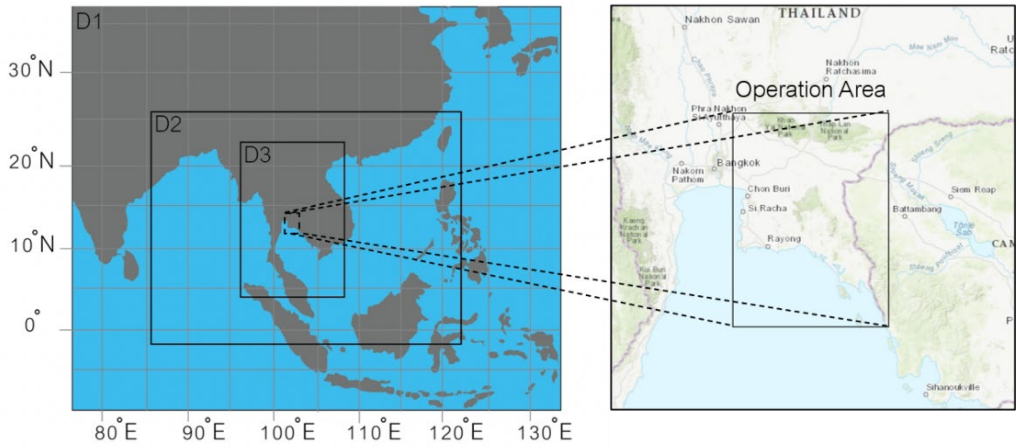


Fig. 1 WRF domain boundary and Eastern Royal Rainmaking's operation area

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนจากแบบจำลองคาดการณ์สภาพอากาศระยะสั้น WRF ด้วยข้อมูลผลตรวจอากาศชั้นบน แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเช้า ตั้งแต่เวลา 07.00–11.00 น. แสดงดัง Table 2 และช่วงบ่าย ตั้งแต่เวลา 12.00–16.00 น. แสดงดัง Table 3

Table 2 Evaluation result at 1,000 to 100 hPa during morning (00–04 UTC)

Station	r_t	r_rh	r_ws	r_wd	rmse_t	rmse_rh	rmse_ws	acc_wd4	acc_wd8	acc_wd16
Omkoi	0.9996	0.8327	0.8982	0.7050	0.89	17.10	4.81	73.16	55.62	36.38
Takhli	0.9996	0.7993	0.8915	0.7483	0.83	17.03	4.63	72.62	53.70	34.54
Pimai	0.9996	0.8127	0.8384	0.7007	0.90	16.51	5.51	70.39	49.87	28.60
Sattahip	0.9996	0.7672	0.8616	0.7287	0.83	17.38	5.52	73.22	53.18	35.73
Phanom	0.9996	0.7965	0.6579	0.6823	0.84	16.53	11.03	76.20	56.39	37.69

Table 3 Evaluation result at 1,000 to 100 hPa in the afternoon (05–09 UTC)

Station	r_t	r_rh	r_ws	r_wd	rmse_t	rmse_rh	rmse_ws	acc_wd4	acc_wd8	acc_wd16
Omkoi	0.9996	0.8551	0.6408	0.9233	0.90	14.93	6.82	98.85	66.62	26.62
Takhli*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pimai	0.9993	0.7301	0.8400	0.6006	1.08	17.86	6.23	70.34	47.77	24.96
Sattahip	0.9994	0.5169	0.8589	0.6731	1.00	23.01	5.30	72.00	53.05	31.30
Phanom	0.9990	0.5208	0.8370	0.7783	1.18	17.27	8.73	89.28	68.14	40.83

Takhli* does not have upper air observational data in this period.

เมื่อพิจารณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน โดยกำหนดให้ค่า r ตั้งแต่ ±0.7 ขึ้นไป แสดงว่าข้อมูลที่ทดสอบ มีความสัมพันธ์กันมาก หากค่าอยู่ระหว่าง ±0.3 ถึง ±0.7 มีความสัมพันธ์กันปานกลาง เมื่อต่ำกว่า ±0.3 แสดงว่าข้อมูลนั้น มีความสัมพันธ์กันน้อย และ 0 หมายถึง ข้อมูลที่นำมาทดสอบไม่มีความสัมพันธ์กัน (Ratner, 2009) จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีความสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์สูง ค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.99 ในทุกสถานี ทั้งในช่วงเช้าและบ่าย และค่า RMSE ของช่วงเช้ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.83–0.90 K และ 0.90–1.18 K ในช่วงบ่าย

ผลคาดการณ์ความชื้นสัมพัทธ์ช่วงเช้ามีความสัมพันธ์กับผลตรวจอากาศชั้นบนของทุกสถานีในเกณฑ์สูง และลดลงในช่วงบ่าย โดยสถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ และสถานีเรดาร์ฝนหลวงพนม มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากันที่ 0.52 อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง เมื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนพบว่าค่า RMSE ช่วงเช้าอยู่ระหว่าง 16.53–17.38% และสูงสุดที่ 23.01% ในกรณีช่วงบ่าย ผู้วิจัยจึงได้ตรวจสอบเพิ่มเติม โดยแบ่งข้อมูลตามชั้นระดับความสูงในหน่วยฟุต (ft) และวัดความคลาดเคลื่อนอีกครั้ง แสดงดัง Table 4 ผลที่ได้พบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ของผลคาดการณ์ความชื้นสัมพัทธ์ในระดับความสูงตั้งแต่ผิวพื้น (Surface) ถึง 5,000 ฟุต มีค่าเท่ากับ 11.00% และเพิ่มขึ้นในระดับชั้นที่สูงขึ้น ในช่วงความสูง 5,000–10,000 ฟุต มีค่า 12.26% ช่วง 10,000–15,000 ฟุต เท่ากับ 15.77% และ 15,000–20,000 ฟุต เป็นช่วงที่มีค่าเฉลี่ย RMSE มากที่สุด คือ 20.12%

Table 4 RMSE of Relative Humidity based on altitude

Station	Morning (00–04 UTC)				Afternoon (05–09 UTC)			
	SFC–5k ft	5k–10k ft	10k–15k ft	15k–20k ft	SFC–5k ft	5k–10k ft	10k–15k ft	15k–20k ft
Omkoi	12.16	13.06	16.37	17.23	12.23	9.02	9.31	26.55
Takhli*	10.53	12.52	16.56	16.10	-	-	-	-
Pimai	9.69	12.37	16.09	15.91	7.97	11.11	13.24	23.18
Sattahip	10.57	13.02	13.90	18.49	11.63	12.66	14.63	25.97
Phanom	11.25	13.56	13.99	17.48	12.98	13.01	27.81	20.15

Takhli* does not have upper air observational data in the afternoon.

สำหรับผลคาดการณ์ความเร็วลมพบว่ามีความสัมพันธ์กับผลตรวจอากาศชั้นบนในเกณฑ์สูง ยกเว้นสถานีพนมในช่วงเช้าและสถานีอมก๋อยในช่วงบ่ายซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ค่า RMSE ผลคาดการณ์ความเร็วลมช่วงเช้าเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 6.30 m/s และ 6.77 m/s ในช่วงบ่าย ผลการคาดการณ์ทิศทางลมพบว่าที่สถานีพนมในช่วงเช้า สถานีพิมายและสัตหีบในช่วงบ่ายมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง นอกนั้นมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์สูงทั้งหมด เมื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของทิศทางลมในกรณีที่จำแนกเป็น 4 ทิศทางหลัก พบว่าผลคาดการณ์มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า 70% ในทุกสถานีและทุกช่วงเวลา เมื่อเพิ่มจำนวนทิศทางเป็น 8 ทิศทาง ความถูกต้องแม่นยำลดลงเหลือเฉลี่ย 53.75% ในช่วงเช้า และ 58.90% ในช่วงบ่าย และลดลงอย่างมากเมื่อจำแนกเป็น 16 ทิศทาง คงเหลือเฉลี่ย 34.59% ในช่วงเช้าและ 30.93% ในช่วงบ่าย

ดัชนีเสถียรภาพอากาศและพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนจะถูกนำไปแสดงผลในรูปแบบแผนที่ เพื่อใช้ในการคาดการณ์ลักษณะสภาพอากาศ โอกาสเกิดเมฆ พายุฝนฟ้าคะนอง รวมถึง

ประกอบการตัดสินใจปฏิบัติการฝนหลวง ผลที่ได้คือข้อมูลที่มีรายละเอียดเชิงพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้น และมีข้อมูลต่อเนื่องรายชั่วโมงตลอดทั้งวัน ตัวอย่างแผนที่ข้อมูลดัชนีเสถียรภาพอากาศชั้นบน แสดงดัง Fig. 2

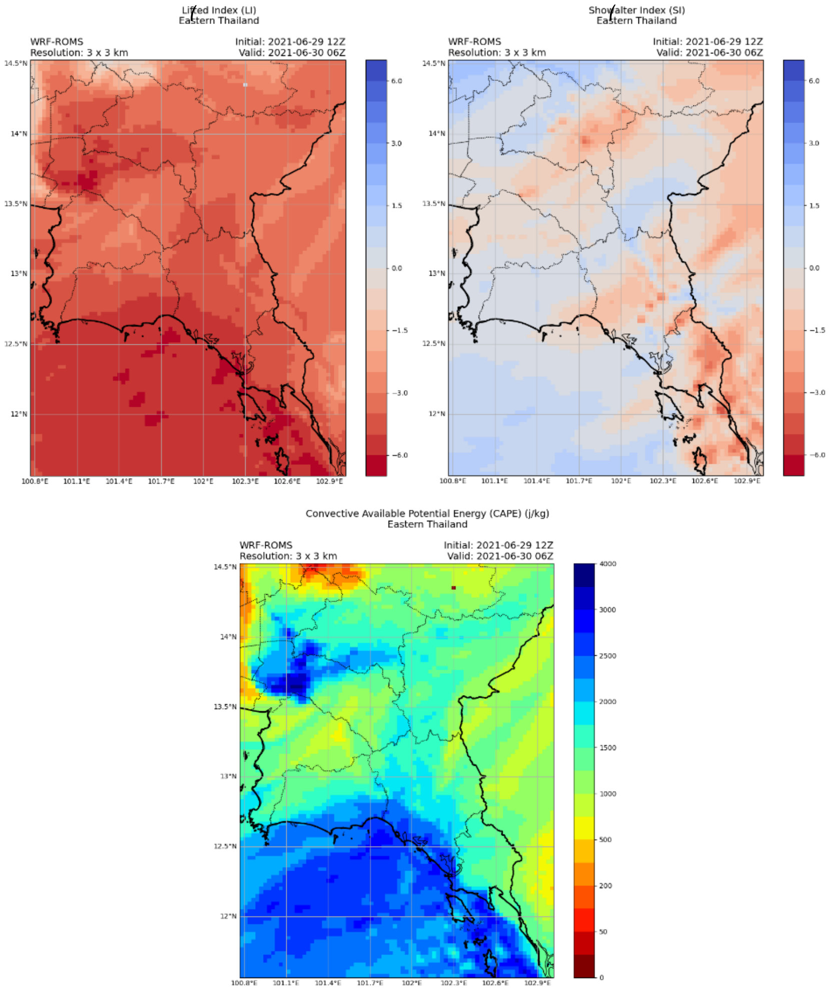


Fig. 2 Example maps of LI, SI, and CAPE on 30 June 2021 06 UTC

สรุป

จากผลประเมินประสิทธิภาพการคาดการณ์อากาศชั้นบนจากแบบจำลองคาดการณ์สภาพอากาศระยะสั้น WRF พบว่าแบบจำลองสามารถคาดการณ์อุณหภูมิได้ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดอากาศชั้นบน โดยมีค่าสหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 และค่า RMSE ระหว่าง 0.83–1.18 K กลับกันการคาดการณ์ความชื้นสัมพัทธ์แม้ว่าค่าสหสัมพันธ์ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์สูง มีเพียงสถานีสัตหีบและพนมที่ผลคาดการณ์ช่วงบ่ายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่เมื่อวิเคราะห์ค่า RMSE จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ในช่วงเช้ามีค่าระหว่าง 16.53–17.38% และในช่วงบ่าย 14.93–23.01% จึงตรวจสอบแยกตามระดับความสูงพบว่าช่วงผิวพื้นถึง 10,000 ฟุต ซึ่งเป็นระดับความสูงในการพัฒนาตัวของเมฆอุ่น มีค่า RMSE ระหว่าง 7.97–13.56% และคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ด้านผลคาดการณ์ความเร็วลมช่วงเช้าเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 6.30 m/s และ 6.77 m/s โดยที่สถานีพนม มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดทั้งในช่วงเช้าและบ่าย สำหรับทิศทางลมหากนำไปใช้คาดคะเนเพียง 4 ทิศทาง พบว่าสามารถคาดการณ์ได้ถูกต้องแม่นยำมากกว่า 70% ในทุกสถานีและทุกช่วงเวลา และลดลงเมื่อเพิ่มความละเอียดเป็น 8 ทิศทาง คงเหลือเฉลี่ย 56.04% และลดลงอย่างมากในกรณี 16 ทิศทาง ถึงแม้ผลการ

คาดการณ์ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง แต่ข้อดีของแบบจำลองคือสามารถให้รายละเอียดเชิงพื้นที่ได้ดี โดยมีความละเอียด 3×3 กิโลเมตร และความถี่เชิงเวลารายชั่วโมงครอบคลุมตลอดทั้งวัน สามารถนำไปใช้ประกอบการคาดการณ์สภาพอากาศ การเกิดเมฆ และพายุฝนฟ้าคะนองร่วมกับชุดข้อมูลอื่นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยการวิเคราะห์พื้นที่ที่มีศักยภาพต่อการดัดแปรสภาพอากาศ โดยใช้ข้อมูลจากแบบจำลองสภาพอากาศเชิงตัวเลข กรณีศึกษา: ภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และขอขอบคุณ สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลคาดการณ์อากาศชั้นบนสำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ฉันติ เดชโยธิน, ภักดี จันทร์เกษ, แทนไทร์ พลหาญ, และคณะ. 2557. การศึกษาพัฒนาระบบพยากรณ์สภาวะอากาศชั้นบนช่วยในการตัดสินใจในการปฏิบัติการฝนหลวงกรณีศึกษา: ภาคตะวันออกของประเทศไทย. กรมฝนหลวงและการบินเกษตร. กรุงเทพฯ.

ทิพย์วรรณ ทอดแสน, ไอศวรรย์ ชั้นกาญจน์, ศุจิรา กิตติราษฎร์, กนกศรี ศรินนภากร, สุรเจตส์ บุญญาอรุณเนตร. 2557. การวิเคราะห์ความแม่นยำในการคาดการณ์ปริมาณน้ำฝนระยะสั้นสำหรับประเทศไทยจากแบบจำลองสภาพอากาศ WRF. ใน: รายงานการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

รติ สว่างวัฒนไพบูลย์, สุภลักษณ์ วิมาลา, จิราววรณ คำมา, กนกศรี ศรินนภากร. 2564. การประเมินประสิทธิภาพของพารามิเตอร์คิวมูลัสจากแบบจำลองคาดการณ์สภาพอากาศระยะสั้น WRF สำหรับการคาดการณ์อากาศชั้นบน. ใน: รายงานการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, หน้า WRE–2.

Carroll, J. and Hughes, S. 2013. Using a video camera to measure the radius of the Earth Joshua. Phys. Educ. 48: 731–735. doi.org/10.1088/0031-9120/48/6/731

Gayatri, K., Sandeep, J., Murugavel, P., Chowdhuri, S., Konwar, M., Dinesh, G., Todekar, K., Bankar, S., Dixit, S.A., Malap, N., Prabhakaran, T. 2022. Evaluation of high-resolution WRF model forecasts and their use for cloud seeding decisions. J. Atmos. Sol-Terr. Phy. 228: 105825. doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105825

Hoyer, S., Hamman, J. 2017. xarray: N-D labeled Arrays and Datasets in Python. J. Open. Res. Softw. 5: 10. doi.org/10.5334/jors.148

May, R.M., Goebbert, K.H., Thielen, J.E., Leeman, J.R., Camron, M.D., Bruick, Z., Bruning, E.C., Manser, R.P., Arms, S.C., Marsh, P.T. 2022. MetPy: A meteorological python library for data analysis and visualization. Bull. Amer. Meteor. Soc. 103: E2273–E2284. doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0125.1

Ratner, B. 2009. The correlation coefficient: Its values range between +1/-1, or do they?. J. Target. Meas. Anal. Mark. 17: 139–142. doi.org/10.1057/jt.2009.5

การวิเคราะห์การปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีในดิน บริเวณเทือกเขาหินแกรนิตของจังหวัดนครศรีธรรมราช

Analytical of radioactive contamination in soil at Granite Rock Mountain area, Nakhon Si Thammarat Province

ศศิธร ทรัพยาสาร[a],**พวงทิพย์ แก้วทับทิม**[b,*]

Sasithorn Sappayasan[a], Pungtip Kaewtubtim[b,*]

[a]หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี 94000

[b]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี 94000

[a]Master of Science (Applied Physics), Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani 94000, Thailand

[b]Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani 94000, Thailand

*Corresponding auther. E-mail address: Pungtip.k@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากธรรมชาติ (^{226}Ra, ^{232}Th และ^{40}K) ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) ค่าอัตราโดสรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) และค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) ในตัวอย่างดิน 36 ตัวอย่าง ที่เก็บบริเวณเทือกเขาหินแกรนิต จังหวัดนครศรีธรรมราช ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี ด้วยหัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K อยู่ในช่วง 23.01–328.81 Bq/kg (เฉลี่ย 152.84±0.91 Bq/kg), 24.98–387.51 Bq/kg (เฉลี่ย 160.00±0.63 Bq/kg), และ 61.74–2268.78 Bq/kg (เฉลี่ย 1169.78±0.67 Bq/kg) ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดินหลายตัวอย่าง มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยจังหวัด ค่าเฉลี่ยประเทศไทย และค่าเฉลี่ยทั่วโลก สำหรับค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) เฉลี่ย 471.72±32.31 /kg ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) ค่าเฉลี่ย 1.27±0.09 ค่าอัตราโดสรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) ค่าเฉลี่ย 216.04±14.20 nGy/h ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดย UNSCEAR (2000)

คำสำคัญ: เทือกเขาหินแกรนิต, นครศรีธรรมราช, นิวไคลด์กัมมันตรังสี, หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)

Abstract

The purpose of this research were analyzed the specific activity of the natural radionuclide (^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K), the Radium equivalent activity (Ra_{eq}), the External hazard index (H_{ex}), the Gamma-absorbed dose rate (D) and the Annual external effective dose rate (E) from the 36 soil samples. They were collected at granitic rock area in Nakhon Si Thammarat Province. All samples were analyzed using gamma-ray spectrometer method with a high purity germanium detector (HPGe). The specific activity of radionuclides of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K were 23.01–328.81 Bq/kg (average 152.84±0.91 Bq/kg), 24.98–387.51 Bq/kg (average 160.00±0.63 Bq/kg), and 61.74–2268.78 Bq/kg (average 1169.78±0.67 Bq/kg). respectively. The average of natural radioactive nuclide of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K are over theThailand and the global everage value. in addition, The Radium equivalent activity (Ra_{eq}) (Average 471.72±32.31 Bq/kg), External hazard index (H_{ex}) (average 1.27±0.09) and the gamma-absorbed dose rate (D) (average 216.04±14.20 nGy/h) were higher than the UNSCEAR criterion (2000).

Keywords: Granite Rock Mountain, High purity germanium detector (HPGe), Nakhon Sri Thammarat, Radionuclide

คำนำ

ธรณีวิทยาของจังหวัดนครศรีธรรมราชประกอบด้วยเทือกเขาหินแกรนิตบริเวณตอนกลางของจังหวัด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดแร่เศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ดีบุก วุลแฟรม ฟลูออไรต์และแบไรต์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) หินแกรนิตเป็นหินอัคนีที่มีสารกัมมันตรังสีสูง (ปิยะ และคณะ, 2564) สารกัมมันตรังสีในธรรมชาติ รวมถึงดินที่เกิดจากการผุพังจากหินแกรนิตโดยสารกัมมันตรังสีเป็นสารที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสี นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่พบในธรรมชาติได้แก่ ^{238}U ^{232}Th และ ^{40}K (Wang et al., 2017) สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการสัมผัส การหายใจ การดื่ม และการกิน (FAO, 1986; Avwiri et al., 2021a; Absar et al., 2021b) การได้รับกัมมันตภาพรังสีเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย อาทิโรคมะเร็งของอวัยวะหลายอย่าง เช่น กระดูก ปอด เต้านม และต่อมไทรอยด์ เป็นต้น (สุพิชชา และคณะ, 2562; Yang and Sun., 2022) การประเมินความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสภาพแวดล้อมได้แก่ ดิน น้ำ พืช มีประโยชน์ในการติดตามปัญหาสุขภาพ นักวิทยาศาสตร์จากต่างประเทศเช่น อิรัก จีน อินเดีย ไนจีเรีย รวมทั้งประเทศไทยให้ความสนใจในการประเมินระดับสารกัมมันตรังสีจากธรรมชาติ ในตัวอย่างดิน เช่น ตัวอย่างดิน ในจังหวัดนครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา กระบี่ นราธิวาส ปัตตานี (ปรีดา, 2549ก; กนกพร, 2549ข; ศุภวุฒิ, 2550; ประสงค์ และคณะ, 2557; ณัฐชยา และคณะ ,2559; อดุลย์สมาน และคณะ, 2561) อีกทั้งยังมีการศึกษาตัวอย่างดินจากบริเวณหินแกรนิตบริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราช (ปรีดา,2549)จากการศึกษาในตัวอย่างดินดังกล่าว มีทั้งอยู่ในเกณฑ์ปกติ สูงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัย (370 Bq/kg) และสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก 57 nGy/h (UNSCEAR, 2000) และงานวิจัยของประเทศจีนการประเมินกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติและปริมาณรังสีในดินผิวดินจากมณฑลกวางตุ้ง ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีรังสีพื้นหลังสูงในจีนพบว่าดินที่เกิดจากหินแกรนิตจะมีปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีสูงกว่าบริเวณอื่น แต่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ที่อาศัย(Yang and Sun., 2022)

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการประเมินระดับสารกัมมันตรังสีจากธรรมชาติถือเป็นสิ่งสำคัญ เพราะส่งผลกระทบต่อสุขภาพกระทบต่อสุภาพของประชาชนในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะบริเวณเทือกเขาหินแกรนิต จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีสารกัมมันตรังสีสูง ประชาชนอาศัยอยู่จำนวนมาก มีการสัมผัสสารกัมมันตรังสีจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และบริโภคพืชผลทางการเกษตรที่มีการดูดซับสารกัมมันตรังสีโดยระบบรากของพืชส่งต่อกันเป็นห่วงโซ่อาหารเข้าสู่ร่างกาย หากได้รับในปริมาณมาก และเป็นระยะเวลานาน อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาระดับและประเมินผลกระทบของสารกัมมันตรังสีจากธรรมชาติ โดยศึกษาความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{226}Ra, ^{232}Th และ^{40}K ในตัวอย่างดิน และประเมินดัชนีความเป็นอันตรายจากสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินบริเวณเทือกเขาหินแกรนิต จังหวัดนครศรีธรรมราช

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ และเครื่องมือ

อุปกรณ์ และเครื่องมือ ที่ใช้ได้แก่ ที่ตักดิน ถุงใส่ตัวอย่าง ตู้อบตัวอย่าง โกร่งบดสาร ตะแกรงร่อน ขนาด 120 µm เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 g E-Scale รุ่น HG-6001N กระปุกพลาสติกใสทรงกระบอกสำหรับใส่ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.2 cm สูง 7.5 cm สำหรับบรรจุตัวอย่างดิน เทปกาวพันสายไฟสีดำสำหรับพันกระปุกพลาสติกสารกัมมันตรังสีรังสีมาตรฐานในรูปของแข็ง (Point source) ^{137}Cs และ ^{60}Co สารกัมมันตรังสีมาตรฐานดิน IAEA-375 และเครื่องวัดรังสีแกมมา ด้วยหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนเก็บตัวอย่างดิน บริเวณเทือกเขาหินแกรนิต และใกล้เคียง

เก็บตัวอย่างดิน ในอำเภอที่มีหินแกรนิต 10 อำเภอ ได้แก่ พิปูน สิชล นบพิตำ พรหมคีรี ลานสกา ร่อนพิบูลย์ นาบอน ช้างกลาง ฉวาง เมือง ท่าศาลา และอำเภอใกล้เคียงกับอำเภอที่มีเทือกเขาหินแกรนิตอีก 2 อำเภอ ได้แก่ ขนอม ถ้ำพรรณรา สุ่มเก็บตัวอย่างอำเภอละ 3 ตำบลยกเว้นอำเภอนบพิตำเก็บได้ 1 ตำบล อำเภอท่าศาลา 4 ตำบล อำเภอลานสกาและอำเภอพรหมคีรีเก็บได้ 2 ตำบล โดยกำหนดตัวอย่างดินไว้ที่ 36 ตัวอย่าง โดยใช้วิธีการเก็บตัวอย่างดินของกรมวิชาการเกษตร (2563) ทำความสะอาดพื้นผิวแล้วขุดดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างดินใส่ลงในถุงซิปล็อคสำหรับใส่ตัวอย่างและติด Label สำหรับบันทึกข้อมูลตัวอย่าง บันทึกพิกัดจุดเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องระบุตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์ (Global Positioning Satellite; GPS)

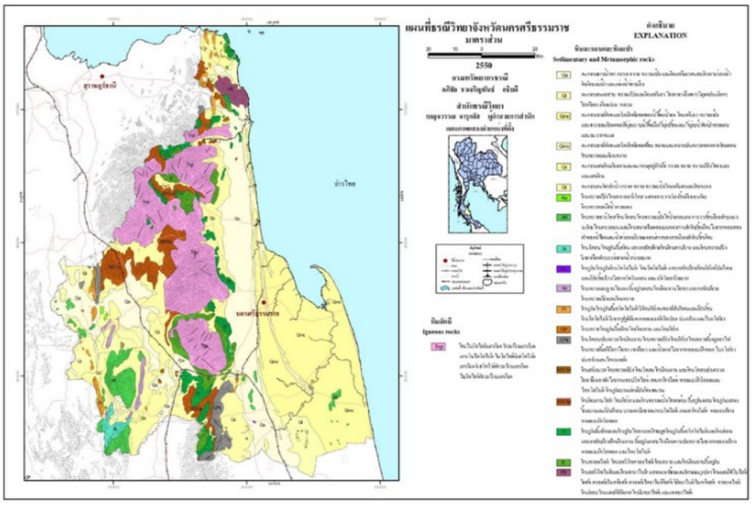


Fig. 1 Geologic map of Nakhon Si Thammarat Province

Fig. 2 The sampling location

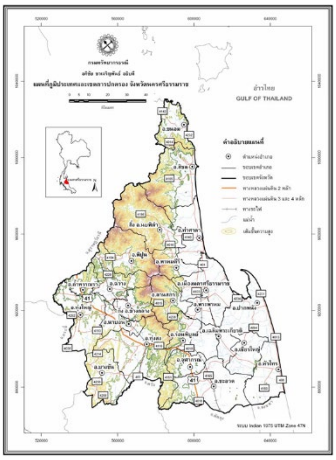


Fig. 3 Nakhon Si Thammarat, Province topographic map

ขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างดินใส่ถาดแล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 ^{o}C โดยใช้เวลา ในการอบ 6–8 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่าง บดดินด้วยโกร่งบดสาร แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 120 µm บรรจุตัวอย่างที่บดและร่อนอย่างละเอียดในกระปุกพลาสติกใส ปิดฝากระปุกให้สนิทโดยใช้เทปพันสายไฟพันรอบรอยต่อระหว่างฝากับตัวกระปุก จำนวน 4 รอบ ชั่งมวลตัวอย่างดินขนาด 314.5 กรัม เพื่อให้มีขนาดเท่ากับสารมาตรฐานดิน IAEA-375 ติด Label และบันทึกข้อมูลตัวอย่าง เก็บตัวอย่างที่บรรจุและชั่งมวลเรียบร้อยตั้งทิ้งไว้ในห้องทดลอง 1 เดือน เพื่อให้ตัวอย่างเข้าสู่สภาวะสมดุลทางรังสี อย่างถาวร (Secular equilibrium)

ขั้นตอนการวัดความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K การวิเคราะห์ข้อมูลค่าที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายต่างๆ

นำกระปุกพลาสติกใสสำหรับใส่ตัวอย่างดิน มาตรวจวัดหารังสีภูมิหลัง (Background Radiation) และนำตัวอย่างดิน ที่วางทิ้งไว้ครบ 1 เดือน มาวัดปริมาณสารกัมมันตรังสีของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K โดยใช้เครื่องวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ใช้เวลาในการวัดรังสีตัวอย่างละ 18,000 s ตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีของสารมาตรฐาน IAEA-375 สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างดิน โดยใช้เวลาตรวจวัด 5 h บันทึกจำนวนนับใต้สเปกตรัมของ ^{226}Ra ที่พลังงาน 295.19 keV, และ 911.21 keV, ^{137}Cs ที่พลังงาน 661.66 keV, ^{40}K ที่พลังงาน 1,460.26 keV และ ^{234}U ที่พลังงาน 2,614.53 keV. คำนวณหาค่าปริมาณสารกัมมันตรังสีของสารมาตรฐาน ตาม Equation 1:

$$C_r = \frac{A}{E_{ff} \times T \times P \times W} \quad (1)$$

เมื่อ	C_r	คือ	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างดิน (Bq/kg)
	A	คือ	อัตรานับสุทธิ (Peak Area/Counting Time)
	Eff	คือ	ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี (cps/Bq)
	T	คือ	เวลาที่นับวัด (s)
	P	คือ	ค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีรังสีแกมมาออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (%yield)
	W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ทำการที่วัดรังสี (kg)

นำค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดิน ที่ตรวจวัดได้นี้มาคำนวณหาค่าที่บ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Radium equivalent activity, Ra_{eq}) Equation 2 ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย (H_{ex}) Equation 3 อัตราโดสรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed dose rates in air, D) Equation 4 และปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (Annual external effective dose rate, E) Equation 5 เพื่อทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน (UNSCEAR, 2000)

$$Ra_{eq}\left(Bq/kg\right) = C_{Ra\text{-}226} + 1.43C_{Th\text{-}232} + 0.077C_{K\text{-}40} \quad (2)$$

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra\text{-}226}}{370} + \frac{C_{Th\text{-}232}}{259} + \frac{C_{K\text{-}40}}{4810} \quad (3)$$

$$D\ (nGy/hr) = 0.461C_{Ra\text{-}226} + 0.604C_{Th\text{-}232} + 0.0417C_{K\text{-}40} \quad (4)$$

$$E\left(mSv/y\right) = D\ \left(nGy/hr\right) x\ 8760\left(h\right)\ x\ 0.2\ x\ 0.7\left(Sv/Gy\right)\ x\ 10^{-6} \quad (5)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการวัดความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{226}Ra, ^{232}Th และ ^{40}K ในบริเวณเทือกเขาหินแกรนิต จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{226}Ra ^{232}Th และ ^{40}K อยู่ในช่วง 84.51–266.32 Bq/kg (ค่าเฉลี่ย 152.84±0.91 Bq/kg), 64.11–315.55 Bq/kg (ค่าเฉลี่ย 160.0±0.63 Bq/kg), และ 1169.78±0.67Bq/kg (ค่าเฉลี่ย 1169.78±0.67 Bq/kg) ตามลำดับ อำเภอลานสกา อำเภอฉวาง อำเภอพิปูน อำเภอนบพิตำและอำเภอสิชล มีค่ากัมมันตรังสีสูงกว่าค่าเฉลี่ยภาคใต้ เนื่องจากอยู่ในพื้นที่ภูเขาหินแกรนิต ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยในประเทศและค่าเฉลี่ยทั่วโลก มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยภาคใต้ยกเว้น ^{40}K ดังแสดงใน Table 1 ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) (ค่าเฉลี่ย 471.72±32.31Bq/kg) ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย (H_{ex})(ค่าเฉลี่ย 1.27±0.09 ค่าอัตราโดสรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) (ค่าเฉลี่ย 216.04±14.20 nGy/h) ค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) (ค่าเฉลี่ย 0.26±0.02 nGy/h) สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดย UNSCEAR (2000) ดังแสดงใน Table 2

Table 1 Specific Gamma-Ray Activity of ^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{40}K and their concentration in 36 rock samples from Granite Rock Mountain area,Nakhon Sri Thammarat Province

Sample	Specific Activities (Bq/kg)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Muaeng	117.26±0.83	132.68±0.58	835.30±0.77
Chawang	266.32±1.24	197.05±0.71	1566.35±1.00
Thasala	169.96±0.99	156.84±0.64	1449.42±0.97
changklang	164.00±0.93	210.51±0.69	1225.06±0.85
Thampannara	58.21±0.59	64.11±0.43	311.88±0.54
Lansaka	226.37±1.15	315.55±0.89	2107.60±1.15
Promkiri	123.94±0.84	145.5±0.61	1223.58±0.90
Phipun	213.39±1.07	138.28±0.60	1465.69±0.96
Ronpiboon	91.16±0.74	154.93±0.64	844.97±0.78
Nabon	96.03±0.71	112.99±0.52	285.63±0.51
Sichon	209.92±1.09	204.59±0.73	1616.56±1.02
Khanom	84.51±0.71	130.13±0.59	1239.32±0.89
Nopphitam	219.33±1.13	197.46±0.71	2237.77±1.19
Range	84.51–266.32	64.11–315.55	285.63–2237.77
Average	152.84±0.91	160.00±0.63	1169.78±0.67
Nakhon sri Thammarat (ปรีดา,2549)	96.00±18.00	88.00±23.00	524.00±127.00
Southern Thailand Data (OAP, 2002)	171.55±3.13	211.19±1.98	511.04±7.04
Thailand Data (OAP, 2002)	48	40	400
Worldwide Mean Worldwide mean (UNSCEAR, 2000)	35	30	400

Table 2 the Radium equivalent activity (Ra_{eq}), the External hazard index (H_{ex}), the Gamma-absorbed dose rate (D) and the Annual external effective dose rate (E) in the 36 soil samples from at Granite Rock Mountain area,Nakhon Sri Thammarat Province

Sample	Ra_{eq}	H_{ex}	D	E
Muaeng	371.31±29.55	169.15±12.98	1.00±0.08	0.21±0.02
Chawang	668.71±39.76	307.37±17.56	1.81±0.11	0.38±0.02
Thasala	505.84±34.27	233.69±15.13	1.37±0.09	0.29±0.02
changklang	559.35±34.11	254.00±14.94	1.51±0.09	0.31±0.02
Thampannara	173.90±20.49	78.62±8.97	0.47±0.05	0.10 ± 0.01
Lansaka	839.89±44.61	383.06±19.56	2.27±0.12	0.47±0.02
Promkiri	426.22±31.16	196.17±13.71	1.15±0.08	0.24±0.02
Phipun	523.99±34.09	243.23±15.09	1.42±0.09	0.30±0.02
Ronpiboon	377.77±30.02	170.93±13.11	1.02±0.08	0.21±0.02
Nabon	279.59±24.87	124.52±10.82	0.76±0.07	0.15±0.01
Sichon	626.96±38.35	287.96±16.89	1.69±0.10	0.35±0.02
Khanom	366.02±28.52	169.32±12.53	0.99±0.08	0.21±0.02
Nopphitam	674.00±39.11	313.91±17.30	1.82±0.10	0.38±0.02
Sample	**Ra (eq)**	**D(nGy/h)**	**H_{ex}**	**E (mSv/y)**
Average	471.72±32.31	216.04±14.20	1.27±0.09	0.26±0.02
Nakhon sri Thammarat (ปรีดา,2549)	261±51	119±23	-	0.15±0.03
Thailand Data (OAP, 2002)	512.90±6.50	231.81±2.97	1.39±0.02	0.28±0.02
เกณฑ์มาตรฐาน (UNSCEAR, 2000)	370	55	1	0.48

สรุป

จากค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินหลายอำเภอได้แก่อำเภอลานสกา อำเภอฉวาง อำเภอพิปูน อำเภอนบพิตำและอำเภอสิชล สูงกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศไทย และค่าเฉลี่ยทั่วโลก สามารถสรุปได้ว่าดินบริเวณเทือกเขาหินแกรนิต จังหวัดนครศรีธรรมราช มีปริมาณรังสีอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดย UNSCEAR (2000) อาจส่งผลต่อสุขภาพของประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณดังกล่าว ดังนั้นควรมีการประเมินและติดตามปริมาณกัมมันตภาพรังสีบริเวณดังกล่าวต่อไปอย่างต่อเนื่องเพื่อประเมินถึงผลความเสี่ยงจากการได้รับรังสีในระยะยาว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์ฟิสิกส์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ผล และขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ให้ความอนุเคราะห์สารมาตรฐาน

เอกสารอ้างอิง

กนกพร นามโชติ. 2549. กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดพัทลุง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กรมทรัพยากรธรณี. 2550. การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณีจังหวัดนครศรีธรรมราช. กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ห้างหุ้นส่วนจำกัด ไอเดีย สแควร์, กรุงเทพมหานคร, หน้า 22–23.

กรมวิชาการเกษตร. 2563. วิธีการเก็บตัวอย่างดินที่ถูกต้องเพื่อการวิเคราะห์. https://www.doa.go.th/hort/wp-content/uploads/2020/01.pdf, 1 พฤษภาคม 2565.

ปิยะ ผ่านศึก, สุนารี บดีพงศ์, มูบารัค เล็กเกลี้ยง. 2564. การประเมินนิวไคลด์กัมมันตรังสี (226Ra, 232Th และ 40K) ในดิน บริเวณเทือกเขาหินแกรนิต อำเภอเกาะพะงัน จังหวัดสุราษฎร์ธานี. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports (AJSTR). 24(1), 15–22.

ประสงค์ เกษราธิคุณ, ฤทัยรัตน์ บุญครองชีพ, ศุภวุฒิ เบ็ญจกุล, สุชิน อุดมสมพร, บูคอรี แวอุมา, จุฑาภรณ์ สุวลักษณ์, กุลญาณี มามะ. 2557. การประเมินความเป็นอันตรายทางรังสีและแผนภาพทางรังสีในตัวอย่าง ดินผิวหน้า บริเวณจังหวัดกระบี่ ประเทศไทย. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 17(3): 221–229.

ปรีดา นวลจริง. 2549. กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศุภวุฒิ เบ็ญจกุล. 2550. การประเมินค่ากัมมันตภาพรังสีเชิงปริมาณบริเวณเขตเทศบาล อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยทักษิณ.

สุพิชชา จันทรโยธา, ชุติมา กรานรอด, รวิวรรณ กฤษณานุวัตร์, ธาริกา ธรรมวิจิตร, สมพงษ์ ศรีบุรี, ยุทธนา ตุ้มน้อย. 2562. ปริมาณรังสีตามธรรมชาติในยาสมุนไพรไทย (เฟส 2). สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สกว.). ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 3.

อดุลย์สมาน สุขแก้ว, ไมมูน อินตัน, ไซนับ ดอเลาะ. 2561. การแจกแจงความถี่ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติบริเวณทรายชายหาดตะโละสะมิแล จังหวัดปัตตานี. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง. 3(2): 1–6.

Absar, N., Abedin, J., Rahman, M.M., Miah, M.H., Siddique, N., Kamal, M., Chowdhury, M.I., Sulieman, A.A.M., Faruque, M.R.I., Khandaker, M.U., Bradley, D.A., Alsubaie, A. 2021. Radionuclides transfer from soil to tea leaves and estimation of committed effective dose to the Bangladesh Populace. Life 2021 11: 282. doi.org/10.3390/life11040282

Avwiri, G.O., Ononugbo C.P., Olasoji, J.M. 2021. Radionuclide transfer factors of staple foods and its health risks in Niger Delta Region of Nigeria. International Journal of Innovative Environmental Studies Research. 9(1): 21–32.

International Atomic Energy Agency (IAEA).1989. Measurement of radionuclides in food and the environment. Technical Report Series No. 295. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.

Nasim-Akhtar, Tufail, M., Hussain, M.Y., Akram, M. 2011. Short communication: primordial radionuclides contamination level in fertilized farms soils of Faisalabad-Pakistan. Soil and Environment 30(1): 88–94.

Nualchavee, R. 2002. Nuclear science. Kasetsart University Press. Bangkok, Thailand.

Office of Atoms for Peace (OAP). 2002. Annual report in Southern Region of Thailand. Ministry of Science and Technology, Thailand.

Office of Atoms for Peace (OAP). 2002. Annual report in Thailand. Ministry of Science and Technology, Thailand.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2000. Sources, effects, and risk of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, NY.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000. Sources and effects of ionizing radiation UNSCEAR 2000 Report to the general assembly, with scientific annexes. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, NY.

Wang, J., Du, J., Bi, Q. 2017. Natural radioactivity assessment of surface sediments in the Yangtze Estuary. Marine Pollution Bulletin 114(1): 602–608.

Yang, J., Sun. 2022. Natural radioactivity and dose assessment in surface soil from Guangdong, a high background radiation province in China. Guangdong. pp. 145–151.

การศึกษาความชุกในการสูญเสียการได้ยินของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป จังหวัดพังงา

Study of noise induced hearing loss prevalence rate among workers in the rubber wood processing process, Phang Nga Province

เกศศิริ สมาพงค์[a], **จันจิรา มหาบุญ**[b,*]

Katesiri Samaphong [a], Junjira Mahaboon[b,*]

[a]หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและสุขภาพ) มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ นครศรีธรรมราช 80160

[b]สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ นครศรีธรรมราช 80160

[a]Master of Science Program (Environmental Safety Technology and Health), Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

[b]School of Public Health, Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: hjunjira@wu.ac.th

บทคัดย่อ

เสียงเป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญประการหนึ่งที่เป็นสาเหตุของการสูญเสียการได้ยินของผู้ปฏิบัติงาน อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องอาศัยเครื่องเลื่อยสายพานที่ช่วยในการตัดไม้ โดยมีระดับเสียงเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชม./วัน มากกว่า 85 dB(A) การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงสำรวจ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความชุกของการสูญเสียการได้ยินของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป กลุ่มตัวอย่างเป็นพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป 40 คน เก็บข้อมูลโดยการตรวจสมรรถภาพการได้ยินด้วยเครื่องตรวจสมรรถภาพการได้ยิน (audiometer) และเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ใช้สถิติวิเคราะห์เชิงพรรณนา ผลการศึกษาพบ การสูญเสียการได้ยินที่ผิดปกติจำนวน 28 คน คิดเป็นร้อยละ 70 ดังนั้นควรมีการเฝ้าระวังการสูญเสียการได้ยินจากเสียงดังในพนักงานที่สัมผัสเสียงดัง และควรดำเนินโครงการอนุรักษ์การได้ยินอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียการได้ยินของพนักงาน

คำสำคัญ: การตรวจสมรรถภาพการได้ยิน, การสูญเสียการได้ยิน, โรงงานแปรรูปไม้ยางพารา

Abstract

Noise is one of the major risk factors for noise induced hearing loss in workers. The rubber wood processing plant is an industry that relies on band saw in the wood cutting process. A time-weighted average over an 8-hour working day was over 85 dB(A). Therefore, it is one of the industries that pose risk for workers. The purpose of this study was to evaluate the prevalence of noise induced hearing loss among workers in the rubber wood processing process. This study used a survey method. The sample consisted of 40 workers. Data were collected by audiometric test with an audiometer in the soundproof booth. Data were also collected using a questionnaire developed by the researcher. Descriptive statistics were employed to analyses the data. The study found abnormal hearing loss in 28 workers, representing 70%. Therefore, there should be surveillance of noise induced hearing loss program. Employers must implement Hearing Conservation measures for prevent noise induce hearing loss among workers.

Keywords: Audiometric test, Noise induced hearing loss, Rubber wood processing plant

คำนำ

โรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดัง (Noise-induced hearing loss) เป็นการเสื่อมของประสาทหูอันเนื่องมาจากการสัมผัสกับเสียงดังที่เกิดจากการประกอบอาชีพเป็นสาเหตุที่พบได้บ่อยในพนักงานโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเสียงดัง (อริสรา และคณะ, 2559) ซึ่งโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดังเป็นสาเหตุสำคัญของการไร้สมรรถภาพ และเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นชัดเจนในสังคม ส่งผลให้คุณภาพชีวิตของผู้ที่เกิดภาวะดังกล่าวแย่ลง และจัดเป็นปัญหาสุขภาพที่สำคัญที่เกิดจากการประกอบอาชีพ (อุไรวรรณ และคณะ, 2561) มีการประมาณการการเจ็บป่วยของโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดังที่มีสาเหตุจากการประกอบอาชีพโดยรวมแล้วความชุกของการเกิดโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดังที่มีสาเหตุจากการประกอบอาชีพโดยทั่วไปจะสูงในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา (Chen et al., 2020) จากข้อมูลองค์การอนามัยโลกปี 2560 ประมาณการว่าในปัจจุบันมี 466 ล้านคนทั่วโลกสูญเสียการได้ยิน (6.1% ของประชากรโลก) 432 ล้านคน (93%) เป็นผู้ใหญ่ (ผู้ชาย 242 ล้านคน ผู้หญิง 190 ล้านคน) 34 ล้านคน (7%) เป็นเด็กมีการสูญเสียการได้ยินในระดับปานกลางถึงรุนแรง ส่วนในประเทศไทยข้อมูลจากสถิติโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2559 พบผู้สูญเสียการได้ยินเนื่องจากการสัมผัสเสียงดังคิดเป็นอัตราป่วยต่อแสนรายเท่ากับ 101.49 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2558 (อัตราป่วย 81.48) และในปี พ.ศ. 2560 อัตราป่วยของโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดัง มีแนวโน้มที่ดีขึ้นพบผู้สูญเสียการได้ยินคิดเป็นอัตราป่วยต่อประชากรแสนราย เท่ากับร้อยละ 71.29 (สำนักงานโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2560)

ในประเทศสหรัฐอเมริกาข้อกฎหมายที่กำหนดโดยองค์กร Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 1983) ได้กำหนดไว้ว่าคนงานที่สัมผัสเสียงเฉลี่ย 8-hr TWA ตั้งแต่ 85 dBA ขึ้นไปจะต้องเข้าร่วมโครงการอนุรักษ์การได้ยินที่สถานประกอบการจัดขึ้น โดยข้อกฎหมายที่กำหนดให้คนงานทุกคนที่สัมผัสเสียงเฉลี่ย 8-hr TWA ตั้งแต่ 85 dBA ขึ้นไปเข้าร่วมโครงการอนุรักษ์การได้ยินนี้ตรงกันกับคำแนะนำที่เสนอโดยองค์กร National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 1998) สำหรับประเทศไทยได้มีกฎหมายกำหนดให้สถานประกอบการที่มีคนงานที่มีความเสี่ยงจัดทำโครงการอนุรักษ์การได้ยินเช่นกัน คือ ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการจัดทำมาตรการ อนุรักษ์การได้ยินในสถานประกอบกิจการ พ.ศ. 2561 กฎหมายฉบับนี้กำหนดให้คนทำงานที่สัมผัสเสียงดังเฉลี่ย 8-hr TWA ตั้งแต่ 85 dBA ขึ้นไปทุกคนจะต้องเข้าร่วมโครงการอนุรักษ์การได้ยินที่สถานประกอบการจัดขึ้น เช่นเดียวกับกฎหมายของประเทศสหรัฐอเมริกาที่กำหนดโดยองค์กร Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 1983) ซึ่งการตรวจสมรรถภาพการได้ยินในงานอาชีวอนามัยนั้น เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการจัดทำโครงการอนุรักษ์การได้ยินภายในสถานประกอบการ เพื่อป้องกันไม่ให้คนงานที่มีความเสี่ยงเกิดโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดังขึ้นได้ (มูลนิธิสัมมาอาชีวะ, 2561)

นอกจากนี้อุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูปเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจในประเทศซึ่งส่วนใหญ่ตั้งอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย อีกทั้งอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรคือ เครื่องเลื่อยสายพานช่วยในการทำงานทำให้เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่เสี่ยงต่อการสัมผัสเสียงดัง จากการประเมินระดับความดังเสียงในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราพบว่า มีระดับเสียงเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน มากกว่า 85 dB(A) ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานกำหนด (พีระ, 2550; อริสรา และคณะ, 2559; อุไรวรรณ และคณะ, 2561) ส่งผลให้พนักงานเหล่านี้ต้องเผชิญกับปัจจัยเสี่ยงต่ออันตรายในสภาพแวดล้อมการทำงานจากเสียงดังที่มีแหล่งกำเนิดจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นผลให้พนักงานมีโอกาสเกิดโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดัง จากการศึกษาการสัมผัสเสียงรบกวนจากการทำงานและการสูญเสียการได้ยินของคนงานโรงเลื่อยในภาคใต้ของประเทศไทย ในคนงานทั้งหมด 184 คน พบว่า ความชุกของการสูญเสียการได้ยินในคนงานโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เท่ากับร้อยละ 22.8 หรือเท่ากับ 42 คน (Thepaksorn et al., 2019) จากการศึกษาสถานการณ์การสูญเสียการได้ยินในโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช ในคนงานทั้งหมด 46 คน พบ ความชุกของการสูญเสียการได้ยินในคนงานโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เท่ากับร้อยละ 43.48 หรือเท่ากับ 20 คน (พีระ, 2550) และจากการศึกษาการสูญเสียการได้ยินของพนักงานชาวเมียนมาที่สัมผัสเสียงดังในโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา จังหวัดนครศรีธรรมราช ในคนงานทั้งหมด 92 คน พบ ความชุกของการสูญเสียการได้ยินในคนงานโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เท่ากับร้อยละ 64.1 หรือเท่ากับ 59 คน (อุไรวรรณ และคณะ, 2561) ซึ่งถือว่าโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดังเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นโรคที่ไม่สามารถรักษาได้ และการป้องกันโรคจึงมีความสำคัญในการช่วยลดอัตราป่วยของโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดัง ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาความชุกของการสูญเสียการได้ยินของพนักงานที่สัมผัสเสียงดังจากการทำงานใน

โรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเป็นพื้นฐานให้แก่ผู้ประกอบกิจการได้พิจารณากำหนดนโยบายหรือแนวทางในการควบคุมป้องกันปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้น รวมถึงให้พนักงานเกิดความตระหนักและเห็นความสำคัญในการใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล

วิธีการวิจัย

เป็นการวิจัยเชิงสำรวจแบบภาคตัดขวาง (Survey Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความชุกของการสูญเสียการได้ยินของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ พนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป ในโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราแห่งหนึ่งที่จังหวัดพังงา จำนวนพนักงานทั้งหมด 88 คน คำนวณจำนวนกลุ่มตัวอย่างสูตรของทาโรยามาเน ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ความคลาดเคลื่อนในการสุ่ม 5% ขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณเท่ากับ 73 คน โดยมีผู้เข้าร่วมการศึกษาจำนวน 40 คน เป็นการเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยพิจารณาตามเกณฑ์การคัดเข้าและคัดออกกลุ่มตัวอย่าง

เกณฑ์การคัดเข้าคือ 1) ช่วงอายุ 18–60 ปี 2) ไม่เคยมีประวัติได้รับการผ่าตัดบริเวณหูมาก่อน 3) ไม่เคยมีประวัติได้รับอุบัติเหตุรุนแรงบริเวณหูมาก่อน 4) พนักงานที่ทำงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป 5) พนักงานที่สามารถอ่านภาษาไทยได้ 6) พนักงานที่ยินดีเข้าร่วมการศึกษา

เกณฑ์การคัดออกกลุ่มตัวอย่างคือ 1) เป็นผู้ที่ลาออกระหว่างการเก็บข้อมูล 2) พนักงานที่ไม่สามารถอ่านและเขียนหนังสือได้

เครื่องมือและการเก็บรวมรวมข้อมูล

1. เก็บข้อมูลแบบสอบถาม โดยใช้แบบสอบถามที่ได้จากการพัฒนาขึ้นและการทบทวนวรรณกรรม และหาความสอดคล้องของวัตถุประสงค์และเนื้อหา (Index of Item-Objective Congruence; IOC) โดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ได้ค่า IOC เท่ากับ 0.8 ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 ข้อมูลส่วนบุคคล ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา สัญชาติ รายได้เฉลี่ย ตำแหน่งงาน ระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน อายุการทำงาน ประวัติการทำงานในอดีต ประวัติเกี่ยวกับหู ประวัติอาการ/อาการแสดงที่เกี่ยวกับหู ส่วนที่ 2 ความคิดเห็นเกี่ยวกับการตรวจสมรรถภาพการได้ยิน ส่วนที่ 3 ความคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะเพิ่มเติม และตรวจสอบ (Tried-out) กับกลุ่มตัวอย่างที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างที่เก็บจริงจำนวน 30 คน ซึ่งค่าความเชื่อมั่นที่ได้เท่ากับ 0.941 เก็บข้อมูลแบบโดยให้ผู้เข้าร่วมตอบแบบสอบถามข้อมูลส่วนบุคคล โดยตอบแบบสอบถามด้วยตัวเอง

2. เครื่องตรวจสมรรถภาพการได้ยินโดยใช้ Audiometer ผ่านการรับรองมาตรฐานจากองค์กรกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างประเทศ (International Electronical Commission; I.E.C) จากบริษัท และมาตรฐานตาม American National Standards Institute (ANSI) S3.6-1996 เป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการปล่อยเสียงบริสุทธิ์ (Pure tone) มีการสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือ (calibration) ก่อนใช้งานทำการสอบเทียบขั้นพื้นฐาน Function check และ Biological check ทั้งนี้ก่อนการทดสอบการตรวจสมรรถภาพการได้ยินได้มีการตรวจคุณภาพของพื้นที่ตรวจสมรรถภาพการได้ยินโดยตรวจวัดระดับเสียงในพื้นที่การตรวจ (Background noise) ซึ่งต้องเป็นไปตามระดับเสียงสูงสุดภายในห้องตรวจการได้ยินที่ยอมรับได้ที่กำหนดโดย OSHA โดยใช้เครื่องวัดเสียง (Sound level meter: Type 2) มาตรฐานตาม IEC 61252 และทำการสอบเทียบความถูกต้อง (Calibration) ด้วยอุปกรณ์ตรวจสอบความถูกต้อง (Noise Calibrator) ที่ได้มาตรฐาน IEC 60942 ก่อนการใช้งานทุกครั้ง

Table 1 Noise level for each frequency in the soundproof booth (background noise)

Frequency (Hz)	500	1000	2000	4000	8000
Noise level standard (dB) of OSHA 1983	40	40	47	57	62
Soundproof booth	31.4	33.5	37.1	39.0	40.1

โดยผู้วิจัยได้มีการอธิบายขั้นตอนการตรวจสมรรถภาพการได้ยินให้แก่ผู้เข้าร่วมการศึกษา ในการอธิบายกระบวนการตรวจผู้วิจัยจะสาธิตวิธีการตรวจให้ผู้เข้าร่วมได้ดูในระหว่างนั่งรอทำการตรวจ เพื่อเป็นการช่วยให้ผู้เข้ารับการ

ตรวจเกิดความเข้าใจในกระบวนการตรวจมากยิ่งขึ้น และทำการตรวจสมรรถภาพการได้ยินพนักงานก่อนการทำงานแต่ละวันที่ไม่สัมผัสเสียงดังก่อนการตรวจอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ในตู้ตรวจวัดสมรรถภาพการได้ยิน ทำการตรวจสมรรถภาพการได้ยินโดยใช้การปล่อยสัญญาณเสียงบริสุทธิ์ (Pure tone) โดยการนำเสียงผ่านทางอากาศ (Air conduction) จากเครื่องตรวจสมรรถภาพการได้ยินมาตรฐาน (audiometer) ในตู้ตรวจวัดสมรรถภาพการได้ยินด้วยหูฟัง Audiometry headphones; Audiocups ที่ความถี่ 250, 500 1,000 2,000 4,000 และ 8,000 เฮิรตซ์ (Hertz) การแปลผลการตรวจสมรรถภาพการได้ยิน โดยจำแนกตามแนวทางการตรวจคัดกรองสมรรถภาพการได้ยินและการแปลผล (ฉบับปรับปรุงปี 2560) สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม ซึ่งแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ ระดับการได้ยินที่ปกติและระดับการได้ยินที่ผิดปกติ โดยใช้เกณฑ์ที่ระกับการได้ยินที่ 25 dB HL ที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งของหูข้างใดก็ตาม หากมีค่าน้อยกว่า 25 dB HL แสดงว่ามีระดับการได้ยินที่ปกติ แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 25 dB HL แสดงว่าระดับการได้ยินผิดปกติโดยไม่ต้องแบ่งระดับความรุนแรง (Severity) ของระดับการได้ยินที่ลดลง (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2560; กนกวรรณ และคณะ, 2563)

การวิเคราะห์ข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปด้วยสถิติเชิงพรรณนา ค่าเฉลี่ย(Mean) จำนวน (number) ร้อยละ (Percentage) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

การพิทักษ์สิทธิกลุ่มตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการขอจริยธรรมในมนุษย์ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช จากคณะกรรมการจริยธรรมในงานวิจัยในมนุษย์มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ตามหมายเลขรับรองเลขที่ (WUEC-22-198-01) เพื่อเป็นการพิทักษ์สิทธิ์ด้านจริยธรรมของผู้ยินยอมตนให้ทำการวิจัย โดยผู้ยินยอมตนให้ทำการวิจัยได้รับคำชี้แจงวัตถุประสงค์ของการศึกษา วิธีการเก็บข้อมูล ประโยชน์ของโครงการ และขอความร่วมมือในการเข้าร่วมการศึกษาด้วยความสมัครใจ โดยแจ้งสิทธิ์ในการตอบรับหรือปฏิเสธการเข้าร่วมวิจัยและบอกเลิกการเข้าร่วมวิจัยได้ตลอดเวลาโดยไม่เกิดผลเสียหายต่อกลุ่มตัวอย่าง ไม่มีการบิดเบือนข้อมูลที่ได้จากการสอบถาม โดยผู้วิจัยเปิดเผยข้อมูลของผู้ยินยอมให้ทำการวิจัยเฉพาะส่วนที่เป็นข้อสรุป การวิเคราะห์ข้อมูลและการนำเสนอข้อมูลในภาพรวมเพื่อประโยชน์เชิงวิชาการเท่านั้น

ผลการการศึกษา

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนบุคคลของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป

ข้อมูลส่วนบุคคลของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปพบว่า พนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปที่เข้าร่วมการศึกษาครั้งนี้ จำนวน 40 คน ส่วนใหญ่เป็นเพศชาย จำนวน 27 คน คิดเป็นร้อยละ 67.50 กลุ่มตัวอย่างจำนวน 13 คน คิดเป็นร้อยละ 32.50 มีอายุระหว่าง 34-41 ปี และ42–49 ปี โดยเป็นสัญชาติไทย ร้อยละ 100.00 ระดับการศึกษาส่วนใหญ่อยู่ในระดับมัธยมศึกษา จำนวน 21 คน คิดเป็นร้อยละ 52.50 สำหรับรายได้กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 38 คน ร้อยละ 95.00 มีรายได้ระหว่าง 10,000–20,000 บาท ร้อยละ 50.00 อยู่ในตำแหน่งพนักงานคัดแยกไม้ โดยมีระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน 8 ชั่วโมง/วัน ด้านอายุการทำงานส่วนใหญ่มีอายุงานมากกว่า 5 ปี จำนวน 22 คน คิดเป็นร้อยละ 55.00 ซึ่งการทำงานที่สัมผัสกับเสียงดัง ร้อยละ 100.00 มีการใช้ที่อุดหูหรือที่ครอบหู นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 33 คน คิดเป็นร้อยละ 82.50 เคยทำงานสัมผัสเสียงดังมาก่อน สำหรับประวัติเกี่ยวกับหูกลุ่มตัวอย่างจำนวน 40 คน คิดเป็นร้อยละ 100.00 ไม่เคยผ่าตัดในรูหูหรือบริเวณหู ไม่เคยได้รับอุบัติเหตุบริเวณศีรษะ และไม่เคยเป็นโรคที่เกี่ยวข้องกับหู โดยร้อยละ 2.50 เคยได้ยินเสียงดังมากจนหูอื้อ สำหรับโรคหรืออาการปัจจุบันที่เกี่ยวกับหู กลุ่มตัวอย่างมีเสียงในหู (Tinnitus) จำนวน 9 คน คิดเป็นร้อยละ 22.50 นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 100.00 ไม่มีอาการเป็นหวัด คัดจมูก หูอื้อ หูอักเสบ ไม่มีน้ำหรือหนองไหลจากหู ไม่มีอาการติดเชื้อบริเวณผิวหนังบริเวณหูหรือศีรษะ และไม่มีอาการปวดหูหรือรู้สึกไม่สบายที่หู รายละเอียดดัง Table 2

2. การสูญเสียการได้ยินของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป

จากการตรวจสมรรถภาพการได้ยินด้วยวิธีมาตรฐาน (audiometer) พบว่าพนักงานจำนวน 40 คน มีระดับการได้ยินที่ปกติ จำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 30.00 (โดยใช้เกณฑ์ที่ระดับการได้ยินที่ 25 dB ที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งของหูข้าง

ใดก็ตามมีค่าน้อยกว่า 25 dB HL) (กนกวรรณ และคณะ, 2563; สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2560) และมีระดับการได้ยินที่ผิดปกติ จำนวน 28 คน ร้อยละ 70.00 เมื่อจำแนกตามข้อมูลส่วนบุคคล พบว่า พนักงานเพศชายมีการสูญเสียการได้ยินมากกว่าเพศหญิง เมื่อตรวจด้วยวิธีมาตรฐานพบเพศชายมากกว่าเพศหญิงร้อยละ 40.00 ส่วนใหญ่พบที่กลุ่มอายุ 42–49 ปี ที่ระดับการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาและมีรายได้ 10,000–20,000 บาท พนักงานคัดแยกไม้มีการสูญเสียการได้ยินมากที่สุด รองลงมาพบในตำแหน่งหางม้าและนายม้าซึ่งมีระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน 8 ชั่วโมง/วัน โดยมีอายุงานในตำแหน่งปัจจุบันมากกว่า 5 ปี และส่วนใหญ่พนักงานที่เคยทำงานสัมผัสเสียงดังมีระดับการได้ยินที่ผิดปกติมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าพนักงานที่มีการใช้ที่อุดหูหรือที่ครอบหูมีระดับการได้ยินที่ผิดปกติคิดเป็นร้อยละ 70.00–100.00 รายละเอียดดัง Table 2

Table 2 Noise induced hearing loss classified by personal data (N = 40)

Attibute	Number (%)	Audiometric testNumber (%)	
		normal	abnormal
Sex			
Male	27(67.50)	4(10.00)	23(57.50)
Female	13(32.50)	8(20.00)	5(12.50)
Age			
18–25 years	3(7.50)	1(2.50)	2(5.00)
26–33 years	6(15.00)	4(10.00)	2(5.00)
34–41 years	13(32.50)	5(12.50)	8(20.00)
42–49 years	13(32.50)	2(5.00)	11(27.50)
50+ years	5(12.50)	0(0.00)	5(12.50)
Education level			
Elementary education	13(32.50)	1(2.50)	12(30.00)
Secondary education	21(52.50)	6(15.00)	15(37.50)
Voc. Cert. / High Voc. Cert.	6(15.00)	5(12.50)	1(2.50)
Job position			
Sawing	5(12.50)	0(0.00)	5(12.50)
Horsetail saw wood	8(20.00)	0(0.00)	8(20.00)
Packing / storage	20(50.00)	6(15.00)	14(35.00)
QC	5(12.50)	5(12.50)	0(0.00)
Head of Sawing Department	2(5.00)	1(2.50)	1(2.50)
Working period			
8 h/day	40(100.00)	12(30.00)	28(70.00)
Work experience			
< 1 years	3(7.50)	2(5.00)	1(2.50)
1–3 years	6(15.00)	4(10.00)	2(5.00)
3–5 years	9(22.50)	5(12.50)	4(10.00)
> 5 years	22(55.00)	1(2.50)	21(52.50)
Exposure noise to work			
Yes	33(82.50)	7(17.50)	26(65.00)
No	7(17.50)	5(12.50)	2(5.00)
Insert errplugs or earmutts			
Yes	40(100.00)	12(30.00)	28(70.00)
No	0(0.00)	0(0.00)	0(0.00)

เมื่อนำผลการตรวจระดับการได้ยินมาวิเคราะห์ตามความถี่เพื่อดูจำนวนคนที่มีระดับการได้ยินที่ผิดปกติ พบว่า เมื่อตรวจสมรรถภาพการได้ยินด้วยวิธีมาตรฐาน (audiometer) พบจำนวนผู้ที่มีระดับการได้ยินที่ผิดปกติมากที่สุดที่ความถี่ 4,000 เฮิรตซ์ ทั้งในหูข้างซ้ายและหูข้างขวา จำนวน 26 คน (ร้อยละ 65.00) และ 21 คน (ร้อยละ 52.50) ตามลำดับ รองลงมาคือที่ความถี่ 8,000 เฮิรตซ์ทั้งในหูข้างซ้ายและหูข้างขวา จำนวน 18 คน (ร้อยละ45.00) และ 17 คน (ร้อยละ 42.50) ตามลำดับ ดัง Fig. 1

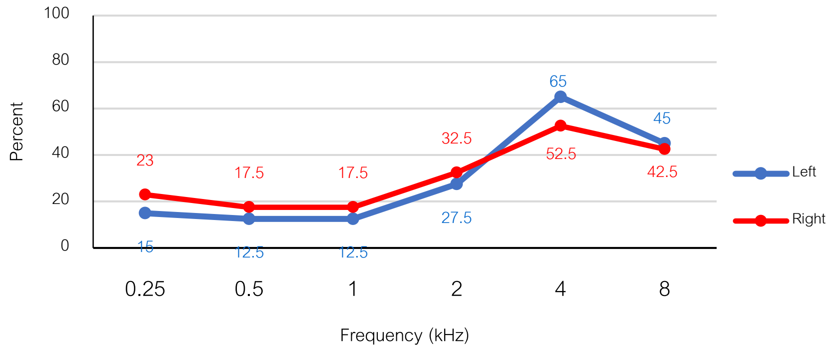


Fig. 1 Exhibit a number (percent) of people with noise induced hearing loss at different frequencies

สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาความชุกของการสูญเสียการได้ยินของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป จากผลการศึกษา พบว่า ความชุกของการสูญเสียการได้ยินของพนักงานในกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปที่ระดับการได้ยินผิดปกติ คิดเป็นร้อยละ 70.00 ใกล้เคียงกับความชุกของการสูญเสียการได้ยินในพนักงานอุตสาหกรรมแปรรูปยางธรรมชาติ เท่ากับร้อยละ 60.0 (อริสรา และคณะ, 2559) และความชุกของการสูญเสียการได้ยินของพนักงานชาวเมียนมาที่สัมผัสเสียงดังในโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา จังหวัดนครศรีธรรมราช เท่ากับร้อยละ 64.1 (อุไรวรรณ และคณะ, 2561) ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนผลิตไม้ยางพาราแปรรูปต้องอาศัยเครื่องจักร ซึ่งโต๊ะเลื่อยสายพานให้ระดับความดังเสียงที่ 93–115 เดซิเบล(เอ) (พีระ, 2550; อุไรวรรณ และคณะ, 2561) โดยมีระดับความดังเสียงในสภาพแวดล้อมการทำงานมากกว่า 85 dB(A) ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด (พีระ, 2550; อริสรา และคณะ, 2559; อุไรวรรณ และคณะ, 2561; Thepaksorn et al., 2019) และเนื่องด้วยกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปในปัจจุบันนี้ไม่มีเทคโนโลยีที่สามารถใช้ทดแทนแรงงานคนได้ ซึ่งการแปรรูปไม้ยางพาราจำเป็นจะต้องใช้คนคอยควบคุมในการผลิตเพื่อให้ได้สินค้าที่มีคุณภาพ นอกจากนี้ไม่มีเทคโนโลยีที่ควบคุมเสียงจากแหล่งกำเนิดและที่ทางผ่านจากแหล่งกำเนิดมายังพนักงานได้ มีเพียงมาตรการการป้องกันและควบคุมที่ตัวบุคคลโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันเสียงดังชนิดปลั๊กอุดหู (Ear plug) เท่านั้น ซึ่งพนักงานส่วนใหญ่ใช้อุปกรณ์ป้องกันเสียงดัง ร้อยละ 100.00 อาจเป็นไปได้ว่าพนักงานที่ใช้อุปกรณ์ป้องกันเสียงดังใส่ผิดวิธี สอดคล้องกับการศึกษาของอริสรา และคณะ (2559) คือ พนักงานส่วนใหญ่จะใส่เข้าไปในช่องหูเพียงเล็กน้อย มีกลุ่มตัวอย่างที่ใส่ถูกต้องเพียงร้อยละ 2.6 เท่านั้น ซึ่งส่งผลให้มาตรการในการลดการสัมผัสเสียงด้วยวิธีการใช้อุปกรณ์ป้องกันเสียงดังไม่ประสบความสำเร็จ

การสูญเสียการได้ยินตามปัจจัยส่วนบุคคล พบว่า พนักงานเพศชายมีการสูญเสียการได้ยินมากกว่าเพศหญิง ร้อยละ 40.00 สอดคล้องกับการศึกษาของ Thepaksorn et al. (2019) ที่ศึกษาการสูญเสียการได้ยินของคนงานโรงเลื่อยในภาคใต้ของประเทศไทย พบว่า การสูญเสียการได้ยินมักพบในเพศชายมากกว่าเพศหญิง (รัตนาภรณ์ และคณะ, 2558; อุไรวรรณ และคณะ, 2561) เนื่องจากกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปส่วนใหญ่เพศชายอาจต้องทำงานที่สัมผัสเสียงดังมากกว่า เพศชายจึงมีโอกาสสูญเสียการได้ยินมากกว่าเพศหญิง ซึ่งขัดแย้งกับการศึกษาของจิราพร และสุวัฒนา (2560) ที่พบว่าเพศไม่มีความสัมพันธ์กับการสูญเสียการได้ยิน จำแนกการสูญเสียการได้ยินตามอายุ พบว่าช่วงอายุที่มีการสูญเสียการได้ยินมากที่สุดคือ 42–49 ปี สอดคล้องกับการศึกษาของ อริสรา และคณะ (2559) ที่ศึกษาปัจจัยที่สัมพันธ์กับการสูญเสียการได้ยินในพนักงานโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปยางธรรมชาติ จังหวัดระยองพบว่าอายุมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียการได้ยิน ที่พบการสูญเสียการได้ยินมากในกลุ่มอายุตั้งแต่ 40 ปีขึ้นไป เนื่องจากอายุที่เพิ่มขึ้นทำให้เซลล์ประสาทรับฟังเสียง (Hair cells) เสื่อม ผู้ปฏิบัติงานที่มีอายุตั้งแต่ 40 ปี ขึ้นไปมีโอกาสสูญเสียการได้ยินได้สูงกว่า

ผู้ปฏิบัติงานที่มีอายุน้อยกว่า 40 ปี เมื่อผู้ปฏิบัติงานเกิดเป็นโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดัง ประกอบกับมีอายุมากขึ้นจะทำให้โรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดังที่เป็นมีความรุนแรงมากขึ้นกว่าปกติได้โดยเชื่อว่าผลกระทบของโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดังที่เกิดร่วมกับโรคประสาทหูเสื่อมตามอายุนั้นจะเป็นแบบบวกรวมกัน (Additive) ในการทำให้ระดับการได้ยินลดลง (ACOEM, 2012; Thepaksorn et al., 2019) นอกจากนี้การศึกษาในปัจจุบัน พบว่า พนักงานทำงานในตำแหน่งพนักงานคัดแยกไม้มากที่สุด (ร้อยละ 50.00) รองลงมาเป็นตำแหน่งนายม้าและหางม้า (32.50) ซึ่งมีระยะเวลาที่ปฏิบัติติงาน 8 ชั่วโมง/วัน โดยมีอายุงานในตำแหน่งปัจจุบันมากกว่า 5 ปี มีการสูญเสียการได้ยินมากที่สุดร้อยละ 52.50 สอดคล้องกับการศึกษาของอริสรา และคณะ (2559) ที่พบว่าอายุการทำงานมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียการได้ยิน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีอายุงาน 5 ปี ขึ้นไป มีการสูญเสียการได้ยิน ร้อยละ 92.5 ซึ่งจากการรายงานขององค์การอนามัยโลก (WHO, 1986) พบว่า การทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีเสียงดังเกิน 85 dB(A) เป็นเวลาอย่างน้อย 5 ปี จะเกิดประสาทหูเสื่อมได้และหากพนักงานมีระยะเวลาการทำงานนานจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียการได้ยินสูงขึ้น (NIOSH, 1998) นอกจากนั้นพิพัฒน์ (2561) รายงานว่าอายุการทำงานพบว่าคนที่ทำงานนานกว่า 10 ปี มีความเสี่ยงสูงกว่าคนที่ทำงานน้อยกว่า 10 ปี ถึง 10.6 เท่า และระยะเวลาที่ทำงานในหน่วยงานพบว่าคนที่ทำงานในหน่วยงานนั้นเกิน 10 ปีมีความเสี่ยงสูงกว่าคนที่ทำงานน้อยกว่า 10 ปีถึง 18.5 เท่า ปัจจัยเสี่ยงด้านอายุการทำงานในที่มีเสียงดังเป็นปัจจัยหลักต่อการสูญเสียการได้ยิน นอกจากนี้การศึกษาของเราชี้ให้เห็นว่าส่วนใหญ่พนักงานที่เคยทำงานสัมผัสเสียงดังมีระดับการได้ยินที่ผิดปกติมากที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของจิราพร และสุวัฒนา (2560) ที่รายงานว่า คนงานที่มีประวัติการทำงานที่สัมผัสเสียงดังมีความสัมพันธ์และความเสี่ยงต่อการสูญเสียการได้ยินจากการประกอบอาชีพเป็น 6.72 เท่าของคนงานที่ไม่มีประวัติทำงานสัมผัสเสียงดัง เนื่องจากการสูญเสียการได้ยินส่งผลต่อการดำเนินชีวิตประจำวัน การสื่อสาร เป็นสาเหตุสำคัญของการไร้สมรรถภาพ และเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นชัดเจนในสังคม ส่งผลให้คุณภาพชีวิตของผู้ที่เกิดภาวะดังกล่าวแย่ลง ซึ่งถือว่าการสูญเสียการได้ยินเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นโรคที่ไม่สามารถรักษาได้ การป้องกันโรคจึงมีความสำคัญในการช่วยลดอัตราป่วยของโรคประสาทหูเสื่อมจากเสียงดัง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดความเสี่ยงของการสูญเสียการได้ยินในพนักงาน ควรดำเนินการโครงการอนุรักษ์การได้ยิน การรณรงค์ส่งเสริมและป้องกันภัยจากเสียงดังนอกเหนือจากการเฝ้าระวังโดยการตรวจสมรรถภาพการได้ยินประจำปี และควรปรับพฤติกรรมการป้องกันอันตรายจากเสียงของพนักงานที่ยังปฏิบัติไม่เหมาะสม รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันเสียง เช่น ปลั๊กอุดหูหรือที่ครอบหูได้อย่างเหมาะสมเมื่อเข้าไปปฏิบัติงานในบริเวณที่มีเสียงดัง เพื่อให้พนักงานได้รับความปลอดภัยและลดโอกาสเกิดการสูญเสียการได้ยิน หากมีการสูญเสียการได้ยินจากการทำงานค่าทดแทนที่ลูกจ้างมีสิทธิ์ได้รับ ค่ารักษาพยาบาล ค่าทดแทนกรณีหยุดรักษาตัว ค่าทดแทนกรณีสูญเสียอวัยวะ ค่าทดแทนกรณีทุพพลภาพ ค่าฟื้นฟูสมรรถภาพในการทำงาน กรณีที่ลูกจ้างต้องสูญเสียอวัยวะบางส่วนของทั้งร่างกาย ตามมาตรา 18 (2) แห่งพระราชบัญญัติเงินทดแทน พ.ศ. 2537 ให้มีระยะเวลาจ่ายค่าทดแทนตามประเภทการสูญเสียอวัยวะ ดังต่อไปนี้ หูหนวกทั้ง 2 ข้าง ห้าปีสิบเดือน หูหนวกข้างหนึ่ง สองปีแปดเดือน ในกรณีที่ลูกจ้างหูหนวก 2 ข้าง หรือหูหนวก 1 ข้าง อีกข้างหนึ่งปกติ ซึ่งเข้าข่ายของกฎหมาย ให้ใช้กฎหมายที่มีอยู่ประเมินการสูญเสียสมรรถภาพของการได้ยินได้เลยโดยไม่ต้องคำนวณ ถ้าไม่เข้าข่ายนี้แต่ลูกจ้างสูญเสียการได้ยิน (hearing loss) ก็ต้องคำนวณจาก audiogram การวิจัยครั้งต่อไปควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในกลุ่มที่ไม่ได้ทำงานสัมผัสเสียงดัง (กลุ่มควบคุม)ในกลุ่มพนักงานที่อยู่ในช่วงอายุเดียวกันเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน (baseline) สำหรับการสูญเสียการได้ยินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณพนักงานทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. 2561. เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการจัดทำมาตรการอนุรักษ์การได้ยินในสถานประกอบกิจการ พ.ศ.2561. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 135 ตอนพิเศษ 33 ง.

กนกวรรณ อาจแก้ว, วิชัย พฤกษ์ธาราธิกูล, สุนิสา ชายเกลี้ยง. 2563. ความชุกของการสูญเสียการได้ยินและการสัมผัสเสียง ของพนักงานผลิตชิ้นส่วนเครื่องปรับอากาศและอุปกรณ์ทำความเย็น. วารสารสาธารณสุขมหาวิทยาลัยบูรพา 15(1): 1–13.

จิราพร ประกายรุ้งทอง, สุวัฒนา เกิดม่วง. 2560. ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการสูญเสียการได้ยินจากการทำงานในกลุ่มคนงานโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ จังหวัดสุพรรณบุรี. วารสารการพยาบาลและการดูแลสุขภาพ 35(3): 98–108.

พีระ คงทอง. 2550. สถานการณ์การสูญเสียการได้ยินในโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา จังหวัดนครศรีธรรมราช. วารสารวิจัยระบบสาธารณสุข 1(2): 1–9.

พิพัฒน์ แจ่มพัฒนกิจ. 2561. ความชุกและปัจจัยเสี่ยงต่อการสูญเสียการได้ยินของเจ้าหน้าที่กลุ่มเสี่ยง โรงพยาบาลปากช่องนานา. วารสารวิชาการแพทย์เขต 11 32(2): 981–992.

มูลนิธิสัมมาอาชีวะ. 2561. แนวทางการตรวจและแปลผลสมรรถภาพการได้ยินในงานอาชีวอนามัย พ.ศ. 2561. มูลนิธิสัมมาอาชีวะ. ชลบุรี.

รัตนาภรณ์ เพ็ชรประพันธ์, วันดี ไข่มุกด์, ฐิติวร ชูสง. 2558. การประเมินระดับเสียงและสมรรถภาพการได้ยินของพนักงานโรงงานโม่หินแห่งหนึ่งในจังหวัดนครศรีธรรมราช. วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ 8(27): 13–23.

สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. 2560. รายงานสถานการณ์โรคและภัยสุขภาพจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. https://ddc.moph.go.th/uploads/ckeditor2//files/01_envocc_situation_60.pdf, 30 พฤศจิกายน 2565.

สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. 2560. แนวทางการตรวจคัดกรองสมรรถภาพการได้ยิน และการแปลผล (ฉบับปรับปรุง ปี 2560). http://envocc.ddc.moph.go.th/, 30 พฤศจิกายน 2565.

อริสรา ฤทธิ์งาม, เจนจิรา เจริญการไกร, สุวรรณา จันทร์ประเสริฐ, จันทร์ทิพย์ อินทวงศ์. 2559. ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการสูญเสียการได้ยินในพนักงานโรงงานอุตสาหกรรม แปรรูปยางธรรมชาติ จังหวัดระยอง. วารสารพยาบาลสาธารณสุข 30(3): 118–131.

อุไรวรรณ หมัดอ่าดัม, สุภาภรณ์ ยิ้มเที่ยง, ทัศณุ เรืองสุวรรณ์, จิตตาภรณ์ มงคลแก่นทราย, นุจรีย์ แซ่จิว. 2561. การสูญเสียการได้ยินของพนักงานชาวเมียนมาที่สัมผัสเสียงดัง ในโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา จังหวัดนครศรีธรรมราช. วารสารพยาบาลศาสตร์และสุขภาพ 41(4): 23–33.

American College of Occupational and Environmental Medicine (ACOEM). 2012. ACOEM Guidance statement: Occupational noise-induced hearing loss. J. Occup. Environ. Med. 54(1): 106–108.

Chen, Y., Zhang, M., Qiu, W., Sun, X., Wang, X., Dong, Y., Chen, Z., Hu, W. 2020. Prevalence and determinants of noise-induced hearing loss among workers in the automotive industry in China: A pilot study. J. Occup. Health. 61(5): 387–397.

National Institute for Occupational Safety and Health. 1998. Criteria for a recommended standard: Occupational noise exposure – revised criteria 1998 (NIOSH publication No. 98–126). https://www.cdc.gov/niosh/docs/98- 126/pdfs/98-126.pdf, 30 November 2022.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). 1983. 1910.95 CFR Occupational noise exposure: Hearing conservation amendment (Final rule). Fed. Reg. 1983 48: 9738–9785.

Thepaksorn, P., Koizumi, A., Harada, K., Siriwong, W., Neitzel, R.L. 2019. Occupational noise exposure and hearing defects among sawmill workers in the South of Thailand. Int. J. Occup. Saf. Ergon. 25(3): 458–466.

World Health Organization WHO. 1986. Hearing impairment cause by noise. In: Early detection of occupational disease. WHO Document Production Services. Geneva, Switzerland.

World Health Organization (WHO). (2017). Deafness and hearing loss. http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/en/, 30 November 2022.

สาขาวิศวกรรมศาสตร์
และสถาปัตยกรรมศาสตร์
(Subject: Engineering and Architecture)

ภาคบรรยาย
(Oral Presentation)

การวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประกอบกิจการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย

Greenhouse gas emission analysis of petroleum exploration and production in Thailand

ธนาภา นิลวิเชียร*, **สุชีลา พลเรือง**

Thanapha Nilvichien*, Sucheela Polruang

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thanapha.nil@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย ด้วยการประเมินและวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมของประเทศไทยในแหล่งผลิตที่ดำเนินการผลิตต่อเนื่องตลอดทั้งปี ในช่วงปี 2563 รวมทั้งสิ้น 22 แหล่ง ผลการศึกษาพบว่า มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 6.95 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($MtCO_2e$) และกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้าและความร้อนสำหรับกระบวนการผลิต (Stationary Combustion) เท่ากับ 47.44% และผลการเปรียบเทียบกับการศึกษาของต่างประเทศ พบว่า มีความสอดคล้องกันโดยที่สัดส่วนของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงฯ การระบายก๊าซทิ้ง (Vent) และการเผาก๊าซทิ้ง (Flare) เป็นหลัก และดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกไม่ได้มีค่าแปรผันตามปริมาณการผลิต จึงสรุปได้ว่า ปริมาณการผลิตปิโตรเลียมไม่ได้เป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น สำหรับแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมจึงควรพิจารณาเลือกประยุกต์ใช้วิธีที่เหมาะสมตามสภาพของแหล่งผลิตและความคุ้มค่าในการลงทุน

คำสำคัญ: การผลิตปิโตรเลียม, ก๊าซเรือนกระจก, ดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Abstract

This study presents the results of Greenhouse gas (GHG) emission analysis of 22 petroleum production fields in Thailand throughout the year 2020. The results showed that GHG emissions from petroleum production process in Thailand was 6.95 $MtCO_2e$. It was found that stationary combustion was the largest source of total GHG emissions (47.44%). This was in accordance with the results from other international studies, which reported that the main contribution to the GHG emissions of petroleum production process were stationary combustion, venting and flaring. Furthermore, it can be concluded that GHG emission intensity of oil and natural gas production process varied across fields but did not depend on the average production rate. The GHG mitigation should be appropriately considered and applied according to the characteristics of each field and cost-effectiveness.

Keyword: Greenhouse gas emissions, Greenhouse gas Intensity, Oil and gas production

คำนำ

การสำรวจและผลิตปิโตรเลียมเป็นกิจการที่สำคัญต่อความมั่นคงทางพลังงานของประเทศไทย จึงต้องมีการดำเนินกิจการอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการพลังงานของประเทศที่เพิ่มขึ้น ควบคู่ไปกับการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนและนโยบายด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย และกำลังเป็นประเด็นสำคัญที่หลายประเทศตื่นตัวในการเตรียมพร้อมรับมือเพื่อลดและป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน โดยข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2559 พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งภาคพลังงานมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คือ 25.40 $MtCO_2e$ (Million tons of carbon dioxide equivalent) หรือคิดเป็น 71.65% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด และในปี พ.ศ. 2559 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการสำรวจและผลิตปิโตรเลียม (เฉพาะหมวดการรั่วซึม) เท่ากับ 1.03 $MtCO_2e$ หรือคิดเป็น 4.11% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคพลังงานทั้งหมด (Ministry of Natural Resources and Environment, 2020)

ด้วยเหตุนี้ การรวบรวมข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการสำรวจและผลิตปิโตรเลียม จึงเป็นกระบวนการสำคัญที่จะนำไปสู่การวางแผนและกำหนดนโยบายหรือแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียม สัดส่วนและปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอน ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินและวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย และเปรียบเทียบกับข้อมูลของต่างประเทศ เพื่อนำเสนอแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1) เครื่องคอมพิวเตอร์ 2) โปรแกรม Microsoft office Excel 3) ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย ปี 2563

ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย โดยทำการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตปิโตรเลียมในแหล่งผลิตที่มีการดำเนินการผลิตอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี ในช่วงปี 2563 รวมทั้งสิ้นจำนวน 22 แหล่ง แบ่งเป็นแหล่งผลิตปิโตรเลียมบนบกจำนวน 7 แหล่ง และแหล่งผลิตปิโตรเลียมในทะเล จำนวน 15 แหล่ง มีผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมหลักที่ผลิตได้ คือ น้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

ขอบเขตการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้พิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกครอบคลุมกระบวนการตั้งแต่การนำปิโตรเลียมขึ้นมาจากหลุมผลิต การเข้าสู่กระบวนการผลิต ไปจนถึงการจัดเก็บ และรายงานผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($MtCO_2e$) ปริมาณการผลิตน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติในหน่วยล้านบาร์เรลเทียบเท่าน้ำมันดิบ (Million barrels of oil equivalent หรือ MBOE) และดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อบาร์เรลเทียบเท่าน้ำมันดิบ (Kilograms of carbon dioxide equivalent per barrels of oil

equivalent หรือ kgCO_2e/BOE) โดยกำหนดแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกเป็น 5 กิจกรรม แบ่งตามประเภทของแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก ได้แก่

- แหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง (Direct Emission) คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตโดยตรงในพื้นที่ปฏิบัติงาน ได้แก่ 1) การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้าและความร้อนสำหรับกระบวนการผลิต (Stationary Combustion) 2) การเผาก๊าซทิ้ง (Flare) 3) การระบายก๊าซทิ้ง (Vent) และ 4) การรั่วซึม (Fugitive Emission)
- แหล่งกำเนิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (Indirect Emission) คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการซื้อพลังงานจากภายนอกและนำเข้ามาใช้ในการผลิตปิโตรเลียม คือ 5) การซื้อพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก

ทั้งนี้ ในส่วนของก๊าซเรือนกระจกที่มีแหล่งกำเนิดจากการใช้เชื้อเพลิงในยานพาหนะสำหรับสนับสนุนการปฏิบัติงานและขนส่งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Mobile Combustion) จะไม่ถูกนำมาพิจารณาในขอบเขตของงานวิจัยนี้ เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูลที่มีไม่ครบถ้วนและไม่สามารถระบุรายละเอียดได้ เช่น วัตถุประสงค์การใช้ยานพาหนะ เส้นทางการขนส่ง จำนวนเที่ยว ปริมาณที่ขนส่งต่อเที่ยว จุดเริ่มต้นและปลายทางการขนส่ง ระยะทางที่ใช้ เป็นต้น ทำให้ยากต่อการประเมินและวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น

การเก็บรวบรวมข้อมูล

- ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ได้แก่ ปริมาณก๊าซเรือนกระจก ชนิดของก๊าซเรือนกระจก แหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก และชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ รวมถึงข้อมูลการผลิตปิโตรเลียมของประเทศไทย ได้แก่ ปริมาณการผลิต ชนิดของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม จำนวนแหล่งผลิต ลักษณะของแหล่งผลิต และกระบวนการผลิต ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ และการค้นหาข้อมูลจากฐานข้อมูลสถิติรายงานของกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ บทความ เอกสารทางวิชาการ และงานวิจัยต่าง ๆ
- ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในต่างประเทศ ได้แก่ ดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ชนิดของก๊าซเรือนกระจก แหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก รวมถึงข้อมูลเทคโนโลยีลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ ประเภทของเทคโนโลยี ประสิทธิภาพ ซึ่งใช้วิธีค้นหาข้อมูลจากบทความ เอกสารทางวิชาการ และงานวิจัยต่าง ๆ

การแบ่งกลุ่มศึกษา

แหล่งผลิตปิโตรเลียมในงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มศึกษา โดยแบ่งตามลักษณะพื้นที่และปริมาณการผลิต ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กลุ่มแหล่งผลิตบนบกที่มีปริมาณการผลิตน้อยกว่า 30,000 บาร์เรลเทียบเท่าน้ำมันดิบต่อวัน (Barrels of oil equivalent per day หรือ BOE/d) กลุ่มที่ 2 กลุ่มแหล่งผลิตในทะเลที่ปริมาณการผลิตน้อยกว่า 30,000 BOE/d กลุ่มที่ 3 กลุ่มแหล่งผลิตในทะเลที่ปริมาณการผลิตมากกว่า 30,000 BOE/d

การคำนวณดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

คำนวณดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและปริมาณการผลิต ตาม Equation 1

$$\text{Greenhouse Gas Intensity} = \frac{\text{Greenhouse Gas Emissions}}{\text{Production}} \quad (1)$$

เมื่อ Greenhouse Gas Intensity คือ ดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2e/BOE)

Greenhouse Gas Emissions คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2e)

Production คือ ปริมาณการผลิตปิโตรเลียม (BOE)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียม

จากการรวบรวมข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมของประเทศไทย ในปี 2563 มีค่าเท่ากับ 6.95 MtCO_2e โดยพบว่า กิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงฯ ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เท่ากับ 47.44% หรือ 3.30 MtCO_2e รองลงมา คือ การเผาก๊าซทิ้ง เท่ากับ 41.16% หรือ 2.86 MtCO_2e และการระบายก๊าซทิ้ง เท่ากับ 8.67% หรือ 0.60 MtCO_2e ซึ่งผลเปรียบเทียบกับงานวิจัยในต่างประเทศ พบว่า ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียม คิดเป็นสัดส่วน 5.21% ของสหรัฐอเมริกา (เฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งผลิตบนบก) (LaCount, L. et al., 2021) และ 2.56% ของสมาคมผู้ผลิตก๊าซและน้ำมันนานาชาติ (International Association of Oil and Gas Producers (IOGP), 2021) ซึ่งมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งกำเนิดหลัก ๆ สอดคล้องกัน คือ ส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฯ การเผาไหม้ก๊าซทิ้ง และการระบายก๊าซทิ้ง แสดงดัง Table 1 และ Fig. 1

Table 1 Greenhouse gas emissions by sources (MtCO_2e)

Sources	Group 1	Group 2	Group 3	Total by Sources
Stationary combustion	0.28	0.72	2.30	3.30
Flare	0.20	0.10	2.56	2.86
Vent	0.00	0.42	0.18	0.60
Fugitive emission	0.05	0.03	0.10	0.18
Electricity purchased	0.01	-	-	0.01
Total by Groups	0.54	1.27	5.15	6.95

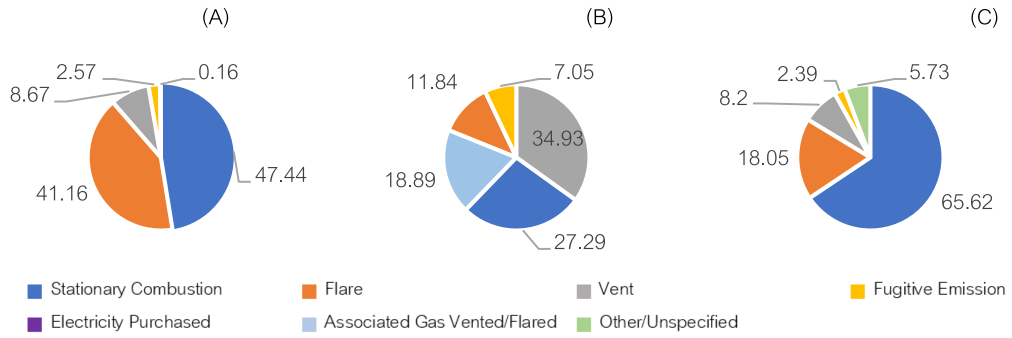


Fig. 1 Greenhouse gas emissions by sources (%): (A) Thailand; (B) United States (Emissions from onshore fields.); (C) IOGP

สำหรับแหล่งผลิตในสหรัฐอเมริกา พบว่า มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสัดส่วน 55% ก๊าซมีเทน เป็นสัดส่วน 45% และก๊าซไนตรัสออกไซด์ ประมาณ 0.06% (LaCount et al., 2021) ส่วนในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการแยกสัดส่วนและปริมาณตามชนิดของก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูล

ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้

จากการรวบรวมข้อมูลชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้จากกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ พบว่า มีการใช้เชื้อเพลิง ได้แก่ ดีเซล แอลพีจี และการใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดิบที่ผลิตได้จากแหล่งผลิตเองที่ไม่คุ้มค่าต่อการจำหน่าย มาผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม เช่นเดียวกับสหรัฐอเมริกาและสมาคมผู้ผลิตก๊าซและน้ำมันนานาชาติ (IOGP, 2021; LaCount et al., 2021)

ปริมาณการผลิตปิโตรเลียม

จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณการผลิตปิโตรเลียมของประเทศไทย ในปี 2563 มีการผลิตปิโตรเลียมทั้งหมดเท่ากับ 222.85 MBOE ได้แก่ น้ำมันดิบ 46.09 MBOE และก๊าซธรรมชาติ 176.76 MBOE โดยข้อมูลปี 2564 พบว่า ปริมาณการผลิตน้ำมันของประเทศไทย มีสัดส่วน ประมาณ 0.3% จากปริมาณการผลิตน้ำมันทั่วโลก (รวมน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติเหลว) และปริมาณการผลิตก๊าซธรรมชาติของประเทศไทย มีสัดส่วน ประมาณ 0.8% จากปริมาณการผลิตก๊าซธรรมชาติทั่วโลก (BP p.l.c., 2022) แสดงดัง Table 2

Table 2 Oil and natural gas production (MBOE)

Type of production	Group 1	Group 2	Group 3	Total by Types
Oil	12.20	19.52	14.36	46.08
Natural gas	6.46	16.69	153.62	176.77
Total by Groups	18.66	36.21	167.98	222.85

การเปรียบเทียบดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ผลการเปรียบเทียบดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างกลุ่มศึกษา พบว่า กลุ่มที่ 2 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 34.96 kgCO_2e/BOE รองลงมาคือ กลุ่มที่ 3 มีค่าเท่ากับ 30.64 kgCO_2e/BOE และกลุ่มที่ 1 มีค่า เท่ากับ 28.99 kgCO_2e/BOE อีกทั้งยังพบว่า ดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแต่ละแหล่งผลิตปิโตรเลียมไม่ได้มีค่าสูงหรือต่ำตามปริมาณการผลิตที่มีมากหรือน้อย สอดคล้องกับผลการศึกษาดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสหรัฐอเมริกา แสดงดัง Fig. 2 ประกอบกับผลการเปรียบเทียบดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งกำเนิดจากทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงฯ เป็นกิจกรรมหลักที่ก่อให้เกิดดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แสดงดัง Fig. 3

และเมื่อพิจารณาสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งกำเนิด พบว่า สัดส่วนของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งกำเนิดหลักๆ จะมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฯ การระบายก๊าซทิ้ง และการเผาก๊าซทิ้ง ซึ่งสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งกำเนิดทั้ง 5 กิจกรรม มีสัดส่วนที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในแต่ละกลุ่มศึกษา คือ การรั่วซึม การระบายก๊าซทิ้ง และการเผาก๊าซทิ้ง สอดคล้องกับข้อมูลสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสหรัฐอเมริกาและสมาคมผู้ผลิตก๊าซและน้ำมันนานาชาติ แสดงดัง Fig. 1 และ Fig. 4

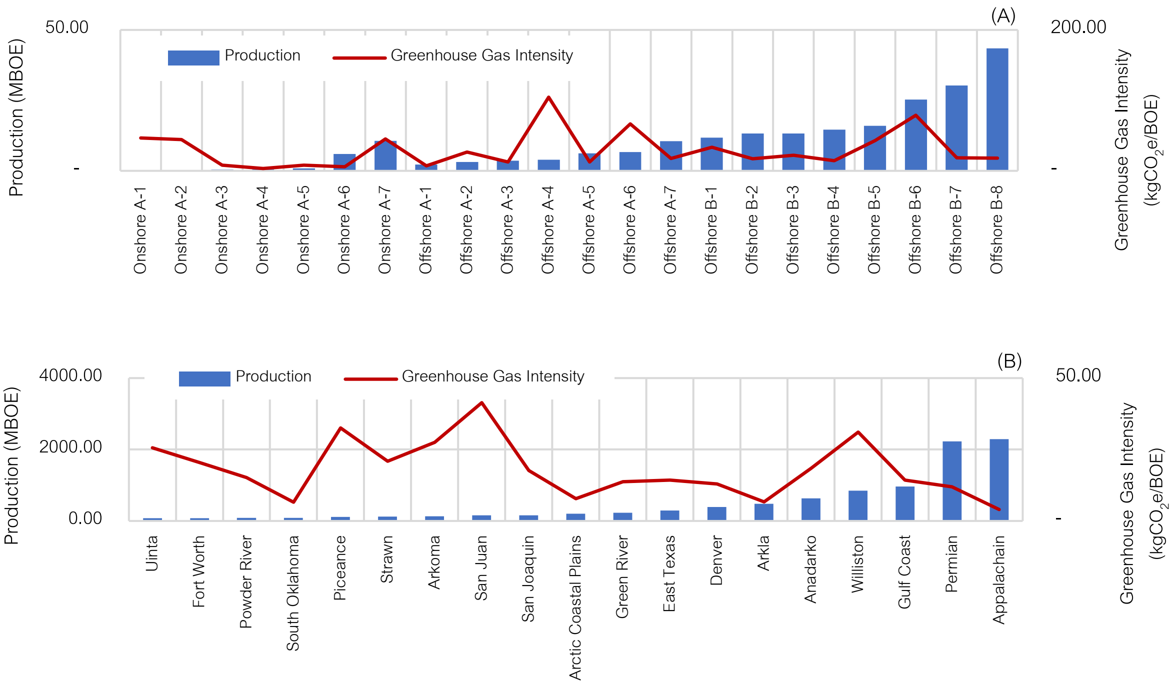


Fig. 2 Production (MBOE) and greenhouse gas Intensity ($kgCO_2e/BOE$): (A) This study (Group 1 Onshore A-1 to A-7; Group 2 Offshore A-1 to A-7; Group 3 Offshore B-1 to B-8); (B) United States (LaCount et al., 2021)

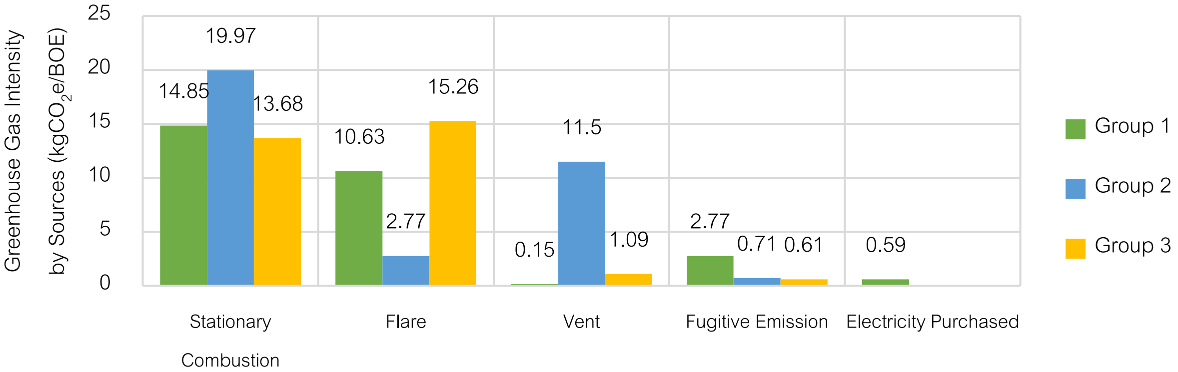


Fig. 3 Greenhouse Gas Intensity by Sources ($kgCO_2e/BOE$)

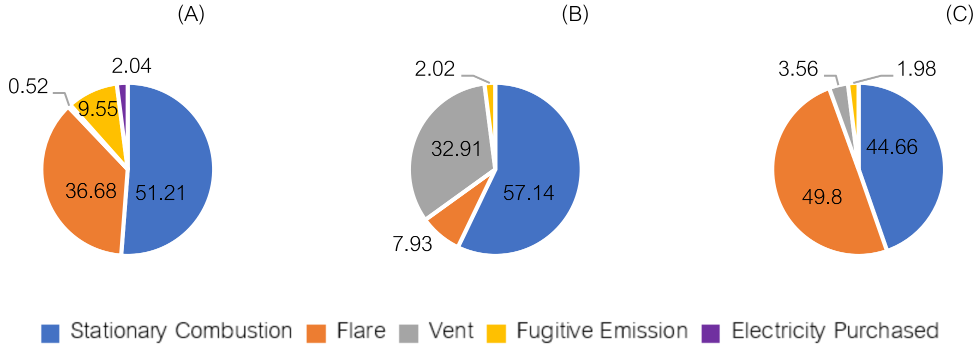


Fig. 4 Greenhouse gas emissions by sources (%): (A) Group 1; (B) Group 2; (C) Group 3

จากผลการเปรียบเทียบข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกไม่ได้แปรผันตามปริมาณการผลิต และมีสัดส่วนของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งกำเนิดหลัก ๆ ที่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่มศึกษา สอดคล้องกับงานวิจัยของ LaCount et al., (2021) ที่ระบุว่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกไม่มีความสัมพันธ์กันกับปริมาณการผลิต และมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไปในแต่ละผู้ผลิต โดยจากผลงานวิจัยในต่างประเทศได้แสดงให้เห็นถึงปัจจัยอื่นที่มีผลต่อดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนี้

- การปฏิบัติงานของผู้ผลิต : งานวิจัยของ Masnadi et al. (2018) พบว่า แหล่งผลิตในทะเลเหนือมีแนวโน้มของดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มสูงขึ้นจากกิจกรรมการอัดของเหลวเข้าไปในแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มอัตราการผลิต (Enhanced Oil Recovery หรือ EOR) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งอื่น ๆ ทั่วโลกพบว่า แหล่งผลิตในทะเลเหนือมีดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลจากมีกฎระเบียบบังคับที่เข้มงวด และการใช้พลังงานสะอาดในกระบวนการผลิต
- ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต : งานวิจัยของ LaCount et al. (2021) พบว่า อุปกรณ์ควบคุมในระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic controller) เป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซมีเทนมากที่สุด คิดเป็นสัดส่วน 54% ของการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมด และอุปกรณ์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น เครื่องผลิตไฟฟ้าและทำความร้อน เป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด คิดเป็นสัดส่วนเป็น 49% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- การออกแบบกระบวนการผลิต : งานวิจัยของ Kearns et al. (2000) พบว่า การกำจัดก๊าซจากกระบวนการผลิตที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หากเป็นแหล่งผลิตที่ใช้ระบบเผาก๊าซทิ้งจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ในขณะที่แหล่งผลิตที่ใช้ระบบระบายก๊าซทิ้งจะมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเป็นหลักซึ่งมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการเลือกใช้ระหว่าง 2 ระบบดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซที่ได้จากกระบวนการผลิตและการออกแบบกระบวนการผลิต
- ชนิดและคุณสมบัติของปิโตรเลียมที่ผลิต : งานวิจัยของ LaCount et al. (2021) พบว่า แหล่งที่มีการผลิตน้ำมันชนิดหนัก (Heavy oil) มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการระบายและเผาก๊าซทิ้งเป็นหลัก คิดเป็นสัดส่วนเป็น 25% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ประกอบกับงานวิจัยของ Masnadi et al. (2018) พบว่า แหล่งที่มีการผลิตน้ำมันชนิดหนัก เป็นแหล่งที่มีดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่าการผลิตปิโตรเลียมประเภทอื่น ได้แก่ แหล่งผลิตน้ำมันในประเทศเวเนซุเอลาและแคนาดา เนื่องจากกระบวนการที่ใช้ในการผลิตและสกัดน้ำมัน

แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียม

สำหรับแหล่งผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทยควรให้ความสำคัญกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงฯ การเผาก๊าซทิ้ง และการระบายก๊าซทิ้ง ได้แก่ การลด การใช้ซ้ำ การนำกลับมาใช้ใหม่ และการกำจัด โดยเสนอแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนี้

- การลดจากแหล่งกำเนิด ให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยลงหรือไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกเลย ได้แก่ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฯ ด้วยการนำความร้อนเหลือทิ้งจากอุปกรณ์การผลิตหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต เช่น ผลิตไฟฟ้า ผลิตความร้อน เป็นต้น และการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานสะอาดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบกังหันก๊าซและระบบเครื่องยนต์ดีเซล ซื้อพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกที่ผลิตจากพลังงานสะอาดสำหรับแหล่งผลิตบนบก เป็นต้น ดังนั้น สำหรับแหล่งผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทยควรนำแนวทางดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ โดยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบกังหันก๊าซและระบบเครื่องยนต์ดีเซล หรือการซื้อพลังงานไฟฟ้าจาก

ภายนอกที่ผลิตจากพลังงานสะอาดสำหรับแหล่งผลิตบนบก ประกอบกับแหล่งผลิตในทะเลมีความเหมาะสมในการใช้วิธีการนำความร้อนเหลือทิ้งจากอุปกรณ์การผลิตหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผลิตไฟฟ้าใช้เองทั้งหมด โดยเฉพาะแหล่งที่ผลิตก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก จึงมีเครื่องอัดก๊าซติดตั้งด้วย ทำให้มีศักยภาพในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องอัดก๊าซมากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า

- การหมุนเวียนกลับมาใช้ซ้ำ โดยนำก๊าซส่วนเกินกลับมาใช้ประโยชน์แทนที่การนำไปเผาหรือระบายทิ้ง ด้วยการนำไปอัดกลับลงสู่แหล่งกักเก็บปิโตรเลียมเพื่อช่วยในการผลิตน้ำมันดิบ (EOR) หรือช่วยในการผลิตก๊าซธรรมชาติ (EGR) ดังนั้น แหล่งผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทยที่มีความเหมาะสมในการนำแนวทางดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ คือ แหล่งที่มีการผลิตน้ำมันดิบเป็นหลักสำหรับวิธี EOR และแหล่งผลิตก๊าซธรรมชาติขนาดใหญ่สำหรับวิธี EGR
- การดักจับและกักเก็บคาร์บอน โดยใช้วัสดุ สารเคมีดูดซับ หรือลดอุณหภูมิเพื่อให้ CO_2 เกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลว จากนั้นจะนำไปกักเก็บภายในชั้นหินใต้พื้นดิน หรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อ เช่น ใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอื่นที่ใช้ CO_2 เป็นวัตถุดิบ ใช้เพิ่มปริมาณการผลิตในกระบวนการผลิตปิโตรเลียมแบบ EOR และ EGR เป็นต้น

ทั้งนี้ ในการพิจารณาเลือกใช้วิธีลดก๊าซเรือนกระจกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ประเภทการผลิต (ผลิตบนบก-ในทะเล ผลิตก๊าซธรรมชาติ-น้ำมันดิบ) นโยบายและแนวทางปฏิบัติที่เกี่ยวข้อง (กฎหมาย ราคาคาร์บอนเครดิต ความพร้อมในการใช้พลังงานสะอาด) เป็นต้น (Beck et al., 2020) รวมถึงความคุ้มค่า และงบประมาณสำหรับการลงทุน เพื่อให้ได้เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการลดก๊าซเรือนกระจกในแต่แหล่งผลิตต่อไป

สรุป

จากผลการประเมินและวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย และเปรียบเทียบกับข้อมูลของต่างประเทศ สรุปได้ว่า ปริมาณการผลิตปิโตรเลียมไม่ได้เป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อดัชนีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การปฏิบัติงานของผู้ผลิต ชนิดของอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต ต้นทุนการผลิต การออกแบบกระบวนการผลิต วิธีที่ใช้กระบวนการผลิต ชนิดและคุณสมบัติของปิโตรเลียมที่ผลิตได้ ชนิดของพลังงานที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต กิจกรรมในแหล่งผลิตปิโตรเลียมแต่ละแหล่ง เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้พบว่า แหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้าและความร้อนสำหรับกระบวนการผลิต รองลงมา คือ การเผาก๊าซทิ้ง และการระบายก๊าซทิ้ง ดังนั้น สำหรับแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปิโตรเลียมควรพิจารณาเลือกประยุกต์ใช้วิธีลดก๊าซเรือนกระจกให้เหมาะสมตามสภาพของแหล่งผลิต เช่น การหมุนเวียนก๊าซหรือพลังงานเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต การเปลี่ยนมาใช้พลังงานสะอาด การดักจับและกักเก็บคาร์บอน เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและองค์ความรู้จากผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชีลา พลเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล รวมถึงคำปรึกษาและความรู้ประสบการณ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับการสำรวจและผลิตปิโตรเลียม ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

Beck, C., Rashidbeigi, S., Roelofsen, O., Speelman, E. 2020. The future is now: How oil and gas companies can decarbonize, McKinsey & Company. London, UK.

BP p.l.c. 2022. bp Statistical Review of World Energy 2022, 71st edition. Whitehouse Associates, London.

International Association of Oil and Gas Producers. 2021. Data Series: IOGP Environmental performance indicators - 2021 data, Report 2021e. London, UK.

Kearns, J., Armstrong, K., Shirvill, L., Garland, E., Simon, C., Monopolis, J., 2000. Flaring & venting in the oil & gas exploration & production industry, Report No. 2.79/288. The International Association of Oil & Gas Producers. London, UK.

LaCount. R., Curry, T., Hellgren, L., Russell, P. 2021. Benchmarking Methane and Other GHG Emissions of Oil & Natural Gas Production in the United States. Washington DC, United States

Masnadi, M.S., El-Houjeiri, H., Schunack, D., et al. 2018. Global Carbon Intensity of Crude Oil Production. Science. 2018: 851-853. doi: 10.1126/science.aar6859

Ministry of Natural Resources and Environment. 2020. Thailand Third Biennial Update Report. Bangkok, Thailand.

การศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงชนิด Poreflon และชนิด Sterapore ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตไบโอดีเซล

The efficiency of Poreflon and Sterapore hollow fiber membranes in membrane bioreactors for wastewater treatment from biodiesel plants

วรเมธ เวทยนุกูล, พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ*

Woramate Vetayanugul, Peerakarn Banjerdkij*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pbanjerdkij@gmail.com

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบ Membrane bioreactor (MBR) เป็นกระบวนการที่ก้าวหน้าสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง งานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) ชนิด Poreflon และชนิด Sterapore ในระบบบำบัดน้ำเสีย MBR สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil: CPO) เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ดำเนินงานตลอดระยะเวลา 14 เดือน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของเมมเบรนให้มีความเหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้น พบว่า Hollow fiber ชนิด Poreflon และชนิด Sterapore มีความเหมาะสมกับการใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตไบโอดีเซล โดย Hollow fiber ชนิด Poreflon มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD, COD, Oil and Grease และ TSS ที่ 99.85% (±0.17), 99.14% (±0.24), 98.68% (±0.73) และ 96.07% (±1.84) ตามลำดับ ส่วน Hollow fiber ชนิด Sterapore มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD, COD, Oil and Grease และ TSS ที่ 99.92% (±0.07), 98.99% (±0.70), 98.89% (±0.59) และ 94.58% (±2.00) ตามลำดับ

คำสำคัญ: Hollow fiber, Membrane bioreactor (MBR), Poreflon, Sterapore

Abstract

Membrane bioreactor (MBR) technology is a breakthrough process for treating high concentrations of wastewater. This research studies the efficiency of hollow fiber, Poreflon, and Sterapore membranes in MBR for treating wastewater from biodiesel plants that use crude palm oil (CPO) as feedstock. The MBR was running for 14 months. The objective is to consider the efficiency of membrane wastewater treatment to be suitable for the nature of the wastewater generated. It was found that hollow fiber, Poreflon, and Sterapore types were suitable for treatment. Wastewater from biodiesel plant by Poreflon hollow fiber has BOD, COD, Oil and Grease, and TSS removal efficiency were 99.85% (±0.17), 99.14% (±0.24), 98.68% (±0.73) and 96.07% (±1.84), respectively. Sterapore hollow fiber has BOD, COD, Oil and Grease, and TSS removal efficiency were 99.92% (±0.07), 98.99% (±0.70), 98.89% (±0.59), and 94.58%. (±2.00), respectively.

Keywords: Hollow fiber, Membrane bioreactor (MBR), Poreflon, Sterapore

คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีการขยายตัวเป็นอย่างมาก ส่งผลให้ปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมเกิดขึ้นมากตามไปด้วย ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียจึงมีความจำเป็นในการจัดการและควบคุมมลพิษต่าง ๆ เพื่อมิให้สารมลพิษดังกล่าวปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม การนำระบบบำบัดน้ำเสีย MBR หรือถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเมมเบรนซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสูงมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจึงถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากพื้นที่ระบบบำบัดมีขนาดเล็ก และคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดดีกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบทั่วไปสามารถนำน้ำกลับไปใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ระบบยังสามารถรองรับภาวะความผันผวนทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณน้ำเข้าระบบได้เป็นอย่างดี จึงถือเป็นอีกระบบหนึ่งที่มีการพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นโดยการใช้เมมเบรนในลักษณะต่าง ๆ เพื่อให้เกิดจุดเด่นหรือคุณสมบัติในการบำบัดที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ระหว่าง Hollow fiber ชนิด Poreflon กับชนิด Sterapore โดยการวิเคราะห์จากลักษณะคุณภาพน้ำทิ้งซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ดังนี้ ความเป็นกรดและด่าง (pH) อุณหภูมิ BOD COD Oil and Grease และ TSS

วิธีการวิจัย

ข้อมูลน้ำเสียที่ใช้ศึกษา

น้ำเสียสำหรับการวิจัยเป็นน้ำเสียจริงที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ CPO เป็นวัตถุดิบ น้ำเสียจึงมีความสกปรกทั้งในรูปของไขมัน น้ำมัน และสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูง และมีลักษณะทางกายภาพเป็นสีขาวขุ่น น้ำเสียจากกระบวนการผลิตถูกนำไปบำบัด 2 แห่ง ได้แก่ Wastewater Treatment Plant 1 (WWTP1) ที่ใช้ Hollow fiber ชนิด Poreflon และ Wastewater Treatment Plant 2 (WWTP2) ที่ใช้ Hollow fiber ชนิด Sterapore

รายละเอียดของเมมเบรนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

เมมเบรนสำหรับการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ Hollow fiber ชนิด Poreflon และ Hollow fiber ชนิด Sterapore โดยที่เมมเบรนแต่ละชนิดถูกใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ที่ WWTP1 และ WWTP2 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดแสดงดัง Table 1

Table 1 Specifications of membrane

Membrane	Specifications	
Product name	POREFLON (SPMW-12B12)	STERAPORE (50E0025SA)
Material	Hydrophilic treated PTFE	Polyvinylidene fluoride (PVDF)
Dimensions (D×W×H) (mm)	154×162×2,410	30×1,250×2,000
Nominal pore size (μm)	0.1	0.4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เก็บน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ของ WWTP1 (Poreflon) และ WWTP2 (Sterapore) และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสีย MBR แสดงดัง Table 2 ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานอุณหภูมิของระบบบำบัดน้ำเสีย MBR อยู่ในช่วง 33–37 °C และค่า pH ของน้ำเสียขาเข้าอยู่ที่ 3–6 ส่วนน้ำเสียขาออกอยู่ที่ 7–9

Table 2 MBR performance assessment

Parameter	Poreflon			Sterapore		
	Mean Influent (mg/L)	Mean Effluent (mg/L)	Mean Removal efficiency (%)	Mean Influent (mg/L)	Mean Effluent (mg/L)	Mean Removal efficiency (%)
BOD	3,653 (±734)	5 (±3)	99.85 (±0.17)	4,354 (±1,354)	3 (±3)	99.92 (±0.07)
COD	7,107 (±1,020)	58 (±17)	99.14 (±0.24)	8,383 (±2,199)	65 (±33)	98.99 (±0.70)
Oil and Grease	322 (±112)	3 (±1)	98.68 (±0.73)	338 (±99)	3 (±1)	98.89 (±0.59)
TSS	219 (±198)	5 (±0.29)	96.07 (±1.84)	382 (±60)	7 (±1)	94.58 (±2.00)

ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD

น้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ของ WWTP1 และ WWTP2 ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานตั้งแต่เดือนที่ 1–14 พบว่า น้ำเสียขาเข้า WWTP1 มีค่า BOD อยู่ระหว่าง 1,890–7,972 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า BOD อยู่ระหว่าง 1–19 mg/L ส่วน WWTP2 น้ำเสียขาเข้ามีค่า BOD อยู่ระหว่าง 1,650–12,060 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า BOD อยู่ระหว่าง 1–13 mg/L แสดงดัง Fig. 1 จะเห็นได้ว่าค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าของ WWTP1 และ WWTP2 มีค่าสูงขึ้นผิดปกติเกิดจากการที่ระบบบำบัดน้ำเสียได้รับความเข้มข้นของความสกปรกที่มากขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Shock load) จึงแสดงออกเป็นค่า COD นอกจากนี้ค่า COD จะแปรผันตรงกับค่า BOD ส่งผลให้ค่า BOD มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย MBR มีประสิทธิภาพสูงทำให้ค่า BOD ของน้ำเสียขาออกของ WWTP1 และ WWTP2 มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ค่ามาตรฐานของ BOD ไม่เกิน 20 mg/L)

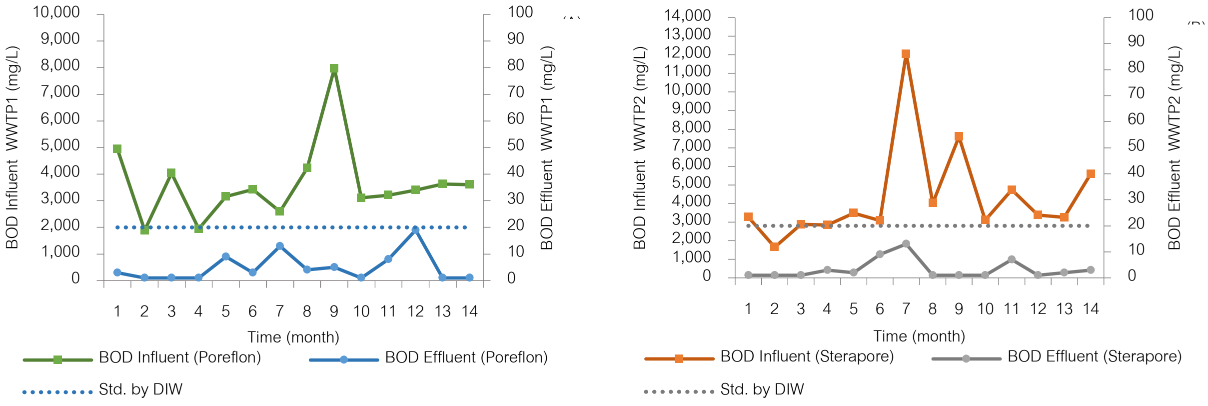


Fig. 1 BOD values of wastewater treatment (A) WWTP1 (B) WWTP2

เมื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของ Poreflon และ Sterapore พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD อยู่ในช่วง 99.44%–99.98% (±0.17) และ 99.71%–99.99% (±0.07) ตามลำดับ (Fig. 2) จะเห็นได้ว่าทั้ง Poreflon และ Sterapore มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับประสิทธิภาพของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (HF-MBR) ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นปิโตรเลียมจริงของบริษัท Arak Refinery มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD เฉลี่ยอยู่ที่ 89% (Razavi and Miri, 2015) นอกจากนี้ยังมีการนำระบบบำบัดน้ำเสีย MBR มาใช้ในการบำบัดน้ำชะขยะฝังกลบที่มีค่า BOD ขาเข้าอยู่ประมาณ 440–1,537 mg/L โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Hollow fiber กับ Flat sheet ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน พบว่า Hollow fiber สามารถบำบัด BOD ได้ดีกว่าถึง 92.2% (Hashisho, et al., 2016) รวมไปถึงการใช้ Hollow fiber ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยสามารถบำบัด BOD ได้อย่างมีประสิทธิภาพถึง 93% (Ji, et al., 2021)

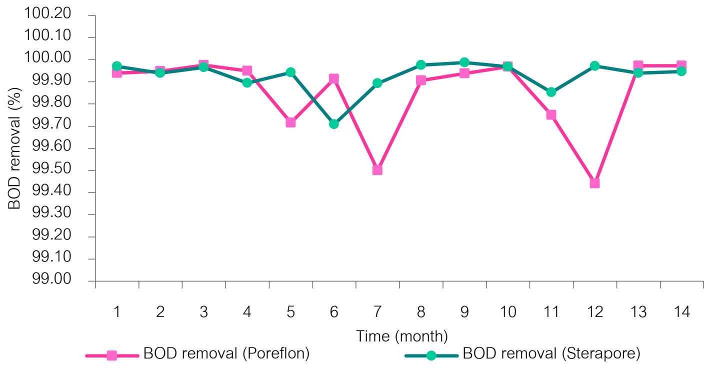


Fig. 2 The BOD removal efficiency during the operation time

ประสิทธิภาพในการบำบัด COD

น้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ของ WWTP1 และ WWTP2 ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานตั้งแต่เดือนที่ 1–14 พบว่า น้ำเสียขาเข้า WWTP1 มีค่า COD อยู่ระหว่าง 3,930–14,730 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า COD อยู่ระหว่าง 21–91 mg/L ส่วน WWTP2 น้ำเสียขาเข้ามีค่า COD อยู่ระหว่าง 3,755–23,783 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า COD อยู่ระหว่าง 12–150 mg/L แสดงดัง Fig. 3 จะเห็นได้ว่าค่า COD ของน้ำเสียขาเข้าของ WWTP1 และ WWTP2 มีค่าสูงเนื่องจากโรงงานใช้ Methanol ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี Transesterification เพื่อผลิตไบโอดีเซล (B100) และมี Glycerin เป็นผลพลอยได้ ซึ่ง Methanol และ Glycerin ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้ COD มีค่าสูงขึ้น แต่ด้วย WWTP2 เกิดการชำรุดของชั้นตัวกลาง (Media) ที่ใช้เป็นที่ยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ Anaerobic filter ส่งผลต่อค่า COD ขาออกสูงเกินมาตรฐาน นอกจากนี้ค่า COD ของน้ำเสียขาเข้านั้นสอดคล้องกับ Hashisho, et al. (2016) ที่ศึกษาถึงความสามารถของระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ในการรองรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้น COD สูงของน้ำเสียจากน้ำชะขยะแบบฝังกลบโดยมีค่า COD ขาเข้าอยู่ที่ 3,900–7,800 mg/L หากเป็นน้ำเสียอุตสาหกรรมมักมีค่า COD ขาเข้าอยู่ที่ 12,000–57,000 mg/L (Judd, 2015)

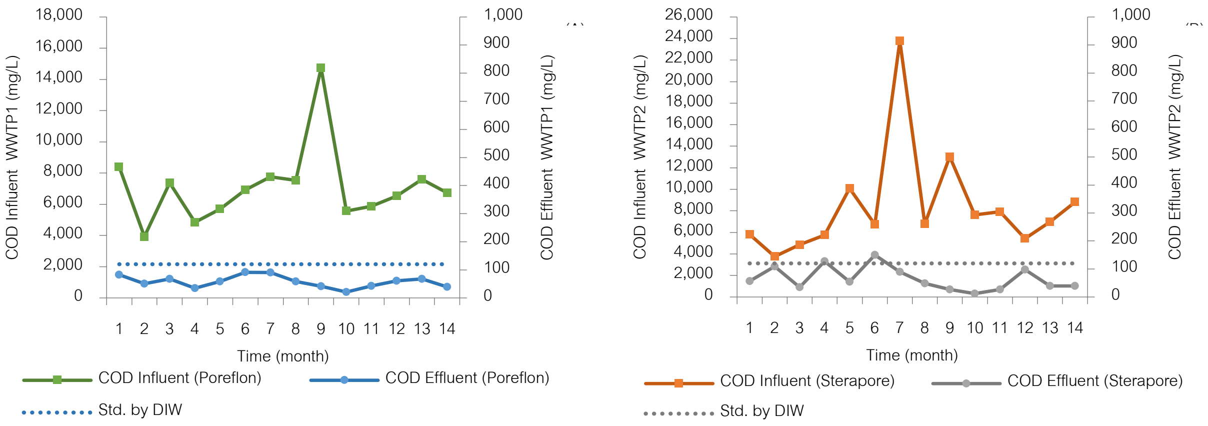


Fig. 3 COD values of wastewater treatment (A) WWTP1 (B) WWTP2

เมื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของ Poreflon และ Sterapore พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด COD อยู่ในช่วง 98.68%–99.72% (±0.24) และ 97.10%–99.84% (±0.70) ตามลำดับ (Fig. 4) จะเห็นได้ว่าทั้ง Poreflon และ Sterapore มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของ Safa, et al. (2014); Razavi and Miri, (2015) และ Yu, et al. (2018) ที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD อยู่ที่ 97.3% 82% และ 96% ตามลำดับ

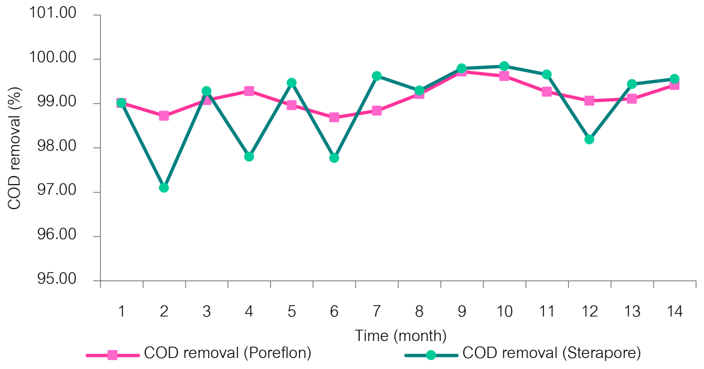


Fig. 4 The COD removal efficiency during the operation time

ประสิทธิภาพในการบำบัด Oil and Grease

น้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ของ WWTP1 และ WWTP2 ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานตั้งแต่เดือนที่ 1–14 พบว่า น้ำเสียขาเข้า WWTP1 มีค่า Oil and Grease อยู่ระหว่าง 61–1,204 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า Oil and Grease อยู่ระหว่าง 0–6 mg/L ค่า Oil and Grease สูงสุดอยู่ที่ 6 mg/L ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ค่ามาตรฐานของ Oil and Grease ไม่เกิน 5 mg/L) เนื่องจากในกระบวนการผลิตเกิดการสูญเสียน้ำมันและปนเปื้อนออกมากับน้ำเสีย ส่วน WWTP2 น้ำเสียขาเข้ามีค่า Oil and Grease อยู่ระหว่าง 60–1,684 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า Oil and Grease อยู่ระหว่าง 0–5 mg/L แสดงดัง Fig. 5

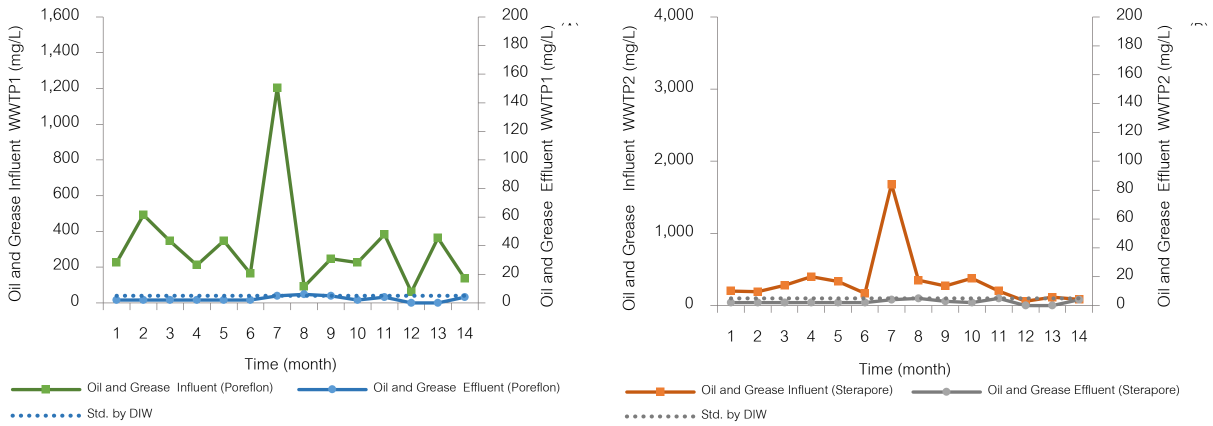


Fig. 5 Oil and Grease values of wastewater treatment (A) WWTP1 (B) WWTP2

เมื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัด Oil and Grease ของ Poreflon และ Sterapore พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด Oil and Grease อยู่ในช่วง 93.48%–100% (±0.73) และ 95.24%–100% (±0.59) ตามลำดับ (Fig. 6) จะเห็นได้ว่าทั้ง Poreflon และ Sterapore มีประสิทธิภาพในการบำบัด Oil and Grease อย่างสูง สอดคล้องกับการศึกษาของ Hasan, et al. (2011) ในการบำบัด Oil and Grease จากน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ระหว่าง 91.1%–98.7% นอกจากนี้ Alkmim, et al. (2017) ศึกษาศักยภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นปิโตรเลียมนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด Oil and Grease เฉลี่ยอยู่ที่ 99.9%

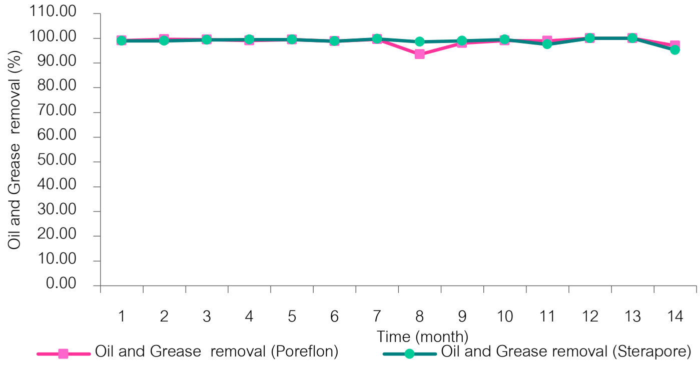


Fig. 6 The Oil and Grease removal efficiency during the operation time

ประสิทธิภาพในการบำบัด TSS

น้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย MBR ของ WWTP1 และ WWTP2 ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานตั้งแต่เดือนที่ 1–14 พบว่า น้ำเสียขาเข้า WWTP1 มีค่า TSS อยู่ระหว่าง 48–1,044 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า TSS อยู่ระหว่าง 2–24 mg/L ส่วน WWTP2 น้ำเสียขาเข้ามีค่า TSS อยู่ระหว่าง 70–3,340 mg/L และน้ำเสียขาออกมีค่า TSS อยู่ระหว่าง 2–43 mg/L แสดงดัง Fig. 7

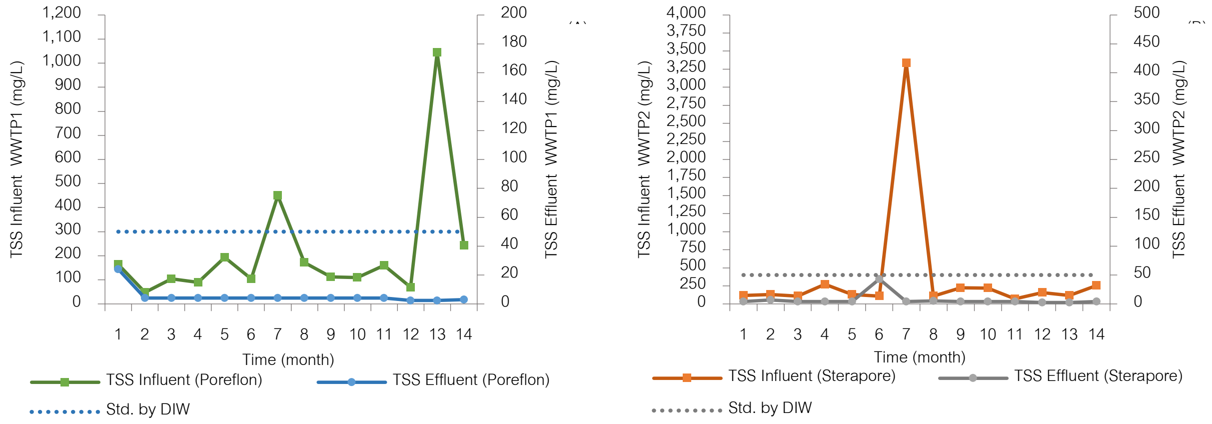


Fig. 7 TSS values of wastewater treatment (A) WWTP1 (B) WWTP2

เมื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของ Poreflon และ Sterapore พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด TSS อยู่ในช่วง 85.37%–99.77% (±1.84) และ 60.55%–99.88% (±2) ตามลำดับ (Fig. 8) สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของ Sterapore ที่ 60.55 % นั้นเกิดจาก WWTP2 พบปัญหาการชำรุดของ Media ในระบบ Anaerobic Filter และการขาดของเมมเบรนส่งผลให้ค่า TSS และค่า COD ในเดือนที่ 6 สูงขึ้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ของ Poreflon และ Sterapore สอดคล้องกับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการบำบัด TSS อยู่ที่ 98% (Isma, et al., 2014) และหากใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงในการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นปิโตรเลียมจริง โดยมีค่า TSS ขาเข้าอยู่ที่ 2,100 mg/L พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด TSS อยู่ที่ 98% (Razavi and Miri, 2015)

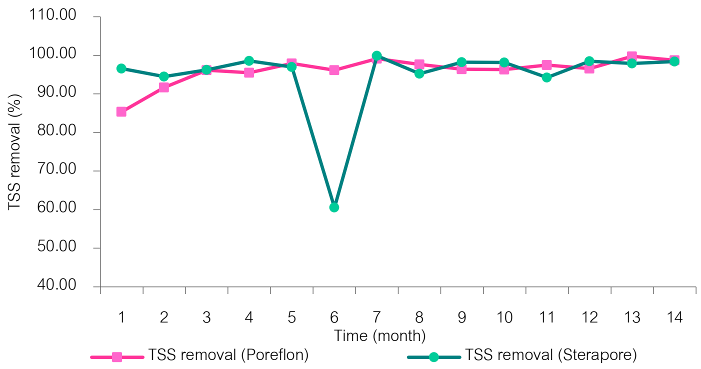


Fig. 8 The TSS removal efficiency during the operation time

สรุป

เมมเบรนแบบ hollow fiber ทั้งชนิด Poreflon และ Sterapore มีความเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียจริงที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ CPO เป็นวัตถุดิบตั้งต้น เพราะมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด BOD COD Oil and Grease และ TSS ทั้งนี้ในการเลือกใช้งานอาจพิจารณาถึงพื้นที่ในการติดตั้งหรืองบประมาณเพื่อให้เกิดความเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรกานต์ บรรเจิดกิจ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นางสาวธิดารัตน์ จิตเจนสุวรรณ (นิสิตปริญญาเอก) รวมทั้ง

คณาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่อนุเคราะห์ให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ และติดตามการทำวิจัยอย่างใกล้ชิดจนทำให้งานวิจัยประสบความสำเร็จ ขอขอบคุณบริษัท บีบีจีไอ ไบโอดีเซล จำกัด ที่เอื้อเฟื้อทรัพยากรสำหรับการวิจัย สถานที่และห้องปฏิบัติการตลอดจนให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคและความร่วมมือในด้านต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

Hasan, D.B., Ghengesh, M.K., Abu Hassan, M.A., et al. 2011. Use of a membrane bioreactor in effluent treatment from electroplating industry: Oil and grease. National Postgraduate Conference. 2011: 1–3. doi.org/10.1109/natpc.2011.6136254

Isma, A.M.I., Idris, A., Omar, R., Razreena, P.A.R. 2014. Effects of SRT and HRT on treatment performance of MBR and membrane fouling. International Science Index, Environmental and Ecological Engineering 8: 448–492.

Safa, M., Alemzadeh, I., Vossoughi, M. 2014. Oily wastewater treatment using membrane bioreactor. Int. J. Glob. Warm. 6: 295–302. doi.org/10.1504/IJGW.2014.061024

Judd, S.J. 2015. The status of industrial and municipal effluent treatment with membrane bioreactor technology, Chem. Eng. J. 305: 37–45. doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.141

Razavi, S.M.R., Miri, T. 2015. A real petroleum refinery wastewater treatment using hollow fiber membrane bioreactor (HF-MBR), J. Water Process. Eng. 8: 136–141. doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.09.011

Hashisho, J., El-Fadel, M., Al-Hindi, M., Salam, D., Alameddine, I. 2016. Hollow fiber vs. flat sheet MBR for the treatment of high strength stabilized landfill leachate. Waste Management. 55: 249–256. doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.016

Alkmim, A.R., Costa, P.R., Moser, P.B., Neta, L.S.F., Santiago, V.M.J., Cerqueira, A.C., Reis, B.G., Amaral, M.C.S. 2017. Potential use of membrane bioreactor to treat petroleum refinery effluent: comprehension of dynamic of organic matter removal. Bioprocess Biosyst. Eng. 40: 1839–1850. doi.org/10.1007/s00449-017-1837-4

Yu, L., Yang, Y., Yang, B., Li, Z., Zhang, X., Hou, Y., Lei, L., Zhang, D. 2018. Effects of solids retention time on the performance and microbial community structures in membrane bioreactors treating synthetic oil refinery wastewater, Chem.Eng. J. 344: 462-468 doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.073

Ji, J., Chen, Y., Hu, Y., et al. 2021. One-year operation of a 20-L submerged anaerobic membrane bioreactor for real domestic wastewater treatment at room temperature: Pursuing the optimal HRT and sustainable flux. Sci. Total Environ. 775: 145799. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145799

การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่

The study of mobile aqua purifier system

อรปรีดา ชื่นตา, พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ*

Onpreda Chuenta, Peerakarn Banjerdkij*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pbanjerdkij@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่ ด้วยระบบการกรอง 4 ระดับ ได้แก่ ระบบกรองหยาบด้วยไส้กรองแบบเส้นเชือกโพลีโพรพิลีน ระบบกรองละเอียดด้วยไส้กรองแบบเซรามิก ระบบกรองดูดซับด้วยไส้กรองคาร์บอนบล็อกและระบบการกรองแบบเยื่อนาโนเมมเบรน ด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO) โดยใช้บ่อน้ำสาธารณะ บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร เป็นแหล่งน้ำดิบที่ทำการศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินและประสิทธิภาพการปรับปรุงน้ำของเครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่ รวมถึงพิจารณาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จากผลการศึกษาพบว่าแหล่งน้ำดิบ จัดอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 5 เนื่องจากมีค่า BOD 4.4 mg/L ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดของมาตรฐานน้ำประเภทที่ 2–4 เมื่อพิจารณาผลของพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาพบว่า คุณภาพของน้ำที่ผ่านเครื่องผลิตน้ำสะอาดมีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานน้ำอุปโภคและบริโภคกำหนด เพื่อให้ครอบคลุมถึงมาตรฐานน้ำอุปโภคบริโภคควรศึกษาถึงพารามิเตอร์เพิ่มเติมในงานวิจัยถัดไป

คำสำคัญ: กระบวนการกรองน้ำ, เครื่องผลิตน้ำสะอาด, คุณภาพของน้ำ, น้ำผิวดิน

Abstract

This research was the efficiency study of a Mobile Aqua Purifier (MAP) with a 4-stage filtration system: a coarse filtration with a polypropylene filter, ceramic filtration, carbon block filtration, and RO membrane filter. Source of water, public well in the area of the Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, was selected for this study. The objective of this research was the improving of water quality from natural water resource and studying the efficiency of MAP. The results of the study showed that the raw water sources are classified as the surface water “Type 5” because its BOD is about 4.4 mg/L, which is higher than surface water “Type 2–4”. The results of the parameters in this study illustrated that the water quality that treated by Mobile Aqua Purifier was met the standard of both water supply and drinking water.

Keywords: Aqua purifier, Surface water, Water filtration process, Water quality

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีแนวโน้มที่จะผลักดันให้ประเทศไทยตกอยู่ในภาวะเสี่ยงจากผลกระทบในรูปแบบของภัยพิบัติต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุทกภัยหรือแม้กระทั่งภัยแล้งล้วนแต่เกิดขึ้นจากธรรมชาติ โดยที่มนุษย์ไม่อาจล่วงรู้ถึงเวลาของการเกิดที่แน่นอนได้ จึงเป็นภัยที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ปัญหาการขาดแคลนน้ำสะอาดเพื่ออุปโภคบริโภคมักเป็นปัญหาหลักๆ ที่ประชาชนมักประสบในช่วงภัยพิบัติ โดยเฉพาะเหตุการณ์น้ำท่วมเป็นเหตุการณ์ที่พบได้บ่อย ที่ถึงแม้จะมีน้ำเจิ่งนองมากมาย แต่ก็ไม่สามารถจะนำมาเพื่ออุปโภคบริโภคได้ อีกทั้งน้ำท่วมยังเป็นสาเหตุให้เกิด การระบาดของโรคก่อให้เกิดการปนเปื้อนไปยังแหล่งน้ำ (Cann et al., 2013)

ในสถานการณ์ฉุกเฉินการเข้าถึงน้ำดื่มสำหรับผู้ประสบภัยจึงเป็นสิ่งสำคัญระดับต้นๆ ด้วยเหตุนี้การนำเทคโนโลยีสำหรับการผลิตน้ำสะอาดเข้ามาช่วยเหลือผู้ประสบภัยจึงเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ยั่งยืนกว่าการ ขนส่งน้ำดื่มบรรจุขวด (Loo และคณะ, 2012) อย่างไรก็ตามโดยลักษณะสมบัติทั่วไปของน้ำในภาวะน้ำท่วมจะประกอบไปด้วยสารแขวนลอยที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ถูกน้ำพัดพามา และละลายน้ำที่มาจากแหล่งที่ไม่สามารถกำหนดได้ (Non-Point source) ซึ่งอาจจะมีสารพิษปนเปื้อนอยู่ รวมถึงเชื้อโรคในรูปแบบต่างๆ (Davis and Cornwel, 1991) ดังนั้นการผลิตที่ต้องการน้ำที่สะอาดเหมาะแก่การอุปโภคบริโภค ในกรณีที่น้ำดิบ มีสิ่งปนเปื้อนสูงกว่าค่าที่กำหนดมาตรฐานน้ำดื่ม จะต้องมีวิธีการกำจัดสิ่งปนเปื้อนเหล่านั้นออกก่อน จึงนำไปผลิตน้ำสะอาด โดยทางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับ ผศ.ดร มณฑร ฐานุตตมวงศ์ และคณะ ได้พัฒนาเครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่ เพื่อแจกจ่ายกับประชาชนผู้ได้รับผลกระทบจากมหาอุทกภัยใหญ่ ในปี พ.ศ. 2554

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาต่อยอดถึงประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่ (Mobile Aqua Purifier v.3.2, MAP 3.2) โดยทำการศึกษาปรับปรุงคุณภาพของน้ำผิวดินในบ่อน้ำสาธารณะ บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษากับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่ออุปโภคบริโภค เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณานำเครื่องผลิตน้ำสะอาดไปใช้ประโยชน์ในการบรรเทาความเดือดร้อนแก่ผู้ประสบภัยในสภาวะขาดแคลนน้ำ ที่สามารถนำน้ำผิวดินมาผลิตเป็นน้ำสะอาดได้ โดยเครื่องผลิตน้ำสะอาดประกอบไปด้วยระบบการกรอง 4 ระดับ ได้แก่ (1) ระบบกรองหยาบด้วยไส้กรองแบบเส้นเชือกโพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ถูกนำมาเป็นการกรองขั้นตอนแรกเพื่อกรอง ผง ฝุ่น สารแขวนลอย และสิ่งสกปรกต่างๆ ที่มากับน้ำ (2) ระบบกรองละเอียดด้วยไส้กรองแบบเซรามิก (Ceramic filter) ที่มีความสามารถในการกรองเชื้อแบคทีเรียได้ดี (3) ระบบกรองดูดซับด้วยไส้กรองคาร์บอนบล็อก (Carbon block filter) ที่มีความสามารถในการดูดซับ กลิ่น สี สารเคมี และสิ่งสกปรกต่างๆ ภายในน้ำถือเป็นระบบกรองที่สำคัญในการผลิตน้ำดื่ม และ (4) ระบบการกรองขั้นสูงด้วยไส้กรองแบบเยื่อเมมเบรนระดับนาโน ด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) เป็นไส้กรองที่สามารถกรองได้ถึงระดับนาโนเมตร จึงทำให้มีเพียงโมเลกุลขนาดเล็กของน้ำเท่านั้นจึงมีความสามารถในการกรอง แบคทีเรีย เชื้อไวรัส โลหะหนัก และสารพิษได้

วิธีการดำเนินการศึกษา

บริเวณที่ทำการศึกษา

น้ำผิวดินที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นน้ำมาจากบ่อน้ำสาธารณะบริเวณหน้าศูนย์อาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แสดงตำแหน่งดัง Fig. 1 ซึ่งเป็นบ่อน้ำระบบปิดที่มีลักษณะเป็นลำรางยาว มี

เนื้อที่ประมาณ 1,300 ตารางเมตร และมีความลึกของน้ำประมาณ 1 เมตร บ่อน้ำบริเวณหน้าศูนย์อาหารฯ เป็นจุดรวมน้ำที่มาจากแหล่งกำเนิดได้แก่ น้ำฝน น้ำชะล้างจากถนน น้ำทิ้งระบายจากโรงอาหารและกลุ่มอาคารข้างเคียง เป็นต้น

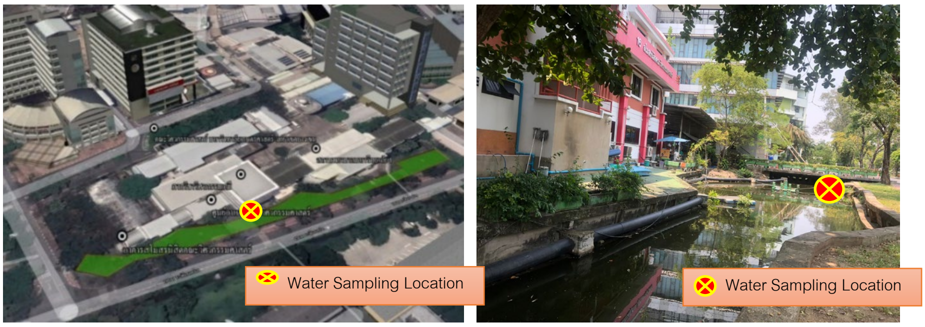


Fig. 1 Water sampling location at public pond, Faculty of engineering, Kasetsart University, Bangkok

การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (Grap sampling) ครั้งเดียวที่จุดเดียวในเวลาใดเวลาหนึ่ง แล้วนำมาวิเคราะห์ ซึ่งการเก็บตัวอย่างแบบนี้จะทำให้ทราบถึงลักษณะคุณสมบัติของแหล่งน้ำเฉพาะจุดและทำให้เห็นความผันแปรของคุณภาพน้ำได้อย่างชัดเจน โดยการเก็บน้ำตัวอย่างในการศึกษานี้ เลือกเก็บตัวอย่างบริเวณกลางบ่อน้ำที่ความลึกจากผิวน้ำประมาณ 20–30 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นช่วงความลึกที่แบคทีเรียดำรงชีวิตอยู่ได้ดี เหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่า BOD และค่า DO เป็นต้น โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 10 ตัวอย่าง ช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2565 ถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2565 ช่วงเวลา 8.00–9.00 น. เป็นช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่าง เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มีความแปรผันของอุณหภูมิและกิจกรรมการระบายน้ำลงสู่บ่อเก็บตัวอย่างค่อนข้างต่ำ ซึ่งตัวอย่างน้ำที่เก็บได้จะถูกเก็บรักษาสภาพที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าคุณภาพ โดยค่าคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวิเคราะห์ในภาคสนามทันที ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ (Water temperature) และความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) และคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการได้แก่ ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total dissolved solids, TDS) ออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved oxygen, DO) ค่าบีโอดี (Biological oxygen demand, BOD) สภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ (Electrical Conductivity, EC) ความขุ่น (Turbidity) ความเค็ม (Salinity) ไนเตรต (Nitrate) และไนไตรท์ (Nitrite) โดยตัวอย่างน้ำจากการเก็บครั้งที่ 1 ได้ทำการเพิ่มการตรวจวิเคราะห์หาแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total coliform bacteria) แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (Fecal coliform bacteria) เพื่อเป็นข้อมูลในการระบุประเภทของแหล่งน้ำผิวดินที่ทำการศึกษา และพิจารณาถึงประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำทางชีวภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาด

เครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่

เครื่องผลิตน้ำสะอาดแบบเคลื่อนที่ (Mobile Aqua Purifier, MAP 3.2) ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย ผศ.ดร มณฑร ฐานุตตมวงศ์ และนายปรัชญา จันทร์ศักดิ์ ร่วมกับนิสิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อช่วยบรรเทาความเดือดร้อนของประชาชนในด้านการขาดแคลนน้ำสะอาดในช่วงอุทกภัย เป็นเครื่องผลิตน้ำสะอาดด้วยระบบที่ไม่ต้องพึ่งพลังงานไฟฟ้า ตัวระบบถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานได้โดยอาศัยหลักของพลังงานกล ซึ่งสามารถใช้คนเพียงหนึ่งคนในการดำเนินการ และประยุกต์หลักการอัดลมเพื่อเพิ่มแรงดันในระบบกรองเพื่อสร้างแรงดันให้ระบบสามารถดันน้ำผ่านไส้กรองที่มีความละเอียดระดับนาโนเมตรได้ ดังแสดงใน Fig. 2 การจัดเรียง

อุปกรณ์และชั้นกรองของเครื่อง MAP 3.2 ถูกออกแบบให้สามารถลดการสะสมตัวของตะกอนบนผิวไส้กรอง และมีวาล์วจ่ายน้ำแยกประเภทสำหรับเพื่อการอุปโภคและบริโภค ดังแสดงใน Fig. 3 ซึ่งในระหว่างการเปิดใช้น้ำอุปโภค จะเกิดการพัดพาและระบายตะกอนที่ติดค้างบนผิวของไส้กรองเมมเบรนให้หลุดออกไป เปรียบเสมือนการทำความสะอาดตัวเองขณะใช้งาน อย่างไรก็ตามเมื่อสิ่งปนเปื้อนหรือตะกอนเกาะบนผิวไส้กรองมากจนถึงขีดจำกัดจนกระทั่งไส้กรองเกิดการอุดตันแบบสมบูรณ์ ความสามารถในการผลิตน้ำสะอาดจะลดลงจนถึงไม่สามารถใช้การได้ในที่สุด แต่ผู้ใช้ก็สามารถเปลี่ยนไส้กรองได้ด้วยตัวเองเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างต่อเนื่อง

Fig. 2 Mobile aqua purifier

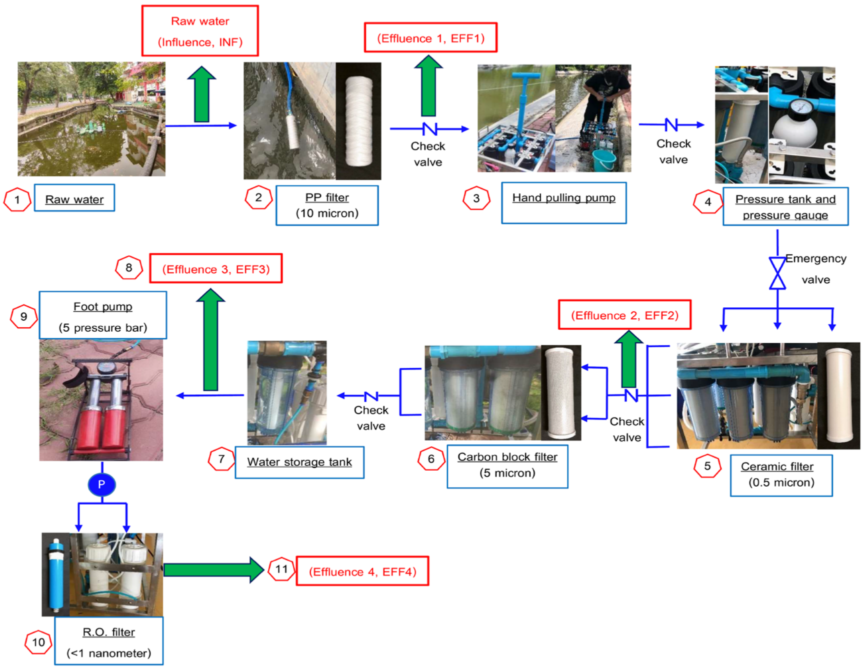


Fig. 3 Process and flow diagram of mobile aqua purifier

ผลการวิจัย

คุณภาพน้ำผิวดินและมาตรฐานน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค

จากการดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินที่ทำการศึกษา แล้วทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั้ง 5 ระดับของกระบวนการผลิตน้ำสะอาด ได้แก่ น้ำดิบ (Influence, INF) น้ำผ่านการกรองด้วยไส้กรองเส้นเชือก (Effluence 1, EFF1) น้ำผ่านการกรองด้วยไส้กรองเซรามิก (Effluence 2, EFF2) น้ำผ่านการกรองด้วยไส้กรองคาร์บอนบล็อค (Effluence 3, EFF3) และ น้ำผ่านการกรองด้วยไส้กรองเมมเบรน ด้วยระบบ RO (Effluence 4, EFF4) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำแสดงไว้ดัง Table 1

Table 1 Water quality of Sampling water No.1 at Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok

Parameters	Standard PWA**	Standard DH***	Purification level INF	EFF 1	EFF 2	EFF 3	EFF 4
Temperature (˚C)	-	-	33.3	34.3	33.3	32.7	32.5
pH	6.5-8.5	6.5-8.5	8.0±0.1*	7.8±0.0	7.6±0.1	7.6±0.0	7.7±0.0
DO (mg/L)	-	-	5. 52*	5.88	6.44	7.08	7.25
Turbidity (NTU)	< 4	< 5	7.3±0.0	5.3±0.1	2.7±0.0	2.4±0.1	0.9±0.0
Salinity (ppt%)	-	-	3.0±0.0	2.8±0.0	2.4±0.0	2.4±0.0	1.6±0.0
EC (μs/cm)	-	-	548.0±1.0	507.0±1.0	486.3±0.6	409.7±2.5	324.0±1.0
TDS (mg/L)	< 600	< 500	295.0±1.0	190.7±1.2	166.5±2.1	148.7±2.3	137.0±1.0
Nitrate (mg/L)	< 50	< 50	3.7*	-	-	3.63	3.42
Nitrite (mg/L)	< 3	< 3	5.28	-	-	1.43	1.37
BOD (mg/L)	-	-	4.4±0.6*	3.5±0.4	3.5±1.0	2.0±0.3	1.3±0.7
Total Coliform (MPN/100mL)	Not found	Not found	22,000*	-	-	-	Not found
Fecal/Coliform (MPN/100mL)	Not found	Not found	4,000*	-	-	-	Not found

Note: Mean±SD. in the same row carrying different superscripts were significantly different. * = Parameter to consider the type of surface water. ** = Standard of Provincial Waterworks Authority, Thailand. *** = Standard of Department of Health, Thailand. - = Unconsidered

จาก Table1 ณ ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างน้ำดิบที่อุณหภูมิของน้ำอยู่ที่ 33.3 ºC และ pH มีค่าเท่ากับ 8.0±0.1 และเมื่อผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาดด้วยระบบกรอง EFF4 pH ของน้ำมีค่าเท่ากับ 7.7±0.0 ซึ่งอยู่ในช่วงความเป็นกลางทางกรด-ด่างและมีค่าที่อยู่ภายในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค (Provincial Waterworks Authority, PWA) (การประปาส่วนภูมิภาค, 2559) และเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย (Department of Health, DH) (กรมอนามัย, 2563) ที่ระบุให้น้ำอุปโภคบริโภคควรมี pH มีค่าอยู่ในช่วง 6.0–8.5 อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างค่า pH กับสุขภาพของมนุษย์เป็นเรื่องยากที่จะระบุได้ เนื่องจากค่า pH มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับคุณภาพน้ำในด้านอื่นๆ การบริโภคอาหารและเครื่องดื่มที่มีค่า pH ค่อนข้างต่ำหรือสูงเป็นเรื่องปกติและไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ เช่น เครื่องดื่มอัดลมบางชนิดมีค่า pH 2.5 น้ำส้มมีค่า pH ประมาณ 3.8 และค่า pH ของนมเท่ากับ 6.7 เป็นต้น แต่มุมมองของการผลิตน้ำสะอาดค่า pH อาจจะมีความสัมพันธ์ต่อความเป็นกรด-ด่างของปริมาณของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งอาจมีผลต่อคุณภาพของน้ำอุปโภคบริโภค (Australian Drinking Water Guidelines 6, 2011)

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำดิบ (INF) กับเกณฑ์การกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537 พบว่าหากพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะผลของพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา แหล่งน้ำดิบที่ทำการศึกษาจะถูกจัดอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 5 เนื่องจากมีค่า BOD 4.4 mg/L ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดของมาตรฐานน้ำประเภทที่ 2–4 ที่กำหนดค่า BOD ไว้ที่ 1.5–4.0 mg/L ตามลำดับ (กรม

ควบคุมมลพิษ, 2563) เนื่องจากแหล่งน้ำที่ทำการศึกษาเป็นแหล่งน้ำที่ไม่เพียงแต่รองรับน้ำฝน แต่รองรับน้ำทิ้งจากโรงอาหารและอาคารข้างเคียง ถึงแม้น้ำจะถูกบำบัดด้วยถังบำบัดประจำอาคารมาแล้ว แต่ก็ยังคงทำให้ค่า BOD ในแหล่งน้ำมีค่าที่เกินกว่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดของมาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 2–4 และเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำตัวอย่างเมื่อผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาดแต่ละระดับการกรองพบว่าผลของพารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำที่ทำการศึกษามีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะน้ำที่ผ่านระบบกรอง EFF3 และ EFF4 ได้ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำอยู่ภายในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค และเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัยกำหนด

ประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำทางกายภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาด

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพของตัวอย่างน้ำดิบ (INF) และตัวอย่างน้ำที่ผ่านกระบวนการกรอง EFF1, EFF2, EFF3 และ EFF4 จำนวน 10 ตัวอย่าง ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟดัง Fig 4. พบว่าในน้ำดิบมีการตรวจพบ TDS มีค่าอยู่ในช่วง 150–300 mg/L และ Turbidity มีค่าอยู่ในช่วง 4–13 NTU เมื่อผ่านกระบวนการกรองพบว่า มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ หากพิจารณาเฉพาะน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาด (EFF4) ตรวจพบว่า TDS มีค่าลดลงอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 mg/L และ Turbidity มีค่าลดลงอยู่ในช่วงไม่เกิน 1.1 NTU ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค และเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย อย่างไรก็ตาม (Australian Drinking Water Guidelines 6, 2011) ได้แนะนำถึงการปรับปรุงน้ำเพื่อการอุปโภค แนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดคือควรบำบัดน้ำให้มี Turbidity ให้ต่ำกว่า 0.1 NTU เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อก่อนนำไปบริโภค เนื่องจาก TDS บ่งบอกถึงปริมาณสารปนเปื้อนอินทรีย์และอนินทรีย์ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเมื่อ TDS มีค่าสูงจึงส่งผลทำให้ Turbidity มีค่าสูงเช่นกัน และเช่นเดียวกับ EC หรือสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ ที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายที่มีประจุละลายอยู่ในน้ำ โดยเฉพาะสารประกอบอนินทรีย์ ที่มีการตรวจพบในแหล่งน้ำดิบอยู่ในช่วง 320–550 μs/cm มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับ TDS และ Turbidity เมื่อผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาด (EFF4) ตรวจพบว่า EC มีค่าลดลงอยู่ในช่วงไม่เกิน 330 μs/cm ซึ่งมาตรฐานในประเทศไทยนั้นยังไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานของ EC ในน้ำสำหรับอุปโภคบริโภค แต่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกาที่กำหนดไว้ (Secondary Maximum Contaminant Level) ซึ่งกำหนดให้สภาพการนำไฟฟ้าของน้ำอุปโภคบริโภคมีค่าไม่ควรเกิน 1,600 μs/cm (California water service company, 2003 อ้างถึงใน ธีรพงษ์ สว่างปัญญางกูร, 2547)

ประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำทางเคมีของเครื่องผลิตน้ำสะอาด

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมีของตัวอย่างน้ำดิบ (INF) และตัวอย่างน้ำที่ผ่านกระบวนการกรอง EFF1, EFF2, EFF3 และ EFF4 จำนวน 10 ตัวอย่าง ตรวจพบว่าในน้ำดิบมี DO หรือค่าออกซิเจนละลายในน้ำ 3.5–6.4 mg/L เมื่อผ่านกระบวนการกรองแต่ละระดับพบว่ามีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาด (EFF4) ตรวจพบว่า DO มีค่าอยู่ในช่วง 5.7–7.5 mg/L อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดีที่ควรมี DO อยู่ในช่วง 5–9 mg/L ดังแสดง Fig. 5 (A) เหตุที่ DO มีแนวโน้มที่สูงขึ้นนั้นส่วนหนึ่ง เป็นผลมาจากเครื่อง MAP3.2 ผลิตน้ำสะอาดด้วยระบบแรงดันอากาศจึงส่งผลให้ออกซิเจนเกิดการละลายในน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะ EFF4 ที่ต้องใช้แรงดันให้มากพอเพื่อเป็นแรงขับน้ำผ่านไส้กรองเมมเบรน แต่หากพิจารณาในส่วนของ BOD ที่เป็นพารามิเตอร์บ่งบอกถึงความสกปรกของน้ำ พบว่าในทุกระดับของกระบวนการกรอง BOD มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยในแหล่งน้ำดิบตรวจพบ BOD มีค่าอยู่ในช่วง 4.33–7.58 mg/L และเมื่อผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาด (EFF4) ตรวจพบว่า BOD มีค่าอยู่ในช่วง 1.04–1.79

mg/L เนื่องจากสารปนเปื้อนอินทรีย์ในน้ำได้ถูกกรองในทุกๆระดับการกรอง โดยมาตรฐานน้ำในประเทศไทยยังไม่มีระบุถึงระดับ BOD ที่เหมาะสมต่อการอุปโภคบริโภค ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ International standards for Drinking water ที่ระบุค่า BOD ไม่ควรเกินกว่า 6 mg/L ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสุขภาพผู้ดื่ม จึงสรุปได้ว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาด (EFF4) มีค่า BOD มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่ม (International standards for Drinking water) ดังแสดง Fig 5 (B) และจากการศึกษาถึงค่าความเค็ม หรือ Salinity พบว่าในแหล่งน้ำดิบในช่วงการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1–3 ตรวจพบว่า Salinity มีค่ามากกว่า ตัวอย่างน้ำครั้งที่ 7–10 เนื่องจากสภาพอากาศในช่วงทำการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 7–10 มีฝนตกลงมาติดต่อกันหลายวัน จึงทำให้ปริมาณน้ำในแหล่งน้ำสูงขึ้นส่งผลให้ Salinity เกิดการเจือจางลง โดยในช่วงการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1–3 ตรวจพบค่า Salinityมีค่าอยู่ในช่วง 2.8–3.0 ppt% เมื่อผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาด (EFF4) ตรวจพบว่า Salinity มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 1.2–2.3 ppt% ซึ่งถึงแม้ Salinity จะถูกกรองออกอย่างมากช่าง EFF4 แต่ก็อาจส่งผลทำให้ไส้กรองเกิดการอุดตันที่ไวขึ้นและอายุการใช้งานเครื่องผลิตน้ำสะอาดที่ลดลงเช่นกัน

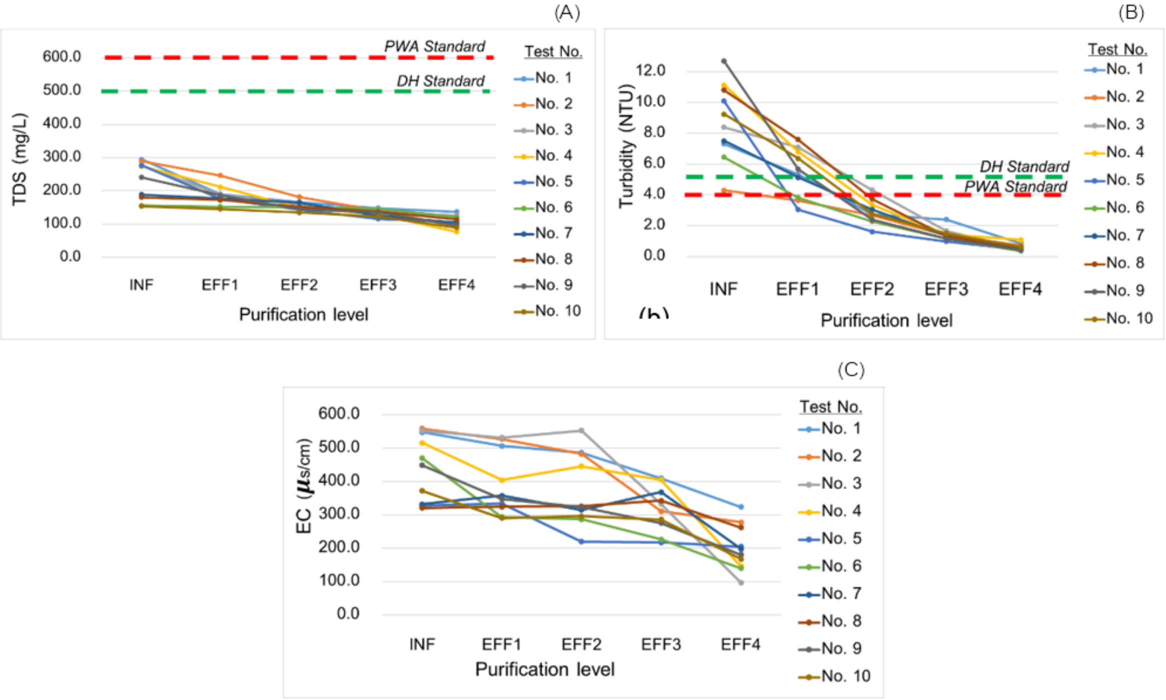


Fig. 4 Parameters of water in purification level. (A) TDS; (B) Turbidity; (C) EC

ประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำทางชีวภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาด

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางชีวภาพของตัวอย่างน้ำดิบ (INF) โดยพิจารณาเฉพาะตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 ด้วยวิธี Multiple tubes fermentation technique หรือ Most Probable Number of coliform organisms (MPN) ตรวจพบปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด และกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์มในน้ำ ปริมาณ 22,000 (MPN/100mL) และ 4,000 (MPN/100mL) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อตัวอย่างน้ำผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาดทั้ง 4 กระบวนการกรอง ตรวจพบว่าไม่พบแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด และกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์มในน้ำตัวอย่าง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค และเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัยกำหนด จึงทำให้สามารถมั่นใจได้ว่าเครื่อง MAP 3.2 มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทางชีวภาพ ซึ่งสามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด และกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์มออกจากน้ำที่ผลิตได้ แต่อย่างไรก็ตามควรจะมีการพิจารณาพารามิเตอร์ตัวอื่นร่วมด้วยตามที่มาตรฐานน้ำดื่มกำหนด

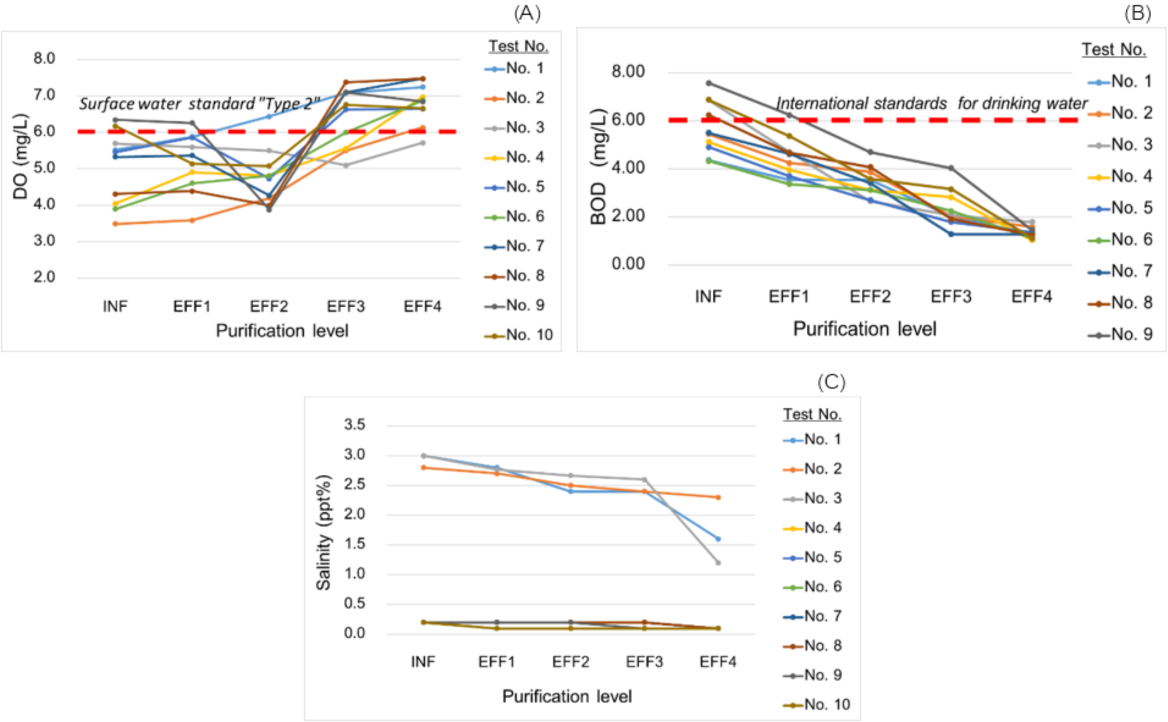


Fig. 5 Parameters of water in purification level. (A) DO; (B) BOD; (C) Salinity

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาถึงประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำสะอาดเคลื่อนที่ด้วยระบบการกรอง 4 ระดับ โดยปรับปรุงคุณภาพของน้ำผิวดินในบ่อน้ำสาธารณะ บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร พบว่าเป็นแหล่งน้ำที่มีความเป็นกลางทางกรด-ด่าง ซึ่ง pH อยู่ในช่วง 7.4–8.6 จัดอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 5 ซึ่งเป็นน้ำประเภทที่มีการปนเปื้อนค่อนข้างสูง ไม่เหมาะต่อการนำมาผลิตน้ำอุปโภคบริโภค เนื่องจากมีค่า BOD 4.4 mg/L ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดของมาตรฐานน้ำประเภทที่ 2–4 เมื่อน้ำดิบผ่านกระบวนการผลิตน้ำสะอาดด้วยระบบการกรอง 4 ระดับพบว่า ในแต่ละระดับการกรองช่วยปรับปรุงน้ำให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คุณภาพของน้ำที่ผ่านการกรอง EFF3 และ EFF4 มีแนวโน้มที่จะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค (การประปาส่วนภูมิภาค, 2559) และคุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย (กรมอนามัย, 2563) กำหนด ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการกรองของเครื่องผลิตน้ำสะอาดมีแนวโน้มที่จะลดลงหากแหล่งน้ำวัตถุดิบมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่สูง ซึ่งการปนเปื้อนที่สูงส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของไส้กรองที่มีโอกาสอุดตันได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาและสรุปผลในส่วนของเฉพาะพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาในอนาคตหรือการพิจารณานำไปใช้งาน ควรพิจารณาในส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อให้สอดคล้องกับที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารอ้างอิง

การประปาส่วนภูมิภาค. 2559. มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2011. https://www.pwa.co.th › pwastandard50-1

กรมควบคุมมลพิษ. 2563. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. http://209.15.98.119/WSP/WSpDoc/StdWSrc.pdf. 28 กุมภาพันธ์ 2563

กรมอนามัย. 2563. ประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ กรมอนามัย พ.ศ. 2563. https://foodsan.anamai.moph.go.th/th/water-quality/204437. 28 กุมภาพันธ์ 2563

ธีรพงษ์ สว่างปัญญางกูร. 2547. โครงการวิจัยการออกแบบเครื่องกรองน้ำในภาวะน้ำท่วมโดยกระบวนการดูดติดผิวที่ใช้เถ้าแกลบและถ่านกัมมันต์เป็นตัวกลาง, โครงการวิจัยในโครงการการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคในภาวะน้ำท่วมของประชากรชนบท, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

California Water Service Company. 2003. Water quality report for fairview 2003. http://www.calwater.com. 28 กุมภาพันธ์ 2563

Cann, K.F., Thomas, D.R., Salmon, R.L., Wyn-Jones, A.P., Kay, D. 2013. Extreme water-related weather events and waterborne disease. Epidemiol. Infect. 141: 671–686.

Davis, M.L., Cornwell, D.A. 1991. Environmental engineering, Second edition, McGraw-Hill Inc., USA

Loo, S.-L., Fane, A.G., Krantz, W.B., Lim, T.-T. 2012. Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria. Water Res. 46: 3125-3151.

MHMRC, NRMMC. 2011. Australian drinking water guidelines paper 6 national water quality management strategy. National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council, Commonwealth of Australia, Canberra.

World Health Organization (WHO). 1963. International standard for drinking-water, 2nd edition. Geneva Switzerland.

การนำสังกะสีกลับมาใช้จากขยะอันตรายของการผลิตลวดเหล็กกล้าแรงดึงสูงด้วยกระบวนการทางโลหะวิทยาการละลาย

Zinc recovery of hazardous waste from steel wire industry by hydrometallurgical process

<u>ปณิตา สุตะเขตร์</u>, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ*

<u>Panita Sutaket</u>, Peerakarn Banjerdkij*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pbanjerdkij@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการนำสังกะสีกลับมาใช้จากกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าด้วยกระบวนการซีเมนเตชัน (Cementation Process) เป็นหนึ่งในกระบวนการทางโลหะวิทยา (Hydrometallurgical Process) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียและการกลับคืนสภาพแร่จากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งของเสียอันตรายที่เกิดจากระบวนการผลิตและกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีปริมาณสูง เพื่อหาแนวทางเพิ่มมูลค่าให้ของเสียอันตรายโดยให้ความสนใจในการสกัดสังกะสีออกจากกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย (SWWT) ผงฝุ่นการรีดลวด (DSS) และกากตะกอนซิงค์ (SZP) ซึ่งในปี 2564 วิเคราะห์ปริมาณสังกะสีด้วยเครื่อง ICP-OES พบว่า SWWT DSS และ SZP อยู่ที่ 3,016 mg/kg, 34,674 mg/kg และ 44,956 mg/kg ตามลำดับ เมื่อใช้กรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ มีประสิทธิภาพในการสกัดสังกะสีของ SWWT, SZP และ DSS คือ 97.52%, 12.35% และ 99.98% ตามลำดับ ผลศึกษาการสกัดสังกะสีจาก SWWT สามารถสกัดสังกะสีได้ 68,995 mg/L เพื่อความคลอบคลุมจึงใช้กรดไฮโดรคลอลิกเสื่อมสภาพกระตุ้น SWWT พบว่าประสิทธิภาพการสกัดสังกะสีลดลง 13.98%

คำสำคัญ: กระบวนการซีเมนเตชั่น, กระบวนการโลหะวิทยาการละลาย, ของเสียอันตราย

Abstract

The research studied a zinc utilization and recovery by cementation process that mentioned of the melt metallurgy processes. The hydrometallurgical process which is used extensively and widely in wastewater treatment and mineral recovery of industrial waste.

The amount of hazardous waste generated from production and wastewater treatment is high and to find ways to reduce the cost burden of production. This research is interested the value of hazardous waste extraction from zinc for future utilization and value added in the future. The analysis of hazardous waste were from the sludge wastewater treatment (SWWT), sludge zinc phosphate (SZP), dust steel sludge (DSS) were analyzed. The result was tested by ICP-OES in 2021 and found that the zinc containing 3,016 mg/kg 34,674 mg/kg and 44,956 mg/kg respectively. When was found that the efficiency for using sulfuric acid 1 molar its zinc can be extracted from SWWT SZP and DSS extrusion were 97.52%, 12.35% and 99.98% respectively.

The cost-effectiveness of zinc extraction was studied. It was found that the sludge from SWWT was able to recovery zinc at 68,995 mg/L. Therefore the SWWT activated by waste HCL it was found that the zinc extraction efficiency decreased by 13.98%.

Keywords: Cementation Process, Hydrometallurgical Process, Hazardous Waste

คำนำ

ปัจจุบันการจัดการของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรมเป็นหนึ่งในต้นทุนหลักในการดำเนินธุรกิจ ซึ่งหากมีการจัดจัดสรรงบประมาณไม่เพียงพออาจส่งผลกระทบต่อการจัดการของเสียในอุตสาหกรรมและเกิดเป็นปัญหาต่อเนื่องทางของสิ่งแวดล้อมได้ เช่น การลักลอบทิ้ง การกำจัดที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น โดยวิธีการจัดการส่วนใหญ่จะใช้แนวคิดในการจัดการที่ปลายทาง (Down Stream) มากกว่าการลดปริมาณของเสียตั้งแต่แหล่งต้นทาง (Up Stream) หรือการจัดการแบบบูรณาการตามหลัก 3Rs (Reuse, Reduce และ Recycle) โดยของเสียอันตรายมีลักษณะเป็นพิษ กัดกร่อน มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยพบว่าการจัดของเสียอันตรายมีผลต่อต้นทุนอย่างมีนัยยสำคัญ จึงมีการนำผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเหล็กเพื่อนำมาใช้ซ้ำและรีไซเคิลในรูปแบบเพิ่มมูลค่าเพื่อความสำเร็จไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน และเพิ่มปริมาณของเสียให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มมูลค่าสูงขึ้น เพื่อลดการเกิดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมรวมไปถึงนวัตกรรมใหม่ หรือภาพรวมที่นำของเสียกลับไปเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตประเภทต่างๆ (Shuman, 2020)

จากงานวิจัยของ (Xue, Hao et al. 2022) พบว่าการใช้กระบวนการ Hydrometallurgical เป็นวิธีการที่สามารถนำสังกะสีกลับมาได้สูงที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติของกรดไฮโดรคลอลิกและกรดซัลฟิวลิก พบว่าในช่วงพีเอช 0–1 ค่า E(V) อยู่ที่ 1.2 และช่วงพีเอส 5 จะสามารถชะละลายสังกะสีออกมาได้สูงและมีค่า E(V) อยู่ที่ 1.1 ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณเหล็กที่ถูกสกัดออกมาในช่วงพีเอช 5 ค่า E(V) อยู่ที่ -0.3 ช่วง พีเอช 0–1 ค่า E(V) อยู่ที่ 0.8 ซึ่งเมื่อเทียบกับสังกะสีทีชะละลายออกมามีค่าที่สูงกว่า โดยจากงานวิจัยของ (Fedje and Andersson, 2020) พบว่าการนำสังกะสีกลับคืนจากกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมเส้นใยเรยอนโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายสามารถนำสังกะสีกลับคืนมาอยู่ที่ 20.06% และ 66.63% ตามลำดับ

(Fedje and Andersson, 2020) และคณะได้ดำเนินศึกษาการนำสังกะสีกลับมาใช้จากกากของเสียอันตรายโดยใช้วิธีการชะละลายและตกตะกอนด้วยสารเคมีโดยพีเอช ของสารละลายสำหรับการตกอยู่พีเอช 9 สารเคมีที่ใช้ในการชะละลาย ได้แก่ กรดไฮโดรคลอลิก และสารที่ใช้ในการตกตะกอนคือโซดาไฟ เมื่อผ่านการตกตะกอนและนำวิเคราะห์พบว่ามีปริมาณของ $Zn(OH)_2$ 80 wt% ในลักษณะของตะกอนเข้มข้นซึ่งบางครั้งเทคโนโลยีที่ใช้การบำบัดหรือกำจัดไม่ได้รับการพัฒนาหรือปรับปรุงให้เป็นไปตามยุคสมัย ซึ่งจากผลการวิจัยในการยกระดับและให้ความสำคัญในการจัดการของเสียอุตสาหกรรมจึงมีการพัฒนาการนำของเสียอุตสาหกรรมนำกลับไปใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่าของเสียให้มีคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มขึ้น โดยนำกระบวนการทางโลหะวิทยาการละลายมาเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากของเสียอุตสาหกรรมจะมีการปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณที่สูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งในกระบวนการโลหะวิทยาสารละลายเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เองและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในสภาวะของสารละลายที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียและการนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการผลิตสังกะสีจากกระบวนการรีไซเคิลจากกลุ่มของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรมเหล็กกล้า สารเคมีส่วนใหญ่ที่นำมาละลายตะกอน เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอลิก (HCL) และสารละลาย (-OH) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นต้น พบว่าการใช้กรดซัลฟูริกมีราคาเหมาะสมและง่ายต่อการกรองแยกสารละลาย (Feltz and Logan, 1985) ซึ่งชนิดและความเข้มข้นของโลหะจะแตกต่างกันถ้าโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ จะมีพันธะยึดเกาะน้อยและสามารถละลายได้ง่ายรวดเร็วกว่าสารประกอบเชิงซ้อน โดยจากงานวิจัยของ (Kuo, 2012) และคณะ พบว่ามีการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและการชะละลายของกากตะกอนชุบซิงค์ฟอตเฟสพบว่ามีปริมาณของสังกะสีที่ถูกชะละลายมีความเข้มข้น 123 มก./ลิตร โดยลักษณะทางสัญฐานวิทยาเป็นผงแป้งและทรงกลมและมีการหลอมรวมกันเป็นก้อนแข็ง (Vitrification) ซึ่งมีการเปลี่ยน

โครงสร้างพื้นผิวให้เป็นรูปร่างที่ไม่เป็นรูปร่างและมีลักษณะขอบแหลมเพื่อลดการชะละลายสังกะสี เนื่องจากสังกะสีกลายเป็นไอสู่บรรยากาศ โดยในส่วนของการนำกรดเสื่อมสภาพ (SA) มีการศึกษาของ (Zueva et al., 2021) พบว่ามีการทดลองนำกรดเสื่อมสภาพเป็นสารสำหรับในการสร้างตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย และนำไปเติมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณสังกะสี 40% ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณตะกอนสังกะสีที่เกิดขึ้น 1.4 เท่า

ประสิทธิภาพในการกู้คืนสังกะสีโดยการใช้กรดแต่ละชนิดเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการนำสังกะสีกลับมาใช้เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจในลำดับต่อไป ซึ่งมีการศึกษาการนำสังกะสีกลับมาใช้ของกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน โดยใช้กรดซัลฟูริก พีเอช 1 สาร EDTA พีเอช 4 กรดซิตริก พีเอช1 และกรดไฮโดรคลอริก พีเอช1 สามารถสกัดสังกะสีได้ 97.91% 97.57% 91.00% และ 83.81% (โตโภชนพันธุ์, 2554) งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นประสิทธิภาพของการใช้กรดซัลฟูริก กรดHCL และกรดไฮโดรคลอลิกเสื่อมสภาพ (SA) ในการสกัดสังกะสีจากของเสียอันตราย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

นำตัวอย่างของเสียอันตราย ได้แก่ กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย (SWWT), ผงฝุ่นการรีดลวด (DSS), กากตะกอนชุบซิงค์ฟอสเฟต (SZP) จากบริษัทผลิตลวดเหล็กกล้าแรงดึงสูงแห่งหนึ่ง จังหวัดฉะเชิงเทรา นำมาอบด้วยเตาอบยี่ห้อ BINDER รุ่น FD53 ที่อุณหภูมิ 100–105 ^{o}C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่อบแห้งเก็บในโถดูดความชื้น 24 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาปริมาณความชื้นตาม Equation 1 (ตระกูลผุดผ่อง, 2551) และนำไปร่อนด้วยตะแกรงที่ขนาดความถี่ 300 ไมครอน เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยการใช้เครื่อง Scanning electron microscope รุ่น SEM micrograph by JEOL Scanning Electron Microscope (SEM) JSM-5410LV และวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy รุ่น Element and Chemical Analysis by Oxford Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS/EDX) LINK ISIS300 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะและประเภทของธาตุในตัวอย่างของเสียอันตราย (Anderez et al. 2022)

$$\%\ \text{ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ - น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักหลังอบ}} \quad (1)$$

การเตรียมตัวอย่างและสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์สังกะสีจากการกู้คืนจาก SWWT SZP และ DSS

ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ และกรดไฮโดรคลอลิก 38% และกรดไฮโดรคลอลิกเสื่อมสภาพ (SA) จากกระบวนการชุบล้างลวดโดยมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของกรดที่ต่ำ จากนั้นปิเปตสารละลาย 100 มิลลิตร ใส่ในตัวอย่างและนำไปเขย่า 24 ชั่วโมง 80–100 รอบ/นาที และนำของเหลวและของแข็งที่คงเหลือกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman41 และนำสารละลายวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีด้วยเครื่อง ICP-OES ยี่ห้อ PerkinELmer รุ่น Avio 220 max

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของงานวิจัยฉบับนี้ต้องการนำของเสียอันตรายกลับไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย ซึ่งได้หาศึกษาลักษณะทางกายภาพ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ SEM และEDS เพื่อดูโครงสร้างและปริมาณธาตุ และวิเคราะห์ทางเคมี

และประสิทธิภาพการกู้คืนสังกะสีจากของเสียอันตรายด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ กรดไฮโดรคลอลิก และกรดเสื่อมสภาพ (SA) ในการกระตุ้นของเสียอันตราย ซึ่งได้ดำเนินการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นใน SWWT, SZP, DSS คือ 10.421%, 3.024% และ 0.038 % ตามลำดับแสดงดัง Table1 ซึ่งผลการทดลองความชื้นของสอดคล้องกับกับงานวิจัยของ (ตระกูล ผุดผ่อง, 2551) พบว่าปริมาณความชื้นของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงชุบอยู่ 8.80%

Table 1 Moisture Content of Hazardous Waste such as Sludge Waste Water Treatment (SWWT), Sludge Zinc Phosphate (SZP), Dust Steel Sludge (DSS)

Type	Moisture Content (%)
SWWT	10.421
SZP	3.024
DSS	0.038

จากผลการทดลองปริมาณโลหะหนักในของเสียอันตรายทั้ง 3 ประเภทพบว่าปริมาณสังกะสี (Zn) ในตัวอย่างของ DSS > SZP > SWWT แสดงดัง Table 2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (กรมอุตสาหกรรมพื้นที่และการเหมืองแร่, 2020) เนื่องจากกระบวนการที่เกิดของเสีย DSS เป็นกระบวนการที่นำผงสารเคมีเพื่อรีดบนผิวลวดที่ผ่านกระบวนการชุบล้างลวด จึงส่งผลให้มีปริมาณสังกะสีใน DSS สูงที่สุด

Table 2 Analysis Heavy Mental in Hazardous Waste used ICP-OES

Type	Heavy Mental (w/w)								
	Cd	Cr (III)	Cr (VI)	Cu	Lead	Mercury	Ni	pH	Zn
SWWT	0.56	155.50	0.25	79.08	6.59	0.61	78.67	7.65	6,724.50
SZP	0.01	74.75	0.25	4.03	7.10	1.10	258.12	2.55	9,512.85
DSS	1.00	61.02	0.25	82.00	28.83	0.68	112.00	11.95	14,248.00

งานวิจัยฉบับนี้เพื่อความคลอบคลุมการนำของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่โดยดำเนินการวิเคราะห์โลหะหนักในกรดเสื่อมสภาพ (SA) ซึ่งพบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอลิกอยู่ที่ 3.29% แสดงดัง Table 3 ซึ่งปริมาณของสังกะสีของตัวอย่างกรดเสื่อมสภาพอยู่ที่ 35.13 g/L ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของ (Mojapelo, 2021) พบปริมาณสังกะสี 33.27 g/L

Table 3 Analysis Heavy Mental in Spent acid (SA) used ICP-OES

Type	Heavy Mental (g/L)									
	Cd	Cr (III)	Cu	Lead	Mn	Ni	pH	Zn	Fe	Solid content (ml)	%HCL
SA	1.43	336.00	45.55	11.49	579.00	58.00	1.00	35.13	14.85	506,327.50	3.29

โดยงานวิจัยฉบับนี้นำตัวอย่างทั้ง 3 ประเภท กระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีจากการชะละลายและประสิทธิภาพการกู้คืนสังกะสีดัง Table 4 พบว่าปริมาณสังกะสีที่สามารถชะละลายออกมาได้จากของเสียทั้ง 3 ประเภท พบว่า DSS SWWT และ SZP มีปริมาณสังกะสี 263,400 , 68,995 และ 56,690 mg/L ตามลำดับ

และประสิทธิภาพของการกู้คืนสังกะสีพบว่า DSS SWWT และ SZP มีประสิทธิภาพการกู้คืน 99.98%, 97.51% และ 12.34 ตามลำดับ

Table 4 Zinc Content and Efficiency from Hazardous Waste

Type	Zinc Content (mg/L)	Efficiency (%)
SWWT	68,995	97.5172%
SZP	56,690	12.3475%
DSS	263,400	99.9838%

เมื่อเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าปริมาณของเสียอันตรายที่มีค่าใช้จ่ายสูงสุดได้แก่ SWWT > DSS >SZP ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการนำของเสียอันตรายกลับมาใช้อย่างคุ้มค่าปริมาณสังกะสีที่เกิดขึ้นจากการชะละลาย ซึ่งเปรียบเทียบปริมาณของเสียอันตรายของโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นในปี 2021 พบว่าปริมาณของเสียจาก SWWT มีปริมาณเกิดขึ้นมากกว่า DSS และ SZP ที่ 84.79% และ 87.48% ตามลำดับ ซึ่งการนำ SWWT กลับมาสกัดสังกะสีจากของเสียอันตรายจึงมีความคุ้มค่ามากกว่า

Fig.1 Volume Hazardous Waste in Years 2021

เพื่อความครอบคลุมของงานวิจัยฉบับนี้จึงนำของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมาใช้ประโยชน์ได้อย่างสูงสุดและควบคุมค่าใช้จ่าย ซึ่งได้นำ SWWT กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอลิกเสื่อมสภาพ (SA) และกรดไฮโดรคลอลิก 38% ซึ่งผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่ละลายได้จาก SWWT แสดงดัง Table 5 พบว่าปริมาณของสังกะสีที่สามารถชะละลายออกมาโดยการใช้ HCL 37% และ SA คือ 144.50 มก./ล และ 1,473.50 มก./ล ตามลำดับ

Table 5 Zinc content in SWWT extraction by HCL38% and Spent Acid (SA)

สารเคมีสำหรับการละลาย	Zinc Content (mg/L)
HCL	144.50
SA	1,473.50

ซึ่งเมื่อนำตัวอย่างของเสียอันตรายก่อนกระตุ้นด้วยสารละลายไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยวิธีการ SEM และ EDS พบว่า DSS มีลักษณะโครงสร้างเป็นลักษณะรูพรุนสูงแสดงดัง Fig. 2 จึงสามารถทำให้กรดซัลฟูริกสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาทางเคมีและทำลายโครงสร้างที่เป็นสารอินทรีย์ โดยจากภาพ (A) และ (B) ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ1,500 เท่า ตามลำดับ สามารถชะละลายของสังกะสีออกมาในรูปแบบของเหลวได้ในปริมาณสูง เมื่อผลการวิเคราะห์ EDS ดัง Fig. 3 จะพบว่ามีปริมาณ Ca และ Zn อยู่ที่ 20.68 wt% และ 11.82 wt% ตามลำดับ

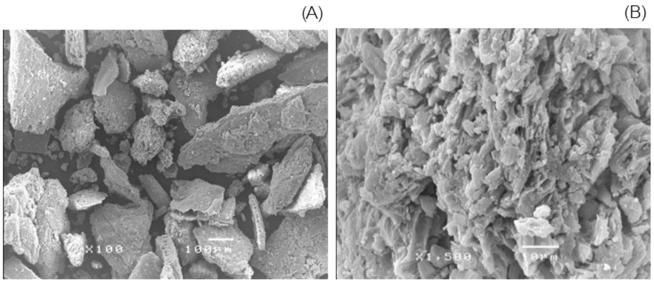


Fig. 2 DSS by SEM (A) x100 and (B) x1,500

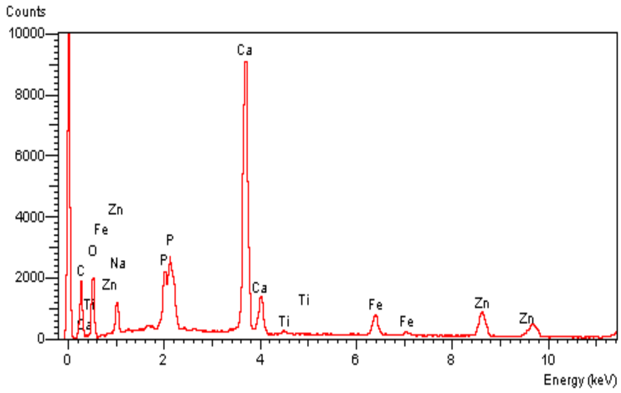


Fig. 3 DSS by EDS

จากการวิเคราห์ลักษณะโครงสร้าง SWWT แสดงดัง Fig. 4 และ Fig. 5 พบว่าลักษณะโครงสร้างส่วนเป็น Fe, Ca, Zn อยู่ที่ 53.01 wt%, 3.93 wt% และ 1.44 wt% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำตัวอย่างกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์จึงสามารถสกัดสังกะสีออกมาได้ไม่สูงเทียบเท่ากับตัวอย่างของ DSS เนื่องจากปริมาณของสังกะสีมีปริมาณที่น้อยกว่า

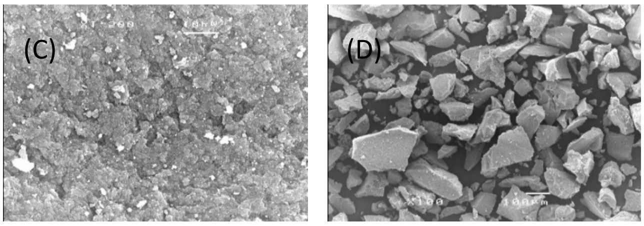


Fig. 4 SWWT by SEM (C) x100 and (D) x1,500

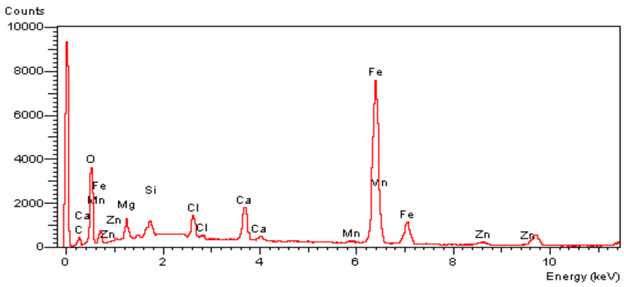


Fig. 5 SWWT by EDS

โดยจากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างของเสียประเภท SZP พบว่าโครงสร้างมีลักษณะที่มีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มและความเป็นรูพรุนของโครงสร้างมีปริมาณที่น้อย ดัง Fig. 6 และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณของธาตุด้วย

EDS แสดงดัง Fig. 7 พบว่าปริมาณของ Fe และ Zn อยู่ที่ 36.28 wt% และ 2.28 wt% และเนื่องจากปริมาณของ O มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีคือ ออกซิเดชั่น ซึ่งเมื่อเปรียบปริมาณของ O ใน SWWT DSS และ SZP คือ 25.81 wt% 35.99 wt% และ 36.18wt% ตามลำดับ โดยเป็นอีกปัจจัยสำหรับการเกิดปฏิกิริยาและการชะละลายของสังกะสีออกจากของเสียทั้ง 3 ประเภทมีปริมาณที่แตกต่างกัน

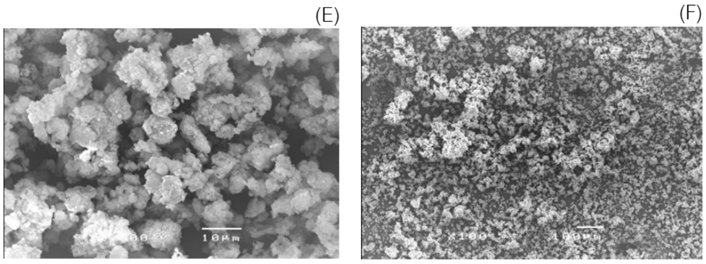


Fig. 6 SZP by SEM (E) x100 and (F) x1,500

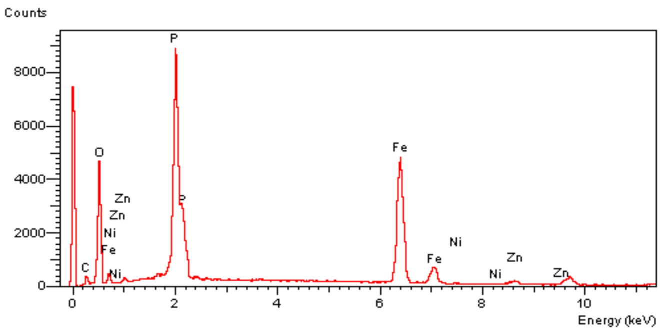


Fig. 7 SZP by EDS

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ทางลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีสามารถบ่งชี้ได้ว่าปริมาณสังกะสีที่กระตุ้นผ่านด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ พบว่า DSS > SWWT > SZP ซึ่งเมื่อเทียบในต่อปริมาณการเกิดของเสียในอุตสาหกรรมพบว่าปริมาณของเสียของ SWWT เกิดปริมาณของเสียมากกว่า DSS ถึง 84.61% ต่อปี

สรุป

จากการศึกษาการสกัดสังกะสีเพื่อนำกลับมาใช้จากของเสียอันตรายของอุตสาหกรมผลิตลวดเหล็กกล้าแรงดึงสูงแห่งหนึ่งในจังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่าสังกะสีที่สามารถกู้คืนได้โดยใช้กรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ ,กรดไฮโดรคลอลิก 38% และกรดไฮโดรคลอลิกเสื่อมสภาพ พบว่ากรดซัลฟูริก 1M มีประสิทธิภาพในการกู้คืนสังกะสีจาก DSS , SWWT และ SZP คือ 99.98% 97.51% และ12.35% ตามลำดับ โดยปริมาณของสังกะสีที่สามารถสกัดได้คือ 263,400 mg/L 68,995 mg/L และ 56,690 mg/L ตามลำดับ ซึ่งปริมาณขยะอันตรายของ DSS SWWT และ SZP เกิดขึ้นอยู่ที่ 50, 329 และ 41 ตัน/ปี ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าค่าใช้จ่ายการกำจัดของเสียอันตรายของ SWWT มีปริมาณสูงกว่า DSS และ SZP อยู่ที่ 87.79% และ 87.48% ตามลำดับ พบว่าการนำสังกะสีจาก SWWT กลับมาใช้ใหม่มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์สูงกว่าและสามารถช่วยลดค่ากำจัดขยะอันตรายของโรงงาน และเพื่อให้เกิดความคลอบคลุมของการดำเนินการทำงานวิจัยฉบับนี้ จึงได้นำกรดไฮโดรคลอลิก 38% และกรดไฮโดรคลอลิกเสื่อมสภาพ (SA) มาใช้ชะละลายสังกะสีจาก SWWT ซึ่งผลการทดลองพบว่า กรดไฮดรอกคลอลิกมีประสิทธิภาพการชะละลายลดลงถึง 87.80% เมื่อนำไปเทียบกับตัวควบคุม และ SA มีประสิทธิภาพการชะละลายลดลงถึง 13.98%

เอกสารอ้างอิง

เฉลิมชัย ตระกูลผุดผ่อง. 2551. กลไกลการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในซีเมนต์. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 30–31.

พิมลพร โตโภชนพันธุ์. 2554. การนำสังกะสีกลับคืนจากกาตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 12–83

วิษณุ ทับเที่ยง. 2563. การปรับปรุงคุณภาพสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากฝุ่นเหล็กโดยวิธีการให้ความร้อนด้วยเตาเหนี่ยวนำ กรมอุตสาหกรรมพื้นที่และการเหมืองแร่. หน้า 159

Fedje, K.K., Andersson, S. 2020. Zinc recovery from Waste-to-Energy fly ash – A pilot test study. 118: 90–98. doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.017

Mojapelo, K.S., Kupolati, W.K., Ndambuki, J.M., Sadiku, E.R., Ibrahim, I.D. 2021. Utilization of wastewater sludge for lightweight concrete and the use of wastewater as curing medium. Case Stud. Constr. Mater. 15: e00667. doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00667

Kuo, Y.M. 2012. An alternative approach to recovering valuable metals from zinc phosphating sludge. J. Hazard. Mater. 201–202: 265–272

Feltz, R.E., Logan, T.J. 1985. Residual cadmium forms in acid-extracted anaerobically digested sewage sludge. J. Environ. Qual. 14: 483–488. doi.org/10.2134/jeq1985.00472425001400040006x

Shuman, N.M. 2020. Hazardous Waste Management – Reuse, Recycling and Reclamation. Hazardous Waste Management – Reuse, Recycling and Reclamation. 2020: 1–9. doi: 10.13140/RG.2.2.16054.93765

Zueva, S.B., Ferella, F., Innocenzi, V., Michelis, I.D., Corradini, V., Ippolito, N.M., Vegliò, F. 2021. Recovery of zinc from treatment of spent acid solutions from the pickling stage of galvanizing plants. Sustainability. 13: 407. doi.org/10.3390/su13010407

การกำจัดไมโครพลาสติกโดยระบบกรองถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียในการบำบัดน้ำเสียขั้นตติยภูมิ

Microplastic removal by macadamia nutshell derived biochar filter system for tertiary wastewater treatment

<u>ฐาทิณี ช่างหล่อ</u>*, บงกชรัตน์ สุยะหมุด, เจนยุกต์ โลห์วัชรินทร์

<u>Tatinee Changlor</u>*, Bongkotrat Suyamud, Jenyuk Lohwacharin

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: 6370071521@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยชั้นกรองถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียขั้นตติยภูมิ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง การทดลองช่วงแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียมีพื้นที่ผิวสูง ขนาดรูพรุนกว้าง ผิวมีความขรุขระ และมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งแสดงถึงการเป็นชีวมวลที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นถ่านชีวภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยกลไกทางกายภาพ การทดลองช่วงที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยชั้นกรองถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมีย พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกอยู่ที่ 63% และ 75% ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการกำจัดไมโครพลาสติกในการบำบัดน้ำเสียขั้นตติยภูมิ โดยเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยไมโครพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: กลไกทางกายภาพ, ถ่านชีวภาพ, ไมโครพลาสติก

Abstract

This research aims to study the efficiency of microplastic removal by biochar filter system for tertiary wastewater treatment. The study consisted of two experiments. The first experiment was to study the physical properties of biochar. The results showed that the biochar from macadamia nutshell has a high surface area, large pore size, rough surface and hydrophilic properties, which represents biomass suitable for study to the physical mechanism for microplastics removal by biochar filter. In the second experiment, the efficiency of microplastic removal was assessed using biochar from macadamia nutshell. It was found that the efficiency of microplastic removal was 63% and 75%. This study provides basic information on the further development of microplastics removal for tertiary wastewater treatment. It is an alternative technology that can be used to reduce the release of microplastics into the environment.

Keywords: Biochar, Microplastic, Physical mechanism

คำนำ

ปัจจุบันพบการปนเปื้อนมลสารไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อม ทั้งในตะกอนดิน แหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบบำบัดน้ำเสีย และแม้กระทั่งในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากไมโครพลาสติกมีขนาดเล็กสามารถแพร่กระจายได้ง่ายและตกค้างในธรรมชาติ ซึ่งกลายเป็นปัญหาในระยะยาวต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยมีการให้คำนิยามของไมโครพลาสติกว่าเป็นพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร (Cole et al., 2011) ซึ่งเป็นมลสารพิษกำเนิดใหม่ที่สร้างความกังวลในผลกระทบเชิงลบต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิตในน้ำ น้ำเสียชุมชนจัดเป็นแหล่งมลพิษหนึ่งที่เป็นผลให้เกิดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันสามารถกำจัดไมโครพลาสติกได้เพียงบางส่วนในถังตกตะกอนและถังเติมอากาศ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในระบบบำบัดน้ำเสียอยู่ที่ 84% (Hongprasith et al., 2020) ทั้งนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในระบบบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องใช้กระบวนการบำบัดขั้นตติยภูมิร่วมด้วยก่อนปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยใช้ระบบกรองถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นตติยภูมิ

ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง ผลิตจากชีวมวลหรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน (Pyrolysis) ถ่านชีวภาพถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ดูดซับสารเคมี โลหะหนัก และยาปฏิชีวนะ รวมถึงการกำจัดไมโครพลาสติก ปัจจุบันมีการศึกษาการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยระบบกรองทราย และระบบกรองทรายร่วมกับถ่านชีวภาพ จากการศึกษาของ Wang et al. (2020) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกโดยระบบกรองทรายอยู่ที่ 60–80% และประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยระบบกรองทรายร่วมกับถ่านชีวภาพอยู่ที่ 95% เนื่องจากถ่านชีวภาพมีความพรุน พื้นที่ผิวและรูพรุนภายในสูง จึงสามารถนำมาปรับปรุงใช้กับระบบกรองทรายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกในการบำบัดน้ำเสีย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของสภาวะการเดินระบบต่อประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยระบบกรองถ่านชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียในการกำจัดไมโครพลาสติกโดยใช้ระบบกรองถ่านชีวภาพเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียขั้นตติยภูมิ โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพต่อประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของระบบกรองในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยไมโครพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุอุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลองนี้ประกอบไปด้วย ตะแกรงร่อนสแตนเลส ขนาด 50, 100, 300 และ 758 ไมโครเมตร ตะแกรงร่อนสแตนเลส ขนาด 1.4 และ 1.7 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ในการคัดแยกไมโครพลาสติกและถ่านชีวภาพตามลำดับ เตาเผาสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสระดับภาคสนาม เพื่อเตรียมถ่านชีวภาพ เครื่องปั่นเหวี่ยงแบบแนวขนาน (Horizontal shaker) เพื่อสกัดและแยกสารออกจากเฟสของแข็ง เช่น การแยกไมโครพลาสติกออกจากถ่านชีวภาพ

สารเคมีและความบริสุทธิ์ที่ใช้ ได้แก่ D-Glucose anhydrous (AR, KemAus), Urea (AR, 99–100.5%, KemAus), Sodium chloride (NaCl) (AR, 99–100.5%, Carlo Erba), Magnesium sulphate heptahydrate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) (AR, 98–102%, KemAus), Calcium chloride dihydrate ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) (AR, 99–105%, KemAus),

Anhydrous dipotassium hydrogen phosphate (K_2HPO_4) (AR, 99%, KemAus), Sodium nitrate ($NaNO_3$) (AR, 99%, KemAus) และ Deionized (DI) water ที่มีค่า resistivity ไม่น้อยกว่า18 MΩ.cm

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินวิจัย

การทดลองนี้ดำเนินการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบในคอลัมน์แบบกะ (Batch column experiment) และน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำสังเคราะห์มีสมบัติเสมือนน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นทุติยภูมิ โดยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

การทดลองที่ 1 เตรียมตัวอย่างถ่านชีวภาพโดยนำเปลือกแมคคาเดเมียมาเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 700 °C ระยะเวลา 3–4 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ โดยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยใช้เครื่อง BET Surface Area Analyzer (Baflex, Micromeritics) เพื่อศึกษาพื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุนของถ่านชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจากกระบวนการเผา รวมถึงวิเคราะห์ความขรุขระบนผิวของถ่านชีวภาพที่แปรเปลี่ยนไปจากกระบวนการไพโรไลซิส

การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของถ่านชีวภาพ ทำการทดสอบในคอลัมน์ โดยใช้ไมโครพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีน รูปร่างแบบเส้นใย (Fiber) และชิ้นส่วน (Fragment) ที่อัตราการไหล เท่ากับ 5 เมตรต่อชั่วโมง โดยทำการกรองด้วยปริมาตร เท่ากับ 2.5 ลิตร รวมถึงวิเคราะห์กลไกการดักจับไมโครพลาสติก โดยศึกษาลักษณะไมโครพลาสติกที่กักกรองได้ตาม 3 ช่วงความลึกของชั้นกรอง แบ่งออกเป็นช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลายคอลัมน์ มีความยาวช่วงละ 5 เซนติเมตร และวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระของถ่านชีวภาพ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) รวมถึงวิเคราะห์ปริมาณของไมโครพลาสติกที่กรองผ่านคอลัมน์ออกไปกับน้ำกรองได้ด้วยวิธี Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) ด้วยเครื่อง Micro-FTIR (LUMOS II, Bruker)

การเตรียมตัวอย่างไมโครพลาสติก

เนื่องจากยังไม่มีวัสดุมาตรฐานของไมโครพลาสติกประเภทเส้นใยขายในท้องตลาดสำหรับทำการวิจัย จึงทำการเตรียมตัวอย่างไมโครพลาสติกจากพลาสติกขนาดใหญ่ชนิดโพลิเอทิลีน โดยการตัดขวดพลาสติกด้วยเครื่องเจียรให้มีขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นนำมาคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อน (Sieve) สแตนเลสให้มีขนาดอยู่ในช่วง 50–100 และ 100–300 ไมโครเมตร ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างถ่านชีวภาพ

ชีวมวลที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ

วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการเตรียมถ่านชีวภาพที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เปลือกแมคคาเดเมีย (Macadamia Nutshell) ที่ได้รับจากมูลนิธิแม่ฟ้าหลวงในพระบรมราชูปถัมภ์ เปลือกแมคคาเดเมียเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการกะเทาะเปลือกในเมล็ดแมคคาเดเมีย เพื่อนำเอาผลของเมล็ดแมคคาเดเมียไปใช้ประโยชน์ในทางการค้าต่อไป

กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ

การผลิตถ่านชีวภาพทำโดยการนำเปลือกแมคคาเดเมียน้ำหนัก 10 กิโลกรัม เผาด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow pyrolysis) ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยได้รับความอนุเคราะห์การใช้เตาเผาชีวมวลขนาดความจุ 40 ลิตร ขององค์การบริหารส่วนตำบลท่ามะนาว จังหวัดลพบุรี ซึ่งเตาเผาที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพในการศึกษานี้

สามารถควบคุมอุณหภูมิในการผลิต ถ่านชีวภาพอยู่ที่ประมาณ 700 ºC และมีระยะเวลาการเผา 3–4 ชั่วโมง เมื่อการเผาไหม้สิ้นสุดลง และปล่อยให้เตาเผาเย็นตัวลงจนอุณหภูมิปกติ จะได้ถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมีย ประมาณร้อยละ 28 ของปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิตในการผลิตถ่านชีวภาพ จากนั้นนำถ่านชีวภาพมาคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อน (Sieve) สแตนเลสให้มีขนาดอยู่ในช่วง 1.4–1.7 มิลลิเมตร

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้ เตรียมโดยใช้ D-Glucose anhydrous, Urea, Anhydrous dipotassium hydrogen phosphate (K_2HPO_4), Magnesium sulphate heptahydrate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), Calcium chloride dihydrate ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$), Sodium chloride (NaCl) และ Sodium nitrate ($NaNO_3$) (Tran et al., 2020) ซึ่งแสดงดัง Table 1

Table 1 Characteristics of the synthetic secondary wastewater

Components	Milligram per liter
D-Glucose	19.5
Urea	3
K_2HPO_4	2.8
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.2
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.4
NaCl	0.7
$NaNO_3$	60.6

การเตรียมคอลัมน์สำหรับการทดลอง

คอลัมน์สำหรับใช้ในงานวิจัยเป็นคอลัมน์แก้ว ลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดความสูง 15 เซนติเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร คิดเป็น bed volume เท่ากับ 47 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนหัว และท้ายของคอลัมน์ปิดด้วยตะแกรง (Sieve) สแตนเลสขนาด 758 ไมโครเมตร และทำการเดินระบบด้วยปั๊มชนิดรีดท่อสายยาง ซึ่งแสดงรายละเอียดดัง Fig. 1

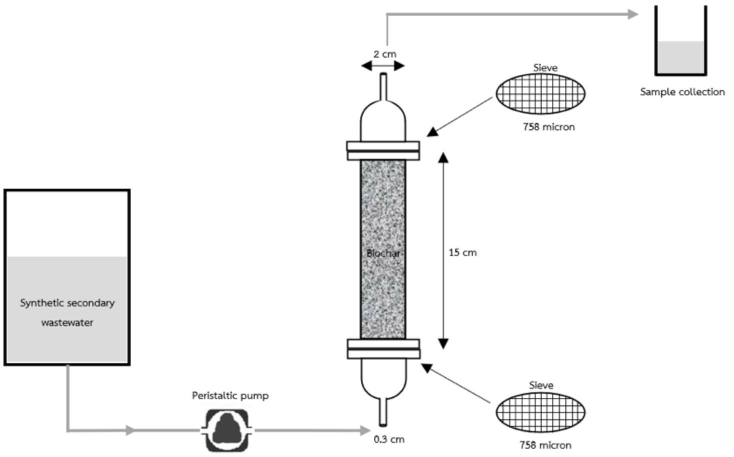


Fig.1 Schematic of the column setup designed and used in this study

การเตรียมชั้นกรองถ่านชีวภาพ

การเตรียมชั้นกรองถ่านชีวภาพ ทำการบรรจุถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียที่มีปริมาณน้ำหนักเท่ากับ 18 กรัม ลงไปในคอลัมน์ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความสูง 15 เซนติเมตร โดยการเติมถ่านชีวภาพจากทางส่วนบนของคอลัมน์ และล้างคอลัมน์ด้วยน้ำกลั่นโดยใช้ปั๊มท่อรีดสายยางที่อัตราการไหล 5 เมตรต่อชั่วโมง เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 2 สัปดาห์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ โดยวิธี BET surface analysis พบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมีย มีพื้นที่ผิว เท่ากับ 300.3 m^2/g และมีขนาดรูพรุน เท่ากับ 2.2 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Khan et al. (2014) พบว่า ถ่านจากเปลือกแมคคาเดเมียให้พื้นที่ผิวสูง และรูพรุนที่กว้างกว่าถ่านจากชีวมวลชนิดอื่น เนื่องจากแมคคาเดเมีย มีเซลลูโลส 29% เฮมิเซลลูโลส 30% และลิกนิน 40% (Wechsler et al., 2013) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพ ส่งผลให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาสัดส่วนของพื้นที่ผิวภายนอกกับพื้นที่ผิวทั้งหมด พบว่า ถ่านจากเปลือกแมคคาเดเมียมีค่าของสัดส่วน เท่ากับ 0.4 และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 0.2 cm^3/g ซึ่งแสดงรายละเอียดดัง Table 2 ผลจากการวัดค่า Point of zero charge (pH_{pzc}) พบว่า ถ่านจากเปลือกแมคคาเดเมีย มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 7 ดังแสดงใน Table 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ค่าพีเอชของน้ำที่ใช้ในการทดลอง ประจุบนผิวของถ่านชีวภาพจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ประจุลบและบวกสมดุลกัน) ทำให้คาดหมายว่า ประจุบนผิวจะมีผลต่อการดักจับไมโครพลาสติกน้อย

Table 2 Physical property of biochar

Biochar	Surface area (m^2/g)	Pore size (nm)	Pore volume (cm^3/g)	Ratio (External:Total)
Macadamia nutshell	300.3	2.2	0.2	0.4
Macadamia wood	325.1	2.2	0.2	0.3

Table 3 Points of Zero Charge (pH_{pzc})

Biochar	pH_{pzc}
Macadamia nutshell	7.0
Macadamia wood	7.0

ผลจากการวัด Contract angle ของถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมีย พบว่า ค่าการวัดมุมสัมผัส เท่ากับ 77.8 องศา (<90 องศา) (Alharbi et al., 2016) แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แสดงใน Fig. 2 และผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว และรูพรุนของถ่านชีวภาพ โดยวิธี SEM พบว่า ลักษณะของถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียมีพื้นผิวที่มีความขรุขระ และพบรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาของ Bakly et al. (2019) ที่พบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียมีรูพรุนจำนวนมากที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งลักษณะพื้นผิวและรูพรุนจะส่งเสริมให้เกิดการดักจับทางกายภาพได้ดี ซึ่งแสดงดัง Fig. 3 โดยพบว่าธาตุที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอน และออกซิเจน แสดงรายละเอียดดัง Table 4

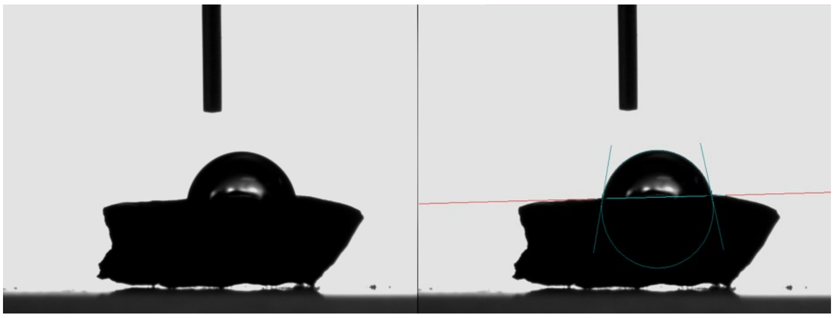


Fig. 2 Contact angle measurements

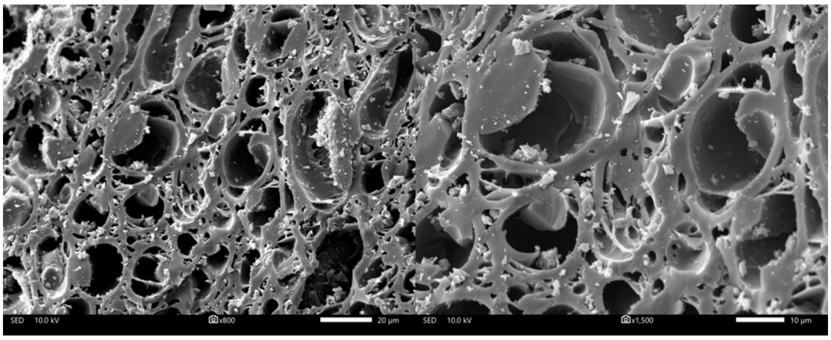


Fig. 3 Macadamia Nutshell biochar by SEM Analysis

Table 4 SEM-EDS Analysis for Macadamia Nutshell biochar samples.

Element	Mass%	Atom%
C	92.47±0.09	95.78±0.10
O	4.57±0.08	3.55±0.06
Al	0.22±0.02	0.10±0.01
K	0.27±0.02	0.09±0.01
Cu	1.48±0.10	0.29±0.02
Zn	0.99±0.12	0.19±0.02
Total	100	100

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดย FTIR พบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียจะพบหมู่ฟังก์ชัน ตัวอย่างเช่น หมู่คาร์บอนิล หมู่แอลคีน และหมู่อีเทอร์ แสดงดัง Fig. 4 เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากลไกทางกายภาพ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนผิวของถ่านชีวภาพนี้อาจจะไม่ได้ส่งผลต่อกลไกการดักจับทางกายภาพของถ่านชีวภาพกับไมโครพลาสติก และผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยชั้นกรองถ่านชีวภาพ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกขนาดเล็ก เท่ากับ 73% และ 77% และประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ เท่ากับ 65% และ 61% แสดงดัง Table 5 จากผลการศึกษา ทำให้พบว่าเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของไมโครพลาสติก ทิศทางการไหล ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของไมโครพลาสติกในคอลัมน์ที่บรรจุถ่านชีวภาพ ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ในน้ำจะมีแรงหลายแรงที่มากระทำต่ออนุภาคไมโครพลาสติก เช่น อนุภาคที่มีปริมาตรมากกว่าจะมีแรงลอยตัวมากกว่าอนุภาคที่มีปริมาตรน้อยกว่า ซึ่งแรงพยุงนี้อาจจะช่วยให้ไมโครพลาสติกหลุดรอดจากคอลัมน์ได้

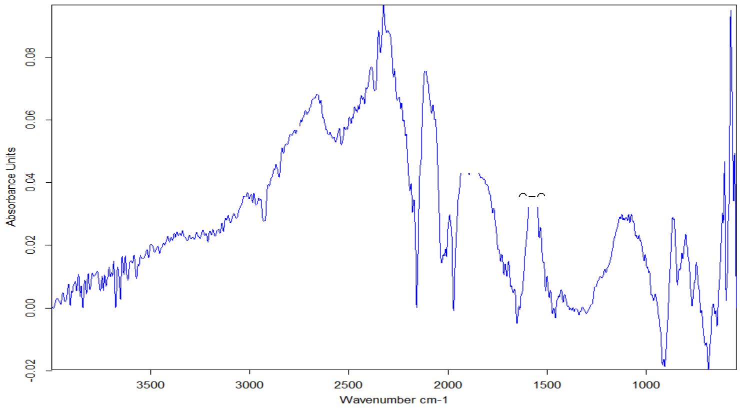


Fig. 4 Functional group analysis of macadamia nutshell biochar by FTIR spectroscopy

Table 5 The efficiency of microplastic removal by biochar filter

Biochar size	Microplastic sizes	Experimental	%Removal efficiency
1.4–1.7 mm	Small	1	73
	50–100 micron	2	77
	Big	1	65
	100–300 micron	2	61

สรุป

จากผลการศึกษาพบว่า เปลือกแมคคาเดเมีย เป็นชีวมวลที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นถ่านชีวภาพ เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพที่มีพื้นที่ผิวสูง ขนาดรูพรุนกว้าง มีความขรุขระ และผิวมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) รวมถึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกขนาดเล็ก (50–100 ไมโครเมตร) เท่ากับ 75% และกำจัดไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ (100–300 ไมโครเมตร) เท่ากับ 63% ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์ และสรุปเพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดไมโครพลาสติกในการบำบัดน้ำเสียขั้นตติยภูมิ โดยเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ในการลดการปลดปล่อยไมโครพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ส่งเสริม ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (DIS66210020)

เอกสารอ้างอิง

Alharbi, A.R., Alarifi, I.M., Khan, W.S., Asmatulu, R. 2016. Highly hydrophilic electrospun polyacrylonitrile/polyvinypyrrolidone nanofibers incorporated with Gentamicin as filter medium for dam water and wastewater treatment. J. Membr. Sep. Technol. 5: 38–56.

Bakly, S., Juboori, R.A.A., Bowtell, L. 2019. Macadamia nutshell biochar for nitrate removal: Effect of biochar preparation and process parameters Journal of Carbon Research. 3: 3505–4691. doi.org/10.3390/c5030047

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Mar. Pollut. Bull. 62: 2588–2597. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025

Hongprasith, N., Kittimethawong, C., Lertluksanaporn, R., Eamchotchhawalit, T., Kittipongvises, S., Lohwacharin, J. 2020. IR microspectroscopic identification of microplastics in municipal wastewater treatment plants. Environ. Sci. Pollut. Res. 27: 18557–18564. doi: 10.1007/s11356-020-08265-7

Khan, N., Clark, I., Sanches-Monedero, M., Shea, S., Meier, S., Bolan, N. 2014. Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. Bioresour. Technol. 168: 245–251. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.123

Tran, T.N., Kim, D.G., Ko, S.O. 2020. Efficient removal of 17α-ethinylestradiol from secondary wastewater treatment effluent by a biofilm process incorporating biogenic manganese oxide and *Pseudomonas putida* strain MnB1. J. Hazard. Mater. 398: 122–810. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122810

Wang, Z., Sedighi, M., Lea-Langton, A. 2020. Filtration of microplastic spheres by biochar: removal efficiency and immobilization mechanisms. Water Res. 184: 116–165. doi.org/10.1016/j.watres.2020.116165

Wechsler, A., Zaharia, M., Crosky, A., Jones, H., Ramirez, M., Ballerini, A., Nunez, M., Sahajwalla, V. 2013. Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Ricinos communis*) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard. Mater. Des. 50: 117–123.

ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ

Factors affecting participation in the government official condominium projects

บุญนิธิภพ อภิรักษ์*, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ชวเลข วณิชเวทิน

Boonnithipoph Apirak*, Pipat Sornwong, Chavalek Vanichavetin

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: boonnithipoph.a@ku.th

บทคัดย่อ

กรมธนารักษ์และสำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือนได้ร่วมกันพัฒนาจัดทำโครงการสวัสดิการที่พักอาศัยของข้าราชการหรือที่รู้จักคอนโดข้าราชการ จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยความสำคัญในการเลือกเข้าร่วมโครงการ เพื่อให้ทราบว่าผู้เข้าร่วมโครงการให้ความสำคัญต่อปัจจัยใดมากที่สุดตามลำดับการวิเคราะห์ โดยรวบรวมข้อมูลปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน ของภาครัฐและเอกชน ได้แก่ ด้านผู้พัฒนาโครงการ ด้านทำเลที่ตั้ง ด้านรูปแบบลักษณะโครงการ ด้านการเงินและความยั่งยืน และด้านสังคม จากนั้นนำปัจจัยที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญไปให้กับกลุ่มตัวอย่างซึ่งเป็นผู้เข้าร่วมโครงการ จำนวน 19 ท่าน มาทำการประเมินผลเพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย ผลการจัดลำดับความสำคัญด้วยวิธี AHP พบว่า ปัจจัยด้านทำเลที่ตั้งเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญสุด และปัจจัยรองด้านขนส่งสาธารณะเป็นปัจจัยรองที่สำคัญสุดของปัจจัยด้านทำเลที่ตั้ง ซึ่งจากการสัมภาษณ์กับกลุ่มตัวอย่าง เห็นด้วยกับปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้ทำการวิเคราะห์ ผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้พัฒนาโครงการในการวางแผนพัฒนาโครงการคอนโดราชการต่อไป

คำสำคัญ: การจัดลำดับความสำคัญ, โครงการคอนโดข้าราชการ, ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการ

Abstract

The Treasury Department and the Office of the Civil Service Commission have jointly developed a civil servant housing welfare project, known as the civil servant condominium. Therefore, there is an idea to study and analyze the factors affecting participation in the government condo project and prioritize important factors when choosing to participate in the project in order to know which factors the participants gave the most importance to in order of analysis. By collecting factor information from 10 experts from the public and private sectors including the project developer Location Project style aspect financial and sustainability and social aspects. Then, the factors obtained from experts were sent to a sample group of 19 participants in the project for evaluation in order to prioritize the factors. The results of prioritization using the AHP method revealed that location was the most important factor and public transport was the most important secondary factor of location, which from the interview with the sample group Agree with the major and minor factors analyzed. The findings of this research will be useful to project developers in planning the development of government condominium projects in the future.

Keyword: Factors affecting participation in projects, Government condominium projects, Prioritization

คำนำ

ที่อยู่อาศัยเป็นปัจจัยหนึ่งในการดำรงชีวิตขั้นพื้นฐานมนุษย์ ในปัจจุบันที่อยู่อาศัยได้มีการพัฒนาและปรับเปลี่ยนรูปแบบตามยุคสมัย วัฒนธรรมและวิถีชีวิตแต่ละคนเพื่อให้ตอบสนองต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในแต่ละพื้นที่อย่างเหมาะสม จะเห็นได้ว่าในอดีตผู้คนจะอาศัยอยู่รวมกันเป็นครอบครัวใหญ่ ซึ่งต่างจากในปัจจุบันคือมีการอาศัยเป็นครอบครัวเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นพื้นที่ศูนย์รวมในการปกครองและความเจริญในทุกด้าน อีกทั้งยังเป็นศูนย์รวมของการจ้างงานและการกระจุกตัวของพื้นที่เศรษฐกิจของประเทศอย่างชัดเจน ส่งผลให้จำนวนนั้นมีจำนวนที่สูงตามไปด้วย แต่ด้วยที่ดินที่มีจำนวนจำกัดและราคาที่สูงมากในเขตเมือง ทำให้รูปแบบที่อยู่อาศัยจากแนวราบหรือเรียกว่าบ้านเดี่ยวเปลี่ยนแปลงมาเป็นแนวดิ่ง

ทำเลที่ตั้งสำนักงานภาครัฐโดยส่วนมากจะตั้งอยู่ในบริเวณเขตเมืองที่มีทำเลที่ดินราคาแพง แนวถนนเส้นหลักหรือแนวรถไฟฟ้า ข้าราชการที่ปฏิบัติงานในพื้นที่กรุงเทพมหานครหรือส่วนกลางในแต่ละองค์กรที่ต้องการมีทรัพย์สินที่อยู่อาศัยเป็นของส่วนตัวในทำเลเดียวกับที่ตั้งสำนักงานไม่สามารถซื้อหรือเช่าคอนโดโครงการของเอกชนได้เนื่องจากราคาที่สูงเกินไป เพื่อให้สอดคล้องกับเงินเดือน ทำให้ข้าราชการบางส่วนต้องซื้อหรือเช่าคอนโดในทำเลที่ห่างจากสำนักงานและขนส่งสาธารณะที่ไม่สะดวก และนำมาซึ่งค่าใช้จ่ายในการเดินทางรวมถึงใช้เวลาในการเดินทาง และข้อมูลจากศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศสำนักงาน ก.พ. (2563) รายงานว่าในปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 มีจำนวนตำแหน่งข้าราชการพลเรือนสามัญปฏิบัติงานในกรุงเทพมหานครจำนวน 73,017 คน

ด้วยกรมธนารักษ์และสำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน (สำนักงาน ก.พ.) ได้ร่วมกันพัฒนาแนวคิดในการจัดสวัสดิการและเสริมสร้างคุณภาพงาน คุณภาพชีวิตให้แก่ข้าราชการพลเรือน โดยบูรณาการเรื่องของสถานที่พักอาศัยสถานที่ทำงานและศูนย์บริการประชาชนให้อยู่ในพื้นที่เดียวกัน ซึ่งกรมธนารักษ์ได้กำหนดให้บริษัท ธนารักษ์พัฒนาสินทรัพย์ จำกัด (ธพส.) ลงทุนพัฒนาอสังหาริมทรัพย์จัดทำโครงการสวัสดิการที่พักอาศัยของข้าราชการ (อาคารชุดพักอาศัย) 7 ชั้น 76 ห้อง แต่ละห้องมีพื้นที่ใช้สอยประมาณ 40 ตารางเมตร โดยมีสิทธิการเช่ากรรมสิทธิ์ 30 ปี

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ เพื่อให้ทราบว่าผู้เข้าร่วมโครงการฯให้ความสำคัญต่อปัจจัยใดมากที่สุดตามลำดับการวิเคราะห์ และเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาโครงการต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยและวิเคราะห์ลำดับความสำคัญโดยวิธีกระบวนการการเชิงลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP) ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ และเป็นประโยชน์ในการพัฒนาโครงการต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโด วิธีการวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการจากผู้เชี่ยวชาญ และการวิเคราะห์การจัดลำดับปัจจัยมีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการจากกลุ่มตัวอย่าง

1. การรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ

การรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการ เป็นการรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน ในหน่วยงานภาครัฐ 7 ท่าน ประกอบด้วย ระดับ อำนวยการต้น อำนวยการสูง ชำนาญการพิเศษ และชำนาญการ และ ภาคเอกชน 3 ท่าน ประกอบด้วย ผู้จัดการโครงการ วิศวกรโครงการ ของบริษัทอสังหาริมทรัพย์ และนำวิเคราะห์เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยด้วยวิธี AHP ต่อไป

2. การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ

การจัดลำดับมาตรการความปลอดภัยใช้วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP) แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ การกำหนดโครงสร้างปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการ สร้างตาราง เมทริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินใจเป็นคู่และการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัย และคำนวณดัชนีความสอดคล้องและอัตราส่วนความสอดคล้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การกำหนดโครงสร้างปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ

โดยจัดโครงสร้างปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการฯ Fig.1 ข้อมูลปัจจัยได้จากผู้เชี่ยวชาญ 10 ท่าน จากหน่วยงานภาครัฐและเอกชน จากนั้นนำข้อมูลให้กลุ่มตัวอย่างวิเคราะห์เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย และตรวจสอบความสอดล้องต่อไป

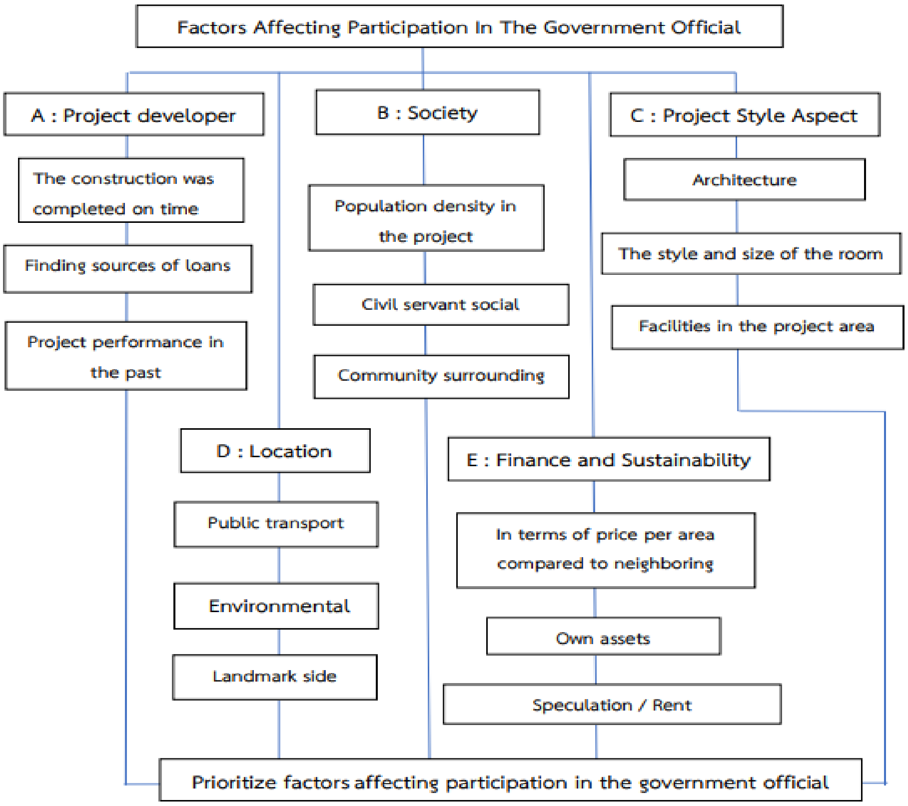


Fig.1 Structure of factors affecting participation in the government official condominium projects.

โดยมีความหมายของปัจจัยดังนี้

A: ผู้พัฒนาโครงการ หมายถึง ความน่าเชื่อถือของกลุ่มผู้ดูแลโครงการนี้ ซึ่งแบ่งเป็นปัจจัยย่อย ได้แก่ (1) ก่อสร้างสำเร็จตามเวลากำหนด หมายถึง ผู้พัฒนาโครงการสามารถบริหารโครงการได้ตามวันเวลาที่ระบุไว้ในวันทำสัญญา (2) การหาแหล่งเงินกู้ หมายถึง ผู้พัฒนาโครงการจัดหาแหล่งเงินกู้ดอกเบี้ยต่ำ (3) ผลงานโครงการในอดีต หมายถึง ผู้พัฒนาโครงการ เคยจัดทำโครงการ “คอนโดบ้านธนารักษ์” ซึ่งได้รับผลตอบรับที่ดี

B: ด้านสังคม หมายถึง สังคมแวดล้อมภายในและรอบๆโครงการ ซึ่งแบ่งเป็นปัจจัยย่อย ได้แก่ (1) ความหนาแน่นของประชากรในโครงการ หมายถึง ความแออัดของประชากรบริเวณเขตพื้นที่โครงการ (2) สังคมข้าราชการ หมายถึง ความพึงพอใจในการมีเพื่อนบ้านเป็นข้าราชการด้วยกัน (3) สภาพชุมชนโดยรอบโครงการ หมายถึง ความพึงพอใจของ วิถีชีวิตและความเป็นอยู่ของชุมชนใกล้เคียงโดยรอบโครงการ

C: ด้านรูปแบบลักษณะโครงการ หมายถึง รูปลักษณ์ของอาคาร รูปแบบขนาดของห้อง และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆภายในโครงการ ซึ่งแบ่งเป็นปัจจัยย่อย ได้แก่ (1) ด้านสถาปัตยกรรม หมายถึง ความงดงามด้านสถาปัตยกรรม (2) รูปแบบและขนาดของห้อง หมายถึง ความพึงพอใจขนาดและรูปแบบของห้องเหมาะกับการใช้ชีวิต (3) สิ่งอำนวยความสะดวกในพื้นที่โครงการ เช่น สถานที่ทำงานร่วม (Co-Working Space) และที่จอดรถ

D: ทำเลที่ตั้ง หมายถึง การเหมาะสมกับไลฟ์สไตล์ของผู้เข้าร่วมโครงการฯ บุษกร (2563) รายงานว่า วัตถุประสงค์หลักในการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียมในกรุงเทพมหานครเนื่องจากใกล้ที่ทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับผู้เชี่ยวชาญสามารถแบ่งเป็นปัจจัยย่อย ได้แก่ (1) การขนส่งสาธารณะ หมายถึง สะดวกต่อการใช้ระบบขนส่งสาธารณะมวลชน (ณัฐชยาภรณ์, 2563) (2) สิ่งแวดล้อม หมายถึง ความพึงพอใจในสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น ทัศนียภาพ สภาพอากาศโดยรอบ (3) สถานที่สำคัญ หมายถึง ศูนย์การให้บริการต่างๆทั้งภาครัฐและเอกชน

E: การเงินและความยั่งยืน หมายถึง ความต้องการในการจูงใจด้านราคา ณ ตอนเปิดโครงการฯ ซึ่งแบ่งเป็นปัจจัยย่อย ได้แก่ (1) ราคาต่อพื้นที่เมื่อเทียบกับเอกชนข้างเคียง หมายถึง พื้นที่ใช้สอย (Co-Living Space) เมื่อเทียบกับราคา (เจริญจิตต์, 2559) (2) มีสินทรัพย์เป็นของตัวเอง หมายถึง ที่พักอาศัยเป็นหลักแหล่งโดยมีสิทธิเป็นผู้เช่าระยะสัญญา 30 ปี รุ่งกานต์, พัศพันธ์ (2564) รายงานว่าการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียมประเภทเช่าระยะยาว โครงการทริปเปิ้ล วายเรสซิเดนซ โดยมีวัตถุประสงค์การซื้อเพื่ออยู่อาศัยเองถึงร้อยละ 84 (3) เก็งกำไร/ปล่อยเช่า หมายถึง การเข้าร่วมโครงการเพื่อการลงทุน

2.2 สร้างตารางเมทริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินใจเป็นคู่และการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัย

การจัดลำดับปัจจัยและทางเลือกเป็นการเปรียบเทียบคู่ปัจจัยด้วยคะแนนความสำคัญระดับ 1 ถึง 9 (Table 1 และ Table 2) ระดับคะแนนที่ได้จากการเปรียบเทียบคู่ความสำคัญความสำคัญของปัจจัย i เทียบกับปัจจัย j เท่ากับ a_{ij} และระดับความสำคัญของปัจจัย j เทียบกับปัจจัย i มีค่าเป็นส่วนกลับของ a_{ji} ($a_{ji} = 1/a_{ij}$) และค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (V_i) แสดงดัง Equation 1 เมื่อ n คือ จำนวนปัจจัยหรือทางเลือก และค่าน้ำหนักคะแนนของปัจจัยและทางเลือก (W_i) เท่ากับค่าอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของปัจจัยที่พิจารณาต่อค่าผลรวมของค่าเรขาคณิตของทุกปัจจัย

$$V_i = \left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij} \right)^{1/n} \tag{1}$$

Table 1 Criteria comparison examples and explanations. (วิทูรย์ ตันศิริมงคล, 2557)

Priority	Meaning	Description
1	Equally important	Both factors are very important.
3	Moderately More Important	One factor is moderately more important than the other.
5	Strong Important	One factor is strong important than the other.
7	Very Strongly Important	One factor is very strongly important than the other.
9	Extremely Important	One factor is extremely important than the other.
2,4,6,8	More important (to reduce gaps between values)	One factor is more important than the other in an even way. (can't explain clearly)

2.3 คำนวณดัชนีความสอดคล้องและอัตราส่วนความสอดคล้อง

การวิเคราะห์เพื่อการจัดลำดับความสำคัญปัจจัย ทำการการวิเคราะห์ข้อมูลโดยคำนวณดัชนีความสอดคล้องและอัตราส่วนความสอดคล้อง ตรวจสอบโดยใช้ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio, C.R.) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, C.I.) ต่อ ค่าดัชนีความสอดคล้องสุ่ม (Random Consistency Index, R.I.) โดย C.I. = (λmax -n) / (n-1) โดยที่ λmax เป็นค่าสูงสุดของ Eigenvalue ของเมตริกซ์ A และ ค่า R.I. ขึ้นกับจำนวนปัจจัยหรือทางเลือก (n) จากนั้นนำค่า C.R. ไปตรวจสอบความสอดคล้อง เมื่อ ค่า CR ที่ได้จะมีเกณฑ์ในการวินิจฉัยว่ามีความสอดคล้องของเหตุผลโดยดูจากจำนวนปัจจัยดังนี้ จำนวนปัจจัย 3 ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 5%, จำนวนปัจจัย 4 ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 9%, จำนวนปัจจัยเกินกว่า 5 ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 10% (Saaty,1980) ถ้าเป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าการตัดสินใจมีความสอดคล้องที่ยอมรับได้

ผลและวิจารณ์

ข้อมูลปัจจัยหลักและปัจจัยรอง ได้แก่ กลุ่ม 1 ผู้เชี่ยวชาญจากภาครัฐและเอกชน (10 ท่าน) โดยภาครัฐและเอกชน เป็นผู้ให้ข้อมูลเพื่อรวบรวมปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่มีผลต่อการเข้าร่วมคอนโดข้าราชการ และ กลุ่ม 2 กลุ่มตัวอย่าง (19 ท่าน) เป็นผู้ทำแบบทดสอบเพื่อวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นค่าน้ำหนักของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ โดยทำการหาค่าเฉลี่ยข้อมูลที่ได้จากการตอบแบบสอบถาม นำมาวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) เปรียบเทียบความแตกต่างในการให้ลำดับความสำคัญของกลุ่มตัวอย่าง 19 ท่าน พบว่า (1) ปัจจัยด้านทำเลที่ตั้ง เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุด (ร้อยละ 33.80) รองลงมาคือ (2) ปัจจัยด้านรูปแบบลักษณะโครงการ (ร้อยละ 19.80) (3) ปัจจัยด้านการเงินและความยั่งยืน (ร้อยละ 19.60) (4) ปัจจัยด้านสังคม (ร้อยละ 17.20) และน้อยที่สุดคือ (5) ปัจจัยด้านผู้พัฒนาโครงการ (ร้อยละ 9.60%) โดยมีค่าความสอดคล้อง Inconsistency Ratio (C.R.) = 0.002 (ค่าไม่เกิน 0.1) แสดงว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลถูกต้องและผ่านเกณฑ์ แสดงดัง Table 2 และ Fig. 2 การตรวจสอบค่าความสอดคล้องของการตัดสินใจ ซึ่งพบว่าค่าความสอดคล้อง (Consistency Ratio, C.R.) ของผู้ตัดสินใจทุกท่านมีค่าน้อยกว่า 0.100 (ค่าระหว่าง 0.016 ถึง 0.092) แสดงว่าการตัดสินใจมีความสอดคล้องที่ยอมรับได้

Table 2 Weight of the importance of main factors

Main factor	Weight of the importance of main factors
A : Project developer	0.096
B : Society	0.172
C : Project style aspect	0.198
D : Location	0.338
E : Finance and Sustainability	0.196

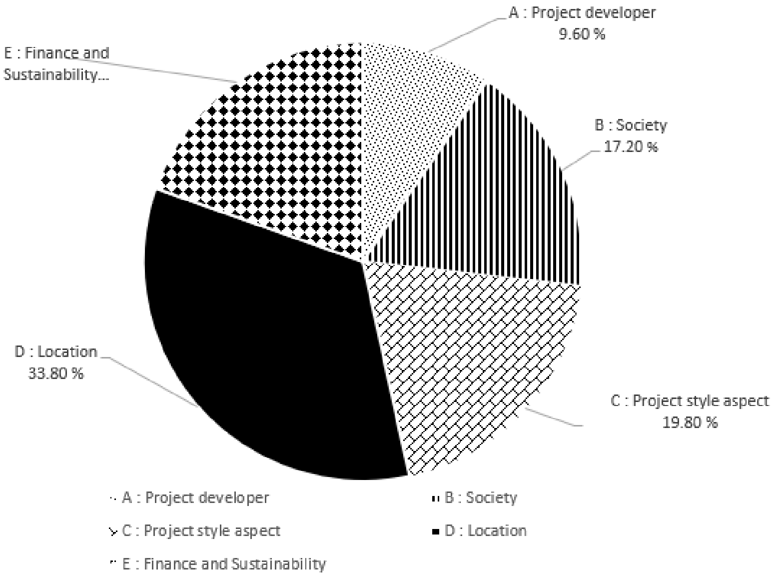


Fig. 2 Main factors affecting participation in the government official condominium projects.

2. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง

ผลการวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัยรองของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด พบว่า ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นค่าน้ำหนักของเกณฑ์ย่อย (1) ด้านผู้พัฒนาโครงการ (2) ด้านสังคม (3) ด้านรูปแบบลักษณะโครงการ (4) ด้านทำเลที่ตั้ง และ (5) ด้านการเงินและความยั่งยืน มีค่าความสอดคล้อง Inconsistency Ratio (C.R.) = 0.000, 0.000, 0.000, 0.000 และ 0.0002 (ค่าไม่เกิน 0.05) ตามลำดับ แสดงว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลถูกต้องและผ่านเกณฑ์ ดัง Table 3

Table 3 Weight of the importance of secondary factors.

Secondary factor of Project developer	Weight (W)
The construction was completed on time.	0.457
Finding sources of loans	0.245
Project performance in the past	0.298

Secondary factor of Project style aspect	Weight (W)
Architecture	0.162
The style and size of the room	0.443
Facilities in the project area	0.395

Secondary factor of Society	Weight (W)
Population density in the project	0.289
Civil servant social	0.216
Community surrounding the project	0.495

Secondary factor of Location	Weight (W)
Public transport	0.490
Environmental	0.225
Landmark side	0.285

Secondary factor of Finance and Sustainability	Weight (W)
In terms of price per area compared to neighboring private sectors	0.495
Own assets	0.255
Speculation / Rent	0.250

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยทั้งหมด ในการจัดลำดับปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเข้าร่วมโครงการคอนโดข้าราชการ โดยทำการคัดเลือกปัจจัยจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 10 ท่าน ทั้งภาครัฐและเอกชน และให้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 19 ท่านทำแบบทดสอบ สามารถสรุปปัจจัยและประยุกต์ใช้เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process : AHP) มาช่วยในการตัดสินใจให้รวดเร็วและแม่นยำขึ้น ผลการจัดลำดับความสำคัญด้วยวิธี AHP พบว่า ปัจจัยด้านทำเลที่ตั้งเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญสุด และปัจจัยรองด้านขนส่งสาธารณะเป็นปัจจัยรองที่สำคัญสุดของปัจจัยด้านทำเลที่ตั้ง ซึ่งจากการสัมภาษณ์กับกลุ่มตัวอย่าง เห็นด้วยกับปัจจัยหลักและปัจจัยรอง ได้ทำการวิเคราะห์ เนื่องจากปัจจุบันการขนส่งสาธารณะมีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น ทำให้มีแรงจูงใจในการใช้ขนส่งสาธารณะมากขึ้นและมีค่าใช้จ่ายการเดินทางถูกลง การเลือกโครงการเพื่ออยู่อาศัยจึงให้ความสำคัญด้านทำเลที่ตั้งที่ใกล้ขนส่งสาธารณะมากที่สุด ผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้พัฒนาโครงการในการวางแผนพัฒนาโครงการคอนโดราชการหรือสวัสดิการข้าราชการในในโครงการต่อไป เพื่อให้โครงการเกิดความสำเร็จและได้รับการตอบรับจากกลุ่มเป้าหมายสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญ จากหน่วยงานของรัฐและเอกชนในด้านที่เกี่ยวกับอสังหาริมทรัพย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและตอบแบบสอบถาม

เอกสารอ้างอิง

เจริญจิตต์ ผจงวิริยาทร. 2559. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อคอนโดมิเนียมในกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ณัฐชยาภรณ์ เทียมรัตน์. 2563. การตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียมของข้าราชการสำนักงานการตรวจเงินแผ่นดิน ส่วนกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

บุษกร หวังดี. 2563. ปัจจัยที่มีผลต่อความต้องการซื้อคอนโดมิเนียมของประชากรในเขตกรุงเทพมหานคร ปี 2563. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.

รุ่งกานต์ ภู่หอมเจริญ, พัศพันธน์ ชาญวสุนันท์. 2564. ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียมประเภทเช่าระยะยาว: กรณีศึกษา โครงการทริปเปิ้ล วาย เรสซิเดนซ์. สาระศาสตร์ ฉบับที่ 1/2564. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิฑูรย์ ตันศิริคงคล. 2542. AHP กระบวนการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก. กราฟฟิก แอนด์ปริ้นติ้ง. กรุงเทพฯ.

วิฑูรย์ ตันศิริคงคล. 2557. การตัดสินใจขั้นสูงเพื่อความก้าวหน้าขององค์กรและความอยู่ดีมีสุขของมหาชน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพ : อัมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่งจำกัด (มหาชน).

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศสำนักงาน ก.พ. 2563. กำลังคนภาครัฐ 2562: ข้าราชการพลเรือนสามัญ. สำนักพิมพ์ บริษัท 21 เซ็นจูรี่ จำกัด.

สมพงษ์ มอญแก้ว. 2556. การจัดลำดับแผนงานซ่อมบำรุงทางปกติโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นและวิธีการTOPSIS : กรณีศึกษาทางหลวงชนบทจังหวัดเชียงใหม่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Saaty, T.L. 1980.The Analytic Hierarchy Process. Mc Grow-Hill book Company, Inc., United States of America.

ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ของโครงการบ้านจัดสรร

Factors influencing the application for permission to allocate land of housing projects

ณัฐสรณ์ อยู่ด้วง*, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ชวเลข วณิชเวทิน

Natthason Yooduang*, Pipat Sornwong, Chavalek Vanichavetin

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: natthason.y@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญและลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ส่งผลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรร ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) โดยศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดปัจจัย รวมถึงเก็บรวบรวมข้อมูลของปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 11 ราย จากหน่วยงานของรัฐและเอกชนที่เกี่ยวกับอสังหาริมทรัพย์ ซึ่งสรุปปัจจัยหลักสำคัญ ได้แก่ ปัจจัยด้านวิศวกรรม ปัจจัยด้านกฎหมายและสังคม ปัจจัยด้านผู้บริหารหรือเจ้าของโครงการ ปัจจัยด้านการประสานงานและการทำงานของเจ้าหน้าที่ และปัจจัยด้านผลกระทบภายนอก ผลการจัดลำดับความสำคัญพบว่า ปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุดคือ ปัจจัยด้านกฎหมายและสังคม และปัจจัยรองคือ ปัจจัยด้านกฎหมายและระเบียบ (จัดสรรที่ดิน) เป็นปัจจัยรองที่สำคัญสุด โดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นด้วยกับค่าที่ได้ ข้อมูลปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับนักธุรกิจหรือผู้ที่สนใจในการประกอบธุรกิจโครงการบ้านจัดสรร เพื่อให้สามารถวางแผนโครงการที่จะจัดสรรที่ดินได้ดียิ่งขึ้น ลดความผิดพลาดและลดขั้นตอน ในการทำงาน รวมถึงมีประโยชน์ต่อหน่วยงานราชการที่ทำหน้าที่ ให้สามารถทำงานได้ง่ายขึ้น รวดเร็ว ส่งผลให้ประหยัดงบประมาณและเวลา ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยนี้ยังเป็นประโยชน์และช่วยส่งเสริมให้เกิดความสำเร็จในการพัฒนาโครงการบ้านจัดสรรต่อไป

คำสำคัญ: การจัดลำดับความสำคัญการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน, ขออนุญาตจัดสรรที่ดิน, บ้านจัดสรร

Abstract

The purpose of this research is to examine the significant factors and priorities of influencing factors that occur in applying for land allocation permits of housing projects in Bangkok area with Analytical Hierarchy Process (AHP) based on theory studies, relevant research and 11 experts' data from the government and private agencies factors related to the real estate, which consists of main factor, engineering factor, legal and social factor, management factor or project owners factor, coordination and staff performance factor and external impact factor. In conclusion, it has been proven that the legal and social factors are the most valuable parts. The legal and regulatory secondary factors (land allocation) are one of the most important secondary factors as the expert group agreed with the outcome. This research aims to bring about benefits for businesspeople and government agencies who are interested in housing projects in order to increase productivity and efficiency the housing projects of entrepreneurs, reduce the complexity and eliminate production errors to save time and budget.

Keywords: Housing estate, Permission to allocate land, Prioritization of land allocation permits

คำนำ

ในปัจจุบันโครงการบ้านจัดสรรได้สร้างขึ้นอย่างมากมายและมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากความต้องการในการซื้อที่อยู่อาศัย โดยที่ผู้อยู่อาศัยไม่จำเป็นต้องมีความรู้เรื่องงานก่อสร้าง แต่ยังคงอยากได้ที่อยู่อาศัยที่ดีและปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม จึงส่งผลให้มีผู้ประกอบการธุรกิจบ้านจัดสรรมาดำเนินการสร้างโครงการบ้านจัดสรรขึ้นอย่างมากมาย โดยมีหน่วยงานของภาครัฐเข้ามาควบคุมดูแลผู้ประกอบการ เพื่อให้การสร้างบ้านจัดสรรได้มาตรฐานและมีคุณภาพ เป็นประโยชน์ต่อผู้ซื้อบ้านจัดสรรอย่างสูงสุด โดยมีการให้ความคุ้มครองผู้อยู่อาศัยในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านการจัดตั้งนิติบุคคล ด้านผังโครงการ ด้านสาธารณูปโภค ด้านระบบความปลอดภัย เป็นต้น

เนื่องจากเกิดปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ไม่ว่าจะเป็น ความล่าช้าที่เกิดจากการเตรียมเอกสารไม่ครบถ้วน การก่อสร้างไม่เป็นไปตามผังโครงการ การขาดสภาพคล่องของเจ้าของโครงการ รวมถึงเกิดโรคระบาด Covid-19 ขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีการใช้ชีวิตที่เปลี่ยนไปจากอดีตอย่างมาก เช่น การทำงานที่เปลี่ยนไปทำให้ต้องทำงานจากที่บ้าน (Work From Home) ใช้การติดต่อประสานงานทางออนไลน์มากขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการรับรู้ที่คลาดเคลื่อนและไม่ครบถ้วนมากยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้การขออนุญาตจัดสรรที่ดินล่าช้า การก่อสร้างไม่เป็นไปตามแผนที่วางไว้หรือต้องมีการเปลี่ยนแบบผังโครงการ รวมถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่งผลกระทบในวงกว้าง

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัจจัยดังกล่าว เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน เพื่อนำไปสู่แนวทางแก้ไขปรับปรุงให้ถูกต้องและส่งเสริมให้เกิดความสำเร็จในการพัฒนาโครงการบ้านจัดสรรของผู้ประกอบการได้ดียิ่งขึ้นต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลที่ส่งผลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรร ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร

2. เพื่อสามารถลำดับความสำคัญของปัจจัยด้านต่างๆ ที่มีอิทธิพลที่ส่งผลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรรในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process : AHP)

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ของโครงการบ้านจัดสรรด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process: AHP) วิธีการวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่การรวบรวมและกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ของโครงการบ้านจัดสรร และการวิเคราะห์การจัดลำดับปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ของโครงการบ้านจัดสรร

1. การรวบรวมและกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน

การรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการทบทวนวิจัยที่เกี่ยวข้องและสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 11 ราย จากหน่วยงานของรัฐและเอกชน ซึ่งมีประสบการณ์และความเชี่ยวชาญในการทำงานด้านการขออนุญาตจัดสรรที่ดินมาอย่างยาวนาน ของโครงการบ้านจัดสรร ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ประกอบไปด้วย ตำแหน่ง อำนวยการต้น ชำนาญการ ชำนาญงาน อาวุโส ปฏิบัติการ สำนักส่งเสริมธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ กรมที่ดิน ผู้จัดการโครงการ วิศวกรโครงการ และนำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินต่อไป

2. การวิเคราะห์การจัดลำดับปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน

การจัดลำดับปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน โดยการประยุกต์ใช้วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP) แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ การกำหนดโครงสร้างปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน สร้างตารางเมทริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินใจเป็นคู่และการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัย และคำนวณดัชนีความสอดคล้องและอัตราส่วนความสอดคล้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การกำหนดโครงสร้างปัจจัยที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน

โดยทำการนำปัจจัยที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ มาจัดโครงสร้างปัจจัยที่มีอิทธิพล ในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ของโครงการบ้านจัดสรร แสดงดัง Fig.1 จากนั้นนำข้อมูลไปสอบถามและสัมภาษณ์ ผู้เชี่ยวชาญ เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและวิเคราะห์ความสอดคล้องต่อไป

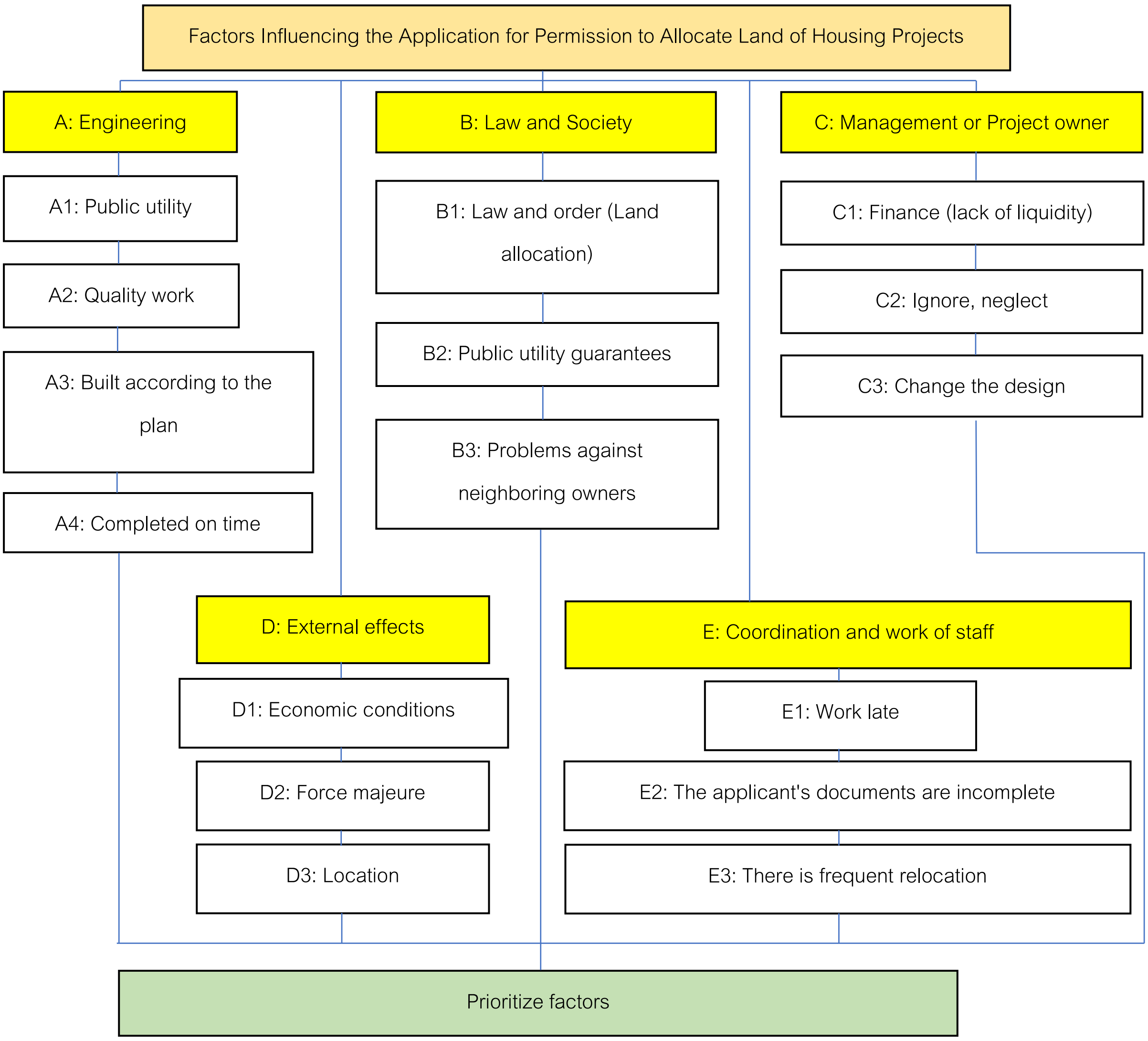


Fig.1 Structure of factors influencing land allocation permission application.

โดยความหมายของแต่ละปัจจัย มีดังนี้

A: ด้านวิศวกรรม คือ ปัจจัยที่เกี่ยวกับงานก่อสร้างทั้งในงานโครงสร้างบ้านและงานบริเวณต่างๆ ส่งผลต่อการทำงานออกแบบรวมถึงระยะเวลาที่ทำการคาดการณ์ไว้ สามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยย่อยได้ คือ A1: สาธารณูปโภค (เกี่ยวกับงานถนน ทางเข้า-ออก สุขาภิบาล การวางท่อน้ำดี-น้ำเสีย และงานบริเวณต่างๆ), A2: คุณภาพงาน (การรับรองโครงสร้างและทำการก่อสร้างให้เป็นไปตามมาตรฐาน), A3: สร้างเป็นไปตามผัง (แบบผังบริเวณโครงการที่ทำการออกแบบในการขออนุญาต), A4: เสร็จตามเวลา (การทำงานก่อสร้างให้เป็นไปตามแบบและตามเวลาที่กำหนดไว้)

B: ด้านกฎหมายและสังคม คือ ปัจจัยในเรื่องของกฎเกณฑ์ที่ส่งผลต่อการขออนุญาตจัดสรรที่ดินและปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับผู้บริโภคในการซื้อบ้านจัดสรร เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สอดคล้องกันของกฎหมายในเรื่องของเนื้อหากฎหมายและมีช่องว่างของกฎหมาย (กมลลักษณ์, 2560) แบ่งออกเป็นปัจจัยย่อย คือ B1: กฎหมายและระเบียบ (จัดสรรที่ดิน), B2: การค้ำประกันสาธารณูปโภค (หนังสือค้ำประกันสาธารณูปโภค และบริการสาธารณะโดยผู้จัดสรรจะต้องมีหนังสือสัญญาค้ำประกันจากสถาบันการเงิน เพื่อเป็นการค้ำประกันสาธารณูปโภคและบริการสาธารณะส่วนที่ยังดำเนินการไม่แล้วเสร็จ พบว่ามีผู้ขอจัดสรรที่ดินไม่ดำเนินการให้แล้วเสร็จ ถูกต้องตามแผนผัง จึงเกิดความล่าช้าในการตรวจจัดสรรที่ดิน (วีระ, 2553; บุญสนอง, 2562; ศักรพงศ์ และคณะ, 2563), B3: ปัญหาต่อต้านจากเจ้าของที่ข้างเคียง

C: ด้านผู้บริหารหรือเจ้าของโครงการ คือ ปัจจัยที่เกี่ยวกับผู้บริหารหรือเจ้าของโครงการที่ส่งผลต่อการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน มีการตัดสินใจเปลี่ยนแปลงรวดเร็วตามความต้องการของตัวเองหรือตามใจผู้อยู่อาศัย ทำให้ส่วนที่ทำการวางแผนไว้หรือกำหนดไว้เปลี่ยนแปลงเกิดความล่าช้า รวมถึงการเงินของเจ้าของโครงการด้วย สามารถแบ่งออกเป็น C1: การเงิน (ขาดสภาพคล่อง) เอกนรินทร์ (2557) รายงานว่า ปัญหาเนื่องจากการเงินของผู้รับเหมา คือการที่ผู้รับเหมารับงานหลายๆ โครงการ ขาดความชำนาญในการวางแผนการใช้จ่าย จึงส่งผลกระทบให้โครงการเกิดความล่าช้า, C2: เพิกเฉยปล่อยปะละเลย (ผู้บริหารหรือเจ้าของโครงการไม่สนใจในส่วนของการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ทำการดำเนินงานไปก่อนแล้วมาแก้ไขทีหลัง รวมถึงปล่อยปะละเลยในงานต่างๆ), C3: เปลี่ยนแปลงแบบ (ในการดำเนินการขออนุญาตจัดสรรต้องมีแบบผังโครงการไว้เพื่อขออนุญาต แต่ผู้บริหารมีคำสั่งให้เปลี่ยนแบบจึงทำให้มีผลต่อการขออนุญาต)

D: ด้านผลกระทบภายนอก คือ สิ่งที่ส่งผลทำให้การขออนุญาตจัดสรรที่ดินล่าช้าหรือไม่เป็นไปตามแผนที่วางไว้โดยไม่คาดคิดเอาไว้ก่อน สามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยย่อยได้ คือ D1: ภาวะเศรษฐกิจ (ภาวะสงคราม, วิกฤตทางการเงิน), D2: เหตุสุดวิสัย (ภัยพิบัติ, โรคระบาดทำให้ไม่มีคนทำงาน), D3: ทำเลที่ตั้ง (บริเวณที่จะขออนุญาตมีอุปสรรคในการขออนุญาตจัดสรรที่ดิน ทำให้ผู้ออกแบบผังโครงการเกิดความสับสน ซึ่งทำให้งานล่าช้า)

E: ด้านการประสานงานและการทำงานของเจ้าหน้าที่ คือ ปัญหาเกี่ยวกับการทำงานของเจ้าหน้าที่ในส่วนของการพิจารณาจัดสรรที่ดินทำให้เกิดความล่าช้า สามารถแบ่งออกได้ คือ E1: ทำงานล่าช้า (การทำงานที่ต้องตรวจสอบเอกสารมากมายทำให้เจ้าหน้าที่ทำงานได้ช้า), E2: เอกสารผู้ขอรับใบอนุญาตไม่ครบถ้วน, E3: มีการสับเปลี่ยนโยกย้ายตำแหน่งบ่อย (การเปลี่ยนตำแหน่งของเจ้าหน้าที่สำหรับจัดสรรที่ดินทำให้ผู้ที่ทำงานต่อต้องมาดำเนินงานแทนทำให้ต้องใช้เวลาในการพิจารณาจัดสรรที่ดินมากขึ้น)

2.2 สร้างตารางเมทริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินใจเป็นคู่และการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัย

การจัดลำดับปัจจัยและทางเลือกเป็นการเปรียบเทียบคู่ปัจจัยด้วยคะแนนความสำคัญระดับ 1 ถึง 9 (Table 1) ระดับคะแนนที่ได้จากการเปรียบเทียบคู่ความสำคัญ ความสำคัญของปัจจัย i เทียบกับปัจจัย j เท่ากับ a_{ij} และระดับ

ความสำคัญของปัจจัย j เทียบกับปัจจัย i มีค่าเป็นส่วนกลับของ a_{ji} ($a_{ji} = 1/a_{ij}$) และค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (V_i) แสดงดัง Equation 1 เมื่อ n คือ จำนวนปัจจัยหรือทางเลือก และค่าน้ำหนักคะแนนของปัจจัยและทางเลือก (W_i) เท่ากับ ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของปัจจัยที่พิจารณาต่อค่าผลรวมของค่าเรขาคณิตของทุกปัจจัย (วิฑูรย์, 2542)

$$V_i = \left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij} \right)^{1/n} \quad (1)$$

Table 1 Criteria comparison examples and explanations. (วิฑูรย์, 2557)

Priority	Meaning	Description
1	equally important	Both factors are very important.
3	Moderately More Important	One factor is moderately more important than the other.
5	Strong Important	One factor is strong important than the other.
7	Very Strongly Important	One factor is very strongly important than the other.
9	Extremely Important	One factor is extremely important than the other.
2,4,6,8	More important (to reduce gaps between values)	One factor is more important than the other in an even way. (can't explain clearly)

2.3 คำนวณดัชนีความสอดคล้องและอัตราส่วนความสอดคล้อง

การวิเคราะห์เพื่อการจัดลำดับความสำคัญปัจจัย ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยคำนวณดัชนี ความสอดคล้องและอัตราส่วนความสอดคล้อง ตรวจสอบโดยใช้ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio, C.R.) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, C.I.) ต่อ ค่าดัชนีความสอดคล้องสุ่ม (Random Consistency Index, R.I.) โดย C.I. = (λmax -n) / (n-1) โดยที่ λmax เป็นค่าสูงสุดของ Eigenvalue ของเมตริกซ์ A และ ค่า R.I. ขึ้นกับจำนวนปัจจัยหรือทางเลือก (n) จากนั้นนำค่า C.R. ไปตรวจสอบความสอดคล้อง เมื่อ ค่า CR ที่ได้จะมีเกณฑ์ในการวินิจฉัยว่ามีความสอดคล้องของเหตุผลโดยดูจากจำนวนปัจจัยดังนี้ จำนวนปัจจัย 3 ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 5%, จำนวนปัจจัย 4 ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 9%, จำนวนปัจจัยเกินกว่า 5 ปัจจัยค่า CR ไม่ควรเกิน 10% (Saaty, 1980) ถ้าเป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าการตัดสินใจมีความสอดคล้องที่ยอมรับได้

ผลและวิจารณ์

จากการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรร ใช้การส่งแบบสอบถามและสัมภาษณ์ให้ผู้เชี่ยวชาญ 11 ราย ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรร เพื่อเรียงลำดับความสำคัญว่าปัจจัยใดมีความสำคัญมากน้อยกว่ากันโดยทำการเปรียบเทียบปัจจัยทีละคู่พร้อมทั้งระบุความสำคัญของปัจจัย ข้อมูลที่ได้จากแบบสัมภาษณ์นำมาวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) เปรียบเทียบความแตกต่างในการให้ลำดับความสำคัญของปัจจัยของผู้บริหารและผู้มีประสบการณ์ทั้งภาครัฐและเอกชน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นค่าน้ำหนักของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรร โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของปัจจัยหลักที่ผู้เชี่ยวชาญ 11 ราย ได้ตอบแบบสอบถาม พบว่า (1) ปัจจัยด้านกฎหมาย

และสังคม เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุด (37.9%) รองลงมาคือ (2) ปัจจัยด้านวิศวกรรม (26.4%) (3) ปัจจัยด้านผู้บริหารหรือเจ้าของโครงการ (17.4%) (4) ปัจจัยด้านการประสานงานและการทำงานของเจ้าหน้าที่ (9.3%) และน้อยที่สุดคือ (5) ปัจจัยด้านผลกระทบภายนอก (9.0%) โดยมีค่าความสอดคล้อง Inconsistency Ratio (C.R.) = 0.046 (ค่าไม่เกิน 0.1) แสดงว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลถูกต้องและผ่านเกณฑ์ แสดงดัง Table 2 และ Fig. 2

Table 2 Weight of the importance of main factors

Main factor	Weight of the importance of main factors
A: Engineering	0.264
B: Law and Society	0.379
C: Management or Project owner	0.174
D: External effects	0.090
E: Coordination and work of staff	0.093

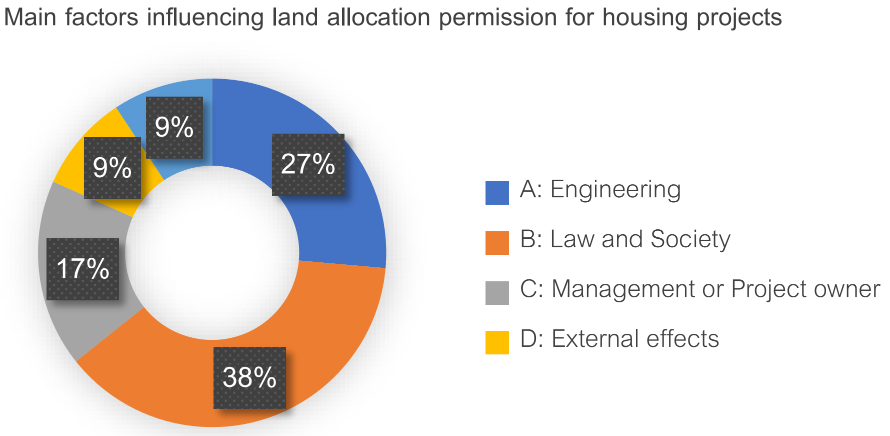


Fig. 2 Main factors influencing land allocation permission for housing projects.

2. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นค่าน้ำหนักของปัจจัยย่อย ที่มีอิทธิพลในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรร พบว่า ปัจจัยย่อย (1) ด้านวิศวกรรม (2) ด้านกฎหมายและสังคม (3) ด้านผู้บริหารหรือเจ้าของโครงการ (4) ด้านผลกระทบภายนอก (5) ด้านการประสานงานและการทำงานของเจ้าหน้าที่ มีค่าความสอดคล้อง Inconsistency Ratio (C.R.) = 0.020 (ค่าไม่เกิน 0.09), 0.0002, 0.012, 0.001 และ 0.002 (ค่าไม่เกิน 0.05) ตามลำดับ

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปัจจัยย่อย ทำให้ทราบถึงค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยและลำดับการให้ความสำคัญของปัจจัยย่อยต่างๆ ในปัจจัยหลัก แสดงดัง Table 3 ค่าน้ำหนักที่ได้สามารถนำไปวางแผนโครงการที่จะทำการจัดสรรที่ดินให้ดียิ่งขึ้น ลดความผิดพลาดและลดขั้นตอนในการทำงาน รวมถึงมีประโยชน์ต่อหน่วยงานราชการที่ทำหน้าที่ สามารถทำงานได้ง่ายขึ้น รวดเร็ว ส่งผลให้ประหยัดงบประมาณและเวลา

Table 3 Weight of the importance of secondary factors.

Secondary factor	Weight of the importance of secondary factors
A: Engineering	
A1: Public utility	0.486
A2: Quality work	0.300
A3: Built according to the plan	0.120
A4: Completed on time	0.094
B: Law and Society	
B1: Law and order (Land allocation)	0.687
B2: Public utility guarantees	0.159
B3: Problems against neighboring owners	0.154
C: Management or Project owner	
C1: Finance (lack of liquidity)	0.516
C2: Ignore, neglect	0.230
C3: Change the design	0.254
D: External effects	
D1: Economic conditions	0.643
D2: Force majeure	0.165
D3: Location	0.192
E: Coordination and work of staff	
E1: Work late	0.540
E2: The applicant's documents are incomplete	0.313
E3: There is frequent relocation	0.147

สรุป

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการรวบรวมปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลที่เกิดขึ้นในการขออนุญาตจัดสรรที่ดินของโครงการบ้านจัดสรร ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 11 ราย ทั้งภาครัฐและเอกชน สามารถสรุปปัจจัยและประยุกต์ใช้เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process : AHP) มาช่วยในการตัดสินใจให้รวดเร็วและแม่นยำขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลมาจัดโครงสร้าง ปัจจัยหลักสำคัญ ได้แก่ ปัจจัยด้านวิศวกรรม ปัจจัยด้านกฎหมายและสังคม ปัจจัยด้านผู้บริหารหรือเจ้าของโครงการ ปัจจัยด้านการประสานงานและการทำงานของเจ้าหน้าที่และปัจจัยด้านผลกระทบภายนอก ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุดคือ ปัจจัยด้านกฎหมายและสังคม และปัจจัยรองคือ ด้านกฎหมายและระเบียบ(จัดสรรที่ดิน) เป็นปัจจัยรองที่สำคัญสุด โดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นด้วยกับค่าน้ำหนักปัจจัยที่ได้ ข้อมูลปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับนักธุรกิจหรือผู้ที่สนใจในการประกอบธุรกิจโครงการบ้านจัดสรร เพื่อให้สามารถวางแผนโครงการที่จะจัดสรรที่ดินได้ดียิ่งขึ้น ลดความผิดพลาดและลดขั้นตอนในการทำงาน รวมถึงมีประโยชน์ต่อ

หน่วยงานราชการที่ทำหน้าที่ ให้สามารถทำงานได้ง่ายขึ้น รวดเร็ว ส่งผลให้ประหยัดงบประมาณและเวลา ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยนี้ยังเป็นประโยชน์และช่วยส่งเสริมให้เกิดความสำเร็จในการพัฒนาโครงการบ้านจัดสรรต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กมลลักษณ์ พันธุ์เจริญ. 2560. ปัญหากฎหมายเกี่ยวกับธุรกิจบ้านจัดสรรที่มีผลต่อผู้บริโภค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

วิฑูรย์ ตันศิริคงคล. 2557. การตัดสินใจขั้นสูงเพื่อความก้าวหน้าขององค์กรและความอยู่ดีมีสุขของมหาชน, พิมพ์ครั้งที่ 1. อัมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิซซิ่งจำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ.

วิฑูรย์ ตันศิริคงคล. 2542. AHP กระบวนการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก. กราฟฟิก แอนด์ปริ้นติ้ง. กรุงเทพฯ.

วีระ ยินดีทิพย์. 2553. ความล่าช้าจากการขออนุญาตและการจัดสรรที่ดิน: กรณีศึกษาบริษัทอสังหาริมทรัพย์เอกชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญสนอง นกยูงทอง. 2562. ปัญหาและอุปสรรคในการบังคับใช้พระราชบัญญัติการจัดสรรที่ดิน พ.ศ. 2543. ใน: การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 3 “Graduate School Conference 2019”. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, หน้า 778–785.

ศักรพงศ์ สกุลเมธากาญจน์, สังเวียน เทพผา, พระสุริยา คงคาไหว, ชวนะ ทองนุ่น, ชัชชัย ยุระพันธ. 2563. ปัญหาทางกฎหมายเกี่ยวกับการจัดทำและการดูแลบำรุงรักษาสาธารณูปโภคและบริการสาธารณะต่างๆ ของผู้จัดสรรที่ดิน. วารสารมหาจุฬานาครทรรศน์ 7: 265–280.

เอกนรินทร์ อาจทวีกุล. 2557. ปัจจัยที่ทำให้งานล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรร กรณีศึกษา: โครงการบ้านจัดสรรภูรินารา นครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Saaty, T.L. 1980. The Analytic Hierarchy Process. Mc Grow-Hill book Company, Inc., New York.

ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

Factors affecting delays in precast concrete housing projects in Bangkok and vicinities

<u>สุกัญญา คำฉายทอง</u>*, วันชัย ยอดสุดใจ, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา

<u>Sukanya Kumchaythong</u>*, Wanchai Yodsudjai, Prasert Suwanwittaya

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sukanya.kum@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความคิดเห็นของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างและบริษัทเจ้าของโครงการก่อสร้างที่มีต่อความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปและวิเคราะห์หาปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าของงานก่อสร้าง ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยจะเป็นแนวทางในการป้องกันและแก้ไขปัญหาความล่าช้าในโครงการเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงให้การก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำการวิจัยโดยเก็บรวบรวมข้อมูลการก่อสร้างบ้านจัดสรรโดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเตรียมงานก่อสร้าง ช่วงขั้นตอนการก่อสร้าง และช่วงขั้นตอนการส่งมอบงาน จากโครงการบ้านจัดสรรจำนวน 30 โครงการ แบบสอบถามที่ได้กลับคืนมาจากบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง จำนวน 19 ชุด และบริษัทเจ้าของโครงการก่อสร้าง 51 ชุด ผลการศึกษาพบว่า บริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างและบริษัทเจ้าของโครงการมีความเห็นสอดคล้องกันว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงาน ได้แก่ งบประมาณ แรงงาน แบบก่อสร้าง และงานโครงสร้าง

คำสำคัญ: ความล่าช้า, บ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป, ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้า

Abstract

The study of factors affecting delays in housing projects of precast concrete slab system purpose to survey the opinions of construction contractors and construction project owners towards the delays in precast concrete housing projects and to analyze factors causing delays in construction work. The conclusions obtained from the research will be a guideline for preventing and resolving project delays as a guideline for improving construction efficiency. This research was conducted by collecting data on housing construction in three phases: construction preparation phase, construction phase, and during the delivery process. Data from 30 housing projects, 19 sets of questionnaires were returned from construction contractors and 51 sets from construction project owners. The construction contractors and the construction project owner agree that factors affecting work delays include Budget, Labor, Construction drawings and Structure.

Keywords: Delays, Factors Affecting Delays, Precast Concrete Housing Projects

บทนำ

การก่อสร้างระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปหมายถึงการออกแบบและหล่อชิ้นส่วนต่างๆ เช่น คาน พื้น ผนัง ซึ่งเป็นองค์ประกอบของอาคารในโรงงานผลิต และขนส่งองค์ประกอบไปยังสถานที่ก่อสร้าง เพื่อประกอบองค์ประกอบที่หน้างานอย่างรวดเร็ว ทำให้ประหยัดเวลาในการทำงานโครงสร้าง ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาก่อสร้างไปได้ 3–4 เดือน ปัจจุบันการก่อสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูปได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและเป็นทางเลือกแทนโครงสร้างแบบหล่อในที่ แต่ก็มีปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความล่าช้า เช่น การสื่อสารระหว่างการทำงาน กำลังคน ทรัพยากรในการผลิต สภาพอากาศ (Ji et al., 2018) และอีกสาเหตุที่ทำให้การก่อสร้างประสบปัญหาความล่าช้าและปัญหาต่างๆอยู่เสมอ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยและมีความเสี่ยงสูง ทั้งโครงการภาครัฐและเอกชน เช่น การจ่ายเงินล่าช้า การประเมินต้นทุนของโครงการสูงไปหรือต่ำไป และการเปลี่ยนแปลงแบบก่อสร้างที่ต้องได้รับการอนุมัติ (Fashina et al., 2021) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลหาปัจจัยที่ผลต่อความล่าช้าและวิเคราะห์หาผลกระทบที่เกิดจากความล่าช้าจากงานก่อสร้างในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

วิธีการศึกษา

1. ศึกษาถึงปัญหาที่ทำให้เกิดความล่าช้าในก่อสร้าง โดยใช้วิธีการสอบถามจากผู้ที่มีประสบการณ์ตรงและผู้ที่มีความเกี่ยวข้อง โดยศึกษาข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวกับการบริหารงานก่อสร้าง และปัจจัยความล่าช้าของโครงการก่อสร้างต่างๆ โดยเนื้อหาของขั้นตอนการศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้เพื่อที่จะเป็นแนวทางและพื้นฐานในการกำหนดปัจจัยต่างๆสำหรับดำเนินการในขั้นตอนต่อไป
2. วางโครงร่างงานวิจัย กำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย กำหนดขอบเขตของงานวิจัย กำหนดแนวทางการดำเนินงานวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูล

2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง จะใช้กลุ่มตัวอย่างความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่กำลังดำเนินการก่อสร้างอยู่ จำนวน 30 โครงการ

2.2 เครื่องมือในการวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลในการดำเนินงานวิจัยนี้จะใช้แบบสอบถาม

3. การออกแบบแบบสอบถาม จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่1 ใช้เพื่อรวบรวมข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม เช่น เพศ อายุ วุฒิการศึกษา ตำแหน่ง ลักษณะองค์กร ประสบการณ์การทำงาน ส่วนที่2 ใช้รวบรวมข้อมูลความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่มีปัจจัยต่างๆ ที่จะทำให้เกิดความล่าช้าขึ้นภายในโครงการก่อสร้าง โดยจำแนกเป็นหมวดหมู่ตามขั้นตอนการก่อสร้างแล้วกำหนดระดับความถี่ (Frequency) และความรุนแรง (Violence)
4. การตอบแบบสอบถาม เก็บข้อมูลงานวิจัยโดยนำแบบสอบถามถามไปยังกลุ่มเป้าหมายที่ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างและกลุ่มบริษัทเจ้าของโครงการก่อสร้าง
5. การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล นำข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Science for Windows) โดยผลที่ได้จากแบบสอบถามถูกวิเคราะห์ในเชิงสถิติคือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล ค่าความถี่ (Frequency) ค่าความรุนแรง (Violence) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

ผลการศึกษา

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามและทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถาม โดยนำเสนอผลการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลในแบบสอบถามส่วนที่1 และส่วนที่2 โดยทำการสอบถามไปยังกลุ่มเป้าหมายที่ดำเนินธุรกิจ

เกี่ยวกับการก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง และกลุ่มบริษัทเจ้าของโครงการก่อสร้าง ซึ่งได้ทำการสอบถามไปทั้งหมด 30 โครงการ จำนวน 70 ชุด และได้ทำการวิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามในส่วนนี้ ได้แก่ เพศ อายุ วุฒิการศึกษา ตำแหน่ง ลักษณะองค์กร และประสบการณ์การทำงาน โดยนำรายละเอียดของข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์หาค่าความถี่ (Frequency) และค่าร้อยละ (Valid Percent) ของกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถาม แสดงดัง Table 1, Table 2, Table 3, Table 4, Table 5, Table 6

Table 1 Gender of respondents

Gender	Frequency	Valid Percent
Male	56	80
Female	14	20
Total	70	100

Table 2 Age of respondents

Age Range	Frequency	Valid Percent
Under 25 years	3	4.3
25–35 years	19	27.1
35–45 years	23	32.9
45 year or older	25	35.7
Total	70	100

Table 3 Educational background of respondent

Educational	Frequency	Valid Percent
Diploma	20	28.6
Bachelor's degree	40	57.1
Master's degree	10	14.3
Ph.D.	0	0
Total	70	100

Table 4 Position of respondent

Position	Frequency	Valid Percent
Foreman	24	34.3
Project Engineer	22	31.4
Project Manager	8	11.4
Other	16	22.9
Total	70	100

Table 5 Organizational characteristics

Organizational	Frequency	Valid Percent
Construction contractor	19	27.1
Project owner	51	72.9
Total	70	100

Table 6 Experience

Experience	Frequency	Valid Percent
under 10 years	18	25.7
10-15 years	14	20.0
15-20 years	18	25.7
20 years or older	20	28.6
Total	70	100

2. วิเคราะห์ปัจจัยทางด้านการเตรียมงานก่อสร้าง ที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง โดยวิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความถี่ (Frequency) ในการเกิดปัญหา ค่าเฉลี่ยของระดับความรุนแรง (Violence) ในการเกิดปัญหา แล้วนำค่าความรุนแรงมาทำการจัดเรียงลำดับจากปัจจัยทางด้านการเตรียมงานก่อสร้าง ที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง โดยแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อหลัก คือ ด้านแรงงาน ด้านงบประมาณ ด้านแบบก่อสร้าง ด้านวัสดุ ด้านเครื่องมือ ด้านการติดต่อประสานงาน

2.1 ช่วงการเตรียมงานก่อสร้าง ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปตามความคิดเห็นของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง โดยเรียงระดับความรุนแรง (Violence) จากมากไปน้อย พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในช่วงเตรียมงานก่อสร้าง 3 ลำดับแรก คือ ด้านงบประมาณ ด้านแรงงานและด้านแบบก่อสร้าง แสดงดัง Table 7 ด้านงบประมาณเป็นปัจจัยหลักสำหรับบริษัทผู้รับเหมา เนื่องจากผู้รับเหมาในโครงการบ้านจัดสรรส่วนใหญ่จะเป็นผู้รับเหมารายย่อยหรือรายเล็กๆซึ่งอาจจะมีเงินทุนหมุนเวียนไม่มาก หรือว่าการจ่ายเงินล่าช้าโดยเจ้าของงาน (Durdyev et al., 2017) จึงทำให้ไม่สามารถตัดสินใจรับงานก่อสร้างได้ทันที ด้านแรงงาน เช่น การขาดแคลนแรงงาน อาจเกิดจากแรงงานไปทำงานที่ภาคอุตสาหกรรมตามโรงงานหรือกลับภูมิลำเนาไปทำเกษตรกรรม ทำให้ต้องหาแรงงานจากที่อื่นมาเพิ่ม แบบก่อสร้าง ควรมีการตรวจสอบแบบหรือแก้ไขแบบก่อสร้างให้ถี่ถ้วนก่อนนำมาใช้ก่อสร้าง เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงและแก้ไขแบบก่อสร้างภายหลัง

Table 7 Information on the views of contractor companies on delays in construction preparation.

Delay Factors	Construction contractor				
	Frequency	Effect	Violence	Standard deviation	Rank
Budget	4.00	3.95	.6379	.943	1
Construction drawings	3.84	3.68	.5789	1.068	2
Labor	3.68	3.74	.5705	1.108	3

2.2 ช่วงการเตรียมงานก่อสร้าง ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ตามความคิดเห็นของบริษัทเจ้าของโครงการก่อสร้าง โดยเรียงระดับความรุนแรง (Violence) จากมากไปน้อย พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในช่วงเตรียมงานก่อสร้าง 3 ลำดับแรก คือ ด้านแรงงาน ด้านแบบก่อสร้างและด้านงบประมาณ แสดงดัง Table 8 ด้านแรงงาน ควรมีการประมาณจำนวนแรงงานให้เหมาะสมกับปริมาณงาน และควรจัดหาแรงงานมาให้เพียงพอก่อนเริ่มงาน ด้านแบบก่อสร้าง ควรมีการตรวจสอบแบบโครงสร้างและแบบสถาปัตยกรรมว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ เพราะว่าเมื่อเริ่มงานไปแล้วแบบก่อสร้างไม่ถูกต้อง ทำให้การก่อสร้างผิดไปจากแบบ ทำให้เสียเวลาในการทำงานและเสียค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงาน ด้านงบประมาณเป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้เกิดปัจจัยอื่นๆ เช่น งบประมาณในการจัดซื้อจัดหาเครื่องมือมีไม่เพียงพอ จึงต้องมีการรอคอยเครื่องมือในการทำงาน

Table 8 Information on project owner views on delays in construction preparation

Delay Factors	Project owner				
	Frequency	Effect	Violence	Standard deviation	Rank
Labor	3.69	4.14	.6298	1.086	1
Construction drawings	3.73	4.02	.6267	1.150	2
Budget	3.61	3.98	.5914	1.002	3

3.วิเคราะห์ปัจจัยทางด้านการก่อสร้าง ที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง โดยวิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความถี่ (Frequency) ในการเกิดปัญหา ค่าเฉลี่ยของระดับความรุนแรง (Violence)ในการเกิดปัญหา แล้วนำค่าความรุนแรงมาทำการจัดเรียงลำดับจากปัจจัยทางด้านการก่อสร้าง ที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง โดยแบ่งออกเป็น 22 ปัจจัย ดังนี้ ด้านแรงงาน ด้านงบประมาณที่ใช้ในการก่อสร้าง ด้านแบบก่อสร้าง ด้านวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานก่อสร้าง ด้านการติดต่อประสานงาน ด้านการควบคุมงาน ด้านงานเสาเข็ม ด้านงานฐานราก ด้านงานติดตั้งประกอบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ด้านงานโครงหลังคา ด้านงานกระเบื้องมุงหลังคา ด้านงานประตู-หน้าต่าง ด้านงานบันได ด้านงานก่อ-ฉาบ ด้านงานปูกระเบื้องต่างๆ ด้านงานระบบประปา ด้านงานระบบไฟฟ้า ด้านงานฝ้าเพดาน ด้านงานสี ด้านงานสุขภัณฑ์ ด้านงานกระจก

3.1 ช่วงการก่อสร้าง ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ตามความคิดเห็นของบริษัทผู้รับเหมา โดยเรียงระดับความรุนแรง (Violence) จากมากไปน้อย พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในช่วงการก่อสร้าง 3 ลำดับแรก คือ ด้านแบบก่อสร้าง ด้านงบประมาณและด้านการติดต่อประสานงาน แสดงดัง Table 9 ด้านแบบก่อสร้าง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงและแก้ไขแบบก่อสร้างตอนที่เริ่มงานก่อสร้างไปแล้ว ทำให้ต้องมีการเจาะหรือสกัดผนังสำเร็จรูป ควรมีการตรวจสอบแบบสถาปัตยกรรมและแบบโครงสร้างว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ (ชิษณุพงศ์, 2562) ด้านงบประมาณ เช่น การจ่ายเงินงวดงานให้ผู้รับเหมาและแบ่งงวดงานให้ผู้รับเหมาไม่สอดคล้องกับการทำงานและค่าใช้จ่ายจริงในแต่ละงวด ทำให้ผู้รับเหมาต้องมีเงินสำรอง ด้านการติดต่อประสานงาน เช่น ร้านวัสดุส่งของไม่ทันตามกำหนด ทำให้ส่งผลกระทบต่อโครงการ จึงควรมีกำชับร้านวัสดุและตรวจสอบยอดการใช้งานเพื่อป้องกันการขาดแคลนวัสดุ

Table 9 Information on the views of construction companies on delays in the construction process.

Delay Factors	Construction contractor				
	Frequency	Effect	Violence	Standard deviation	Rank
Construction drawings	3.84	3.63	.5811	1.214	1
Budget	3.68	3.74	.5789	1.108	2
Coordination	3.74	3.42	.5558	1.046	3

3.2 ช่วงการก่อสร้าง ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ตามความคิดเห็นของบริษัทเจ้าของโครงการ โดยเรียงระดับความรุนแรง (Violence) จากมากไปน้อย พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในช่วงการก่อสร้าง 3 ลำดับแรก คือ ด้านแรงงาน ด้านแบบก่อสร้างและด้านงบประมาณ แสดงดัง Table 10 ด้านแรงงาน เช่น คนงานขาดทักษะในการทำงาน ทำให้ใช้เวลาในการทำงานที่มากกว่าปกติ และอาจได้งานที่ไม่ได้มาตรฐาน ทำให้ต้องมีการแก้ไขงานและส่งผลกระทบต่อความล่าช้าของโครงการได้ ด้านแบบก่อสร้าง เช่น มีการแก้ไขแบบระหว่างการก่อสร้าง ทำให้การก่อสร้างหยุดชะงัก จึงควรมีการตรวจสอบแบบก่อสร้างที่ดี เพื่อลดโอกาสในการทำงานผิดพลาด ด้านงบประมาณ เช่น การประมาณการค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงหรือต่ำไป ทำให้ต้องมีการจัดทำงานเพิ่ม-ลด ซึ่งงานบางอย่างก็ต้องรอการอนุมัติงบประมาณจากเจ้าของโครงการก่อนถึงจะดำเนินการได้

Table 10 Information on project owner views on delays in the construction process

Delay Factors	Project owner				
	Frequency	Effect	Violence	Standard deviation	Rank
Labor	3.78	4.02	.6361	1.083	1
Construction drawings	3.80	3.71	.5827	.960	2
Budget	3.73	3.75	.5773	1.002	3

4. วิเคราะห์ปัจจัยทางด้านการส่งมอบงาน ที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง โดยวิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความถี่ในการเกิดปัญหา ค่าเฉลี่ยของระดับความรุนแรงในการเกิดปัญหา แล้วนำค่าความรุนแรงมาทำการจัดเรียงลำดับจากปัจจัยทางด้านการส่งมอบงาน ที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง โดยแบ่งออกเป็น 14 ปัจจัย ดังนี้ ด้านงานโครงสร้าง ด้านงานพื้น ด้านงานหลังคา ด้านงานก่อ-ฉาบ ด้านงานบันได ด้านงานกระเบื้อง ด้านงานประตู-หน้าต่าง ด้านงานฝ้าเพดาน ด้านงานสี ด้านงานกระจก ด้านงานระบบไฟฟ้า ด้านงานระบบประปา ด้านงานติดตั้งสุขภัณฑ์ ด้านงานทำความสะอาด

4.1 ช่วงการส่งมอบงาน ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ตามความคิดเห็นของบริษัทผู้รับเหมา โดยเรียงระดับความรุนแรง (Violence) จากมากไปน้อย พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในช่วงการส่งมอบงาน 3 ลำดับแรก คือ ด้านงานพื้น ด้านงานโครงสร้างและด้านงานทำความสะอาด แสดงดัง Table 11 ด้านงานพื้น เช่น การปรับพื้นชั้นบนเพื่อปูไม้ลามิเนต ซึ่งถ้าพื้นไม่ได้ระดับและปูไม้ลามิเนตไป จะทำให้พื้นยุบยวบ ซึ่งจะต้องทำการรื้อไม้ลามิเนตและปรับพื้นใหม่ ทำให้เสียเวลาเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำงาน ด้านงานโครงสร้าง เช่น การตรวจสอบช่องเปิดประตูและหน้าต่าง รอยร้าวที่แผ่นสำเร็จรูป รวมไปถึงการเข้ามุมผนังต้องตรงและได้ฉาก ควรมีการให้ช่างที่เชี่ยวชาญในด้านการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปตรวจสอบก่อน เนื่องจากถ้ามีการแก้ไขตอนช่วงส่งมอบงาน ก็

จะต้องแก้ไขงานอื่นๆที่ทำแล้วเสร็จไปด้วย ด้านงานทำความสะอาด ปัจจัยเรื่องความสะอาดทำให้การส่งมอบงานช้าได้ เนื่องจากต้องมาเก็บงานต่างๆ ควรมีการป้องกัน เช่น ถ้าส่วนไหนเก็บงานเสร็จแล้วหรือทาสีแล้วก็ควรมีการป้องกันส่วนนั้นๆ

Table 11 Information on the views of the contractor companies on the delays in the delivery process.

Delay Factors	Construction contractor				
	Frequency	Effect	Violence	Standard deviation	Rank
Floor	2.53	2.79	.2884	.772	1
Structure	2.26	2.84	.2842	.991	2
Cleaning	3.00	2.32	.2842	.943	3

4.2 ช่วงการส่งมอบงาน ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ตามความคิดเห็นของบริษัทเจ้าของโครงการ โดยเรียงระดับความรุนแรง (Violence) จากมากไปน้อย พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในช่วงการส่งมอบงาน 3 ลำดับแรก คือ ด้านงานสี ด้านงานกระเบื้องและด้านงานโครงสร้าง แสดงดัง Table 12 ด้านงานสี การเก็บสีถือว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายของงานก่อสร้าง จึงควรแก้ไขงานต่างๆให้แล้วเสร็จทั้งหมดค่อยเก็บสี ด้านงานกระเบื้อง เช่น กระเบื้องพื้นโถงชั้นล่าง ซึ่งเป็นจุดที่สำคัญเนื่องจากถ้าไม่มีการป้องกันกระเบื้องที่ปูเสร็จแล้ว ก็อาจทำให้กระเบื้องเป็นรอย ต้องมาเสียเวลาเปลี่ยน และถ้าเป็นรอยหลายแผ่นก็อาจจะต้องเสียเวลาหากระเบื้องที่เฉดสีคล้ายเดิมมาเปลี่ยน ด้านงานโครงสร้าง เช่น รอยต่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปอาจมีรอยแตกร้าวหรือว่าผิวผนังอาจจะไม่เรียบ เป็นคลื่น ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุมาจากโมลหล่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป หรือว่าจะเป็นปัญหาน้ำรั่ว ที่เกิดจากการออกแบบหรือว่าการติดตั้ง ทำให้ต้องเข้าแก้ไขงานหลังจากงานอื่นเสร็จหมดแล้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความล่าช้าและต้องเข้าทำความสะอาดหลายรอบ ผู้ควบคุมงานจะต้องตรวจสอบเรื่องรอยต่อ รอยร้าว ก่อนทาสีรอบสุดท้าย ซึ่งจุดที่พบปัญหาดังกล่าวซ้ำๆ คือผนังภายนอก

Table 12 Information on project owner views on delay factors in the delivery process

Delay Factors	Project owner				
	Frequency	Effect	Violence	Standard deviation	Rank
Painted	3.02	2.84	.3812	1.304	1
Tiling	2.78	2.82	.3451	1.064	2
Structure	2.51	3.02	.3412	1.155	3

สรุป

การดำเนินงานทุกกิจกรรมย่อมต้องมีปัญหาและอุปสรรคให้แก้ไขในขณะดำเนินการ งานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ก็เป็นงานหนึ่งที่มีปัญหาและอุปสรรคมากมายกว่างานก่อสร้างจะแล้วเสร็จ ถึงแม้ว่าจะลดเวลาและขั้นตอนของงานโครงสร้างไปแล้ว ก็ยังพบว่าการก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นมีระยะเวลาในการทำงานน้อยเมื่อเทียบกับการก่อสร้างในลักษณะที่คล้ายๆกัน

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยฉบับนี้จะช่วยให้การพัฒนาในเรื่องการปรับปรุงมาตรฐานการทำงานก่อสร้างให้เพิ่มขึ้นและสามารถแก้ไขปัญหาในแต่ละด้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการสำรวจปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการบ้าน

จัดสรรระบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป พบว่า บริษัทผู้รับเหมาและบริษัทเจ้าของโครงการ มีความเห็นสอดคล้องกันว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงาน ได้แก่ ด้านแรงงาน ด้านแบบก่อสร้าง ด้านงบประมาณและด้านงานโครงสร้าง เช่น ด้านแรงงาน ควรจัดเตรียมจำนวนแรงงานให้เหมาะสมกับปริมาณงาน และควรจัดหาแรงงานมาให้เพียงพอตั้งแต่ก่อนเริ่มงาน ด้านแบบก่อสร้าง ควรมีการตรวจสอบแบบหรือแก้ไขแบบก่อสร้างให้ถี่ถ้วนก่อนนำมาใช้ก่อสร้าง เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงและแก้ไขแบบก่อสร้างภายหลัง ด้านงบประมาณ ควรมีการประมาณการและวางแผนรายรับ-รายจ่าย การเบิกงวดงานเพื่อให้เกิดการเกิดสภาพคล่องทางการเงิน ด้านงานโครงสร้าง การติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ควรมีการตรวจสอบความเรียบร้อยโดยผู้เชี่ยวชาญ เช่น การติดตั้งแผ่นถูกต้อง ผนังห้องได้ฉาก รอยเชื่อมต่อของแต่ละแผ่นครบและเรียบร้อย ก่อนส่งมอบให้ทางผู้รับเหมางานสถาปัตยกรรมเพื่อป้องกันการแก้ไขซ้ำไปซ้ำมา ดังนั้นจึงควรมีการวางแผนเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาหน้างานที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้าง เพื่อป้องกันการเกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ต้องขอขอบคุณผู้บริหารและผู้ควบคุมงานในโครงการก่อสร้างต่างๆทุกท่านที่ให้ข้อมูลและตอบแบบสอบถามเพื่อการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ชิษณุพงศ์ คงปรีชากุล. 2562. การศึกษาความเสี่ยงที่มีผลกระทบในการก่อสร้างโครงการบ้านพักอาศัย กรณีศึกษาบริษัทเจ้าของโครงการ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Fashina, A.A., Omar, M.A., Sheikh, A.A. Fakunl, F.F. 2021. Exploring the significant factors that influence delays in construction projects in Hargeisa. Heliyon 7: e06826. doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06826

Durdyev, S., Omarov, M., Ismail, S. 2017. Causes of delay in residential construction projects in Cambodia. Cogent Eng. 4: 1–12. doi.org/10.1080/23311916.2017.1291117

Ji, Y., Qi, L., Liu, Y., Liu, X., Li, H.X. Li, Y. 2018. Assessing and prioritising delay factors of prefabricated concrete building projects in China. Appl. Sci. 8: 2324. doi.org/10.3390/app8112324

การศึกษาสาเหตุความล่าช้าต่อการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียม

A study of factors that cause the delay inspection in condominium units

พิมพิดา ฝั่งสินธุ์*, วัชรินทร์ วิทยกุล, พิพัฒน์ สอนวงษ์

Pimpida fungsin*, Watcharin Witayakul, Pipat Sornwong

สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กรุงเทพฯ 10900

Infrastructure Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pimpida.f@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาลักษณะข้อบกพร่องที่สำคัญในการตรวจรับคอนโดมิเนียม และหาสาเหตุและแนวทางแก้ไขของข้อบกพร่องและเปรียบเทียบกับรอยร้าวที่เกิดจากโครงสร้างเสียหาย เพื่อลดระยะเวลาของการดำเนินการโอนกรรมสิทธิ์คอนโดมิเนียม คือ การตรวจรับคอนโดมิเนียม โดยใช้หลักการพาเรโต (Pareto) และแผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) จากการศึกษาพบว่า มีข้อบกพร่องหลัก 7 รายการจากทั้งหมด 59 รายการ โดยหมวดที่พบข้อบกพร่องมากที่สุดคือหมวดผนัง โดยเกี่ยวกับการฉาบปูนผนัง 27.93% โดยมีข้อบกพร่อมสำคัญของงานเก็บงานปูน 69.04 %และหากลดข้อบกพร่องหลักทั้ง 7 รายการนี้ได้จะสามารถลดผลกระทบได้ 81.69% ทั้งนี้จากผลการสัมภาษณ์วิศวกรโครงสร้าง พบว่าส่วนมากรอยร้าวที่เกิดขึ้นในหมวดผนังในงานวิจัยนี้ เป็นรอยร้าวที่ไม่ได้เกิดขึ้นจากความเสียหายของโครงสร้างซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย และกำหนดแนวทางแก้ไขด้วยการวิเคราะห์แผนภูมิก้างปลาจากข้อมูลพาเรโต พบว่าขาดคนงานที่มีฝีมือ คนงานไม่เพียงพอ ผู้รับเหมาทิ้งงานกลางคัน วัสดุไม่ตรงตามข้อกำหนด วัสดุขาดตลาดและการขึ้นราคาของวัสดุ ขาดเครื่องมือที่มีคุณภาพ ขั้นตอนการตรวจสอบไม่มีความรัดกุม การควบคุมงานโดยผู้ไม่มีประสบการณ์ และสภาพแวดล้อมในการทำงาน โดยสาเหตุที่ส่งผลต่อความล่าช้าต่อการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียมมากที่สุดคือ ขั้นตอนการตรวจสอบไม่มีความรัดกุม และการขาดคนงานที่มีฝีมือ

คำสำคัญ: การตรวจรับคอนโดมิเนียม, คอนโดมิเนียม, พาเรโต

Abstract

This study aims to characterize the significant defects in condominium acceptance inspection, by finding the causes and solutions including comparing them with the cracks caused by structural damage to shorten the time for the transfer of ownership of the condominium. Using the Pareto principle and the cause-and-effect diagram, the study found that 7 of 59 listed and the highest defects were plastering the walls 27.93% which is from defects in concrete finishing 69.04%, hence if these defects diminished, will reduce the impact 81.69%. Also, the results of interviews with structural engineers, found most of the cracks that occurred in the wall category does not occur from structural damage which is consistent with the research. Hence, formulated solutions by analyzing fishbone charts from Pareto found that there was a lack of skilled workers and not enough workers, materials that do not meet specifications, material shortages, material price increases, and a lack of quality tools, the verification process is not cautious, work supervision by inexperienced people, and work environment. The reason that affects the delay in the inspection of condominium rooms the most is the verification process is not circumspect and the lack of skilled workers.

Keywords: Cause and effect diagram, Condominium inspection, Pareto

คำนำ

การตรวจรับคอนโดมิเนียม ถือเป็นขั้นตอนหนึ่งของการดำเนินการโอนกรรมสิทธิ์คอนโดมิเนียม ซึ่งเป็นกระบวนการการตรวจสอบและยอมรับคุณภาพด้านงานก่อสร้างก่อนที่ทางโครงการจะส่งมอบให้กับผู้ซื้อ และดำเนินการโอนกรรมสิทธิ์ต่อไป หากกระบวนการนี้เกิดความผิดพลาดหรือไม่ตรงตามคุณภาพ จะทำให้ส่งผลต่อภาพลักษณ์ของบริษัทอสังหาริมทรัพย์ได้ จากปัญหาและแนวคิดที่กล่าวมา ผู้วิจัยได้จัดทำงานวิจัยเพื่อศึกษาข้อบกพร่องที่มีผลต่อความล่าช้าในการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียม โดยใช้หลักการพาเรโต (Pareto) และแผนผังแสดงเหตุและผลอธิบายสาเหตุของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการตรวจรับคอนโดมิเนียม รวมทั้งสรุปข้อมูลเพื่อเสนอแนะแนวทางการจัดการความล่าช้าในการตรวจรับคอนโดมิเนียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินการตรวจรับคอนโดมิเนียม ซึ่งส่งผลต่อการสร้างความน่าเชื่อถือของโครงการ และความพึงพอใจของลูกค้า แก้วเจริญ (2559) ศึกษาถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการส่งมอบบ้านเดี่ยว โดยศึกษารายการแก้ไขงานสถาปัตยกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างการส่งมอบบ้านสู่ลูกค้า ผลการศึกษา พบว่าบ้านจะต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบและแก้ไข 2 ถึง 7 ครั้งในการส่งมอบ โดยรายการแก้ไขงานสถาปัตยกรรมที่เกิดขึ้น มากที่สุดคือ พื้นลามิเนต พรมพิมพ์ (2561) ศึกษาผลกระทบจากการแก้ไขงานสถาปัตยกรรมระหว่างส่งมอบ บ้านพักอาศัยระบบสำเร็จรูป กรณีศึกษา โครงการโมดิวิลล่า บางนา จังหวัดสมุทรปราการ เพื่อศึกษาปัญหาด้านคุณภาพที่ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในโครงการก่อสร้าง โดยใช้วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลจากวิธีการตรวจสอบบ้านโดยเจ้าของบ้านหรือบริษัทตรวจสอบภายนอก และวิธีการวิเคราะห์คือการใช้ทฤษฎี Pareto 80/20 ผลการวิเคราะห์พบว่า จากการแก้ไขงานบ้านเดี่ยว หมวดงานผนังเป็นงานที่มีรายการแก้ไขงานมากที่สุดถึง 44.16% เอ่งฉ้วน (2563) ศึกษาต้นทุนคุณภาพในงานสถาปัตยกรรมในโครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียมโดยนำคำสั่งการแก้ไขงานสถาปัตยกรรม พบว่ามีข้อบกพร่องสำคัญ 12 รายการ จากทั้งหมด 33 รายการ ผลการศึกษาพบว่าข้อบกพร่องสำคัญมากที่สุดคือหมวดผนังโดยเป็นข้อบกพร่องเกี่ยวกับผนังปูนฉาบเรียบ

อุปกรณ์และวิธีการ

จากศูนย์ข้อมูลอสังหาริมทรัพย์ ช่วงเดือนมิถุนายน (ไตรมาส 2) ปี พ.ศ. 2565 ที่มียอดขาดสูงสุดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร แบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ 1.โซนธนบุรี-คลองสาน-บางกอกน้อย-บางกอกใหญ่-บางพลัด 2.โซนห้วยขวาง-จตุจักร-ดินแดง 3.โซนพระโขนง-บางนา-สวนหลวง-ประเวศ การคัดเลือกพื้นที่จำนวนหน่วยของคอนโดมิเนียมที่นำศึกษา ผู้วิจัยนำการคำนวณหากลุ่มตัวอย่าง ของยามาเน่ (Taro,1973) จำนวนหน่วยของของคอนโดมิเนียมที่นำศึกษา คือ 377 หน่วย การหาข้อบกพร่องโดยใช้ ทฤษฎีพาเรโต (Pareto) พัฒนาโดย Dr. Joseph M. Juran (พงศ์พรทรัพย์, 2555) โดยหลักการของพาเรโต กล่าวว่า ปัญหาที่มีความสำคัญในระดับ 80% มักจะมีสาเหตุมาจากปัญหา 20% ของสาเหตุทั้งหมด ในขณะที่อีก 80% ของสาเหตุจะมีผลกระทบต่อปัญหาที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อย แผนภูมิพาเรโตจะเป็นเครื่องมือชี้ให้เห็นถึงว่าปัญหาสำคัญจริงๆนั้นมาจากไม่กี่สาเหตุ ซึ่งไม่จำเป็นต้องแก้ทุกสาเหตุให้หมด แต่ให้เลือกแก้เฉพาะสาเหตุหลักที่สำคัญ การหาสาเหตุด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือผังก้างปลา (Coccia, 2017; Raman and Basavaraj, 2019) คือแผนภาพที่แสดงโครงสร้างความสัมพันธ์ของสาเหตุ และผลลัพธ์ ซึ่งจะทำให้สามารถมองแนวทางการแก้ไขปัญหาที่สาเหตุได้ โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้ กำหนดปัญหาที่หัวปลาและการกำหนดปัจจัยบนก้างปลา ซึ่งกลุ่มที่กำหนดไว้เป็นปัจจัยนั้น สามารถช่วยแยกแยะสาเหตุได้อย่างเป็นระบบ และเป็นเหตุเป็นผล โดยส่วนมากมักจะใช้หลักการ 4M ประกอบด้วย Man, Material, Machine และ Method จากนั้นจึงระดมสมองเพื่อหาสาเหตุในแต่ละปัจจัย รวมทั้ง หาสาเหตุหลักของปัญหา และการจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ และท้ายสุดคือการใช้แนวทางการปรับปรุงที่จำเป็น

ขั้นตอนการดำเนินวิจัย

การวิจัยนี้ มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังแสดงใน Fig. 1 ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสาร งานวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อทบทวนและจัดกลุ่มของสาเหตุข้อบกพร่องรวมของรายงานการตรวจรับคอนโดมิเนียม โดยแบ่งเป็นหมวดหลักและหมวดย่อย และวิเคราะห์ ข้อบกพร่องในการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียมด้วยหลักการพาเรโต้ รวมทั้งวิเคราะห์ข้อบกพร่องสำคัญด้วยหลักการพาเรโต้ครั้ง จากนั้นจึงได้ศึกษาสาเหตุความล่าช้าต่อการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียม รวมรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์และวิเคราะห์ผลเพื่อกำหนดแนวทางแก้ไขโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิก้างปลา (Fishbone diagram) และสรุปผลการศึกษา

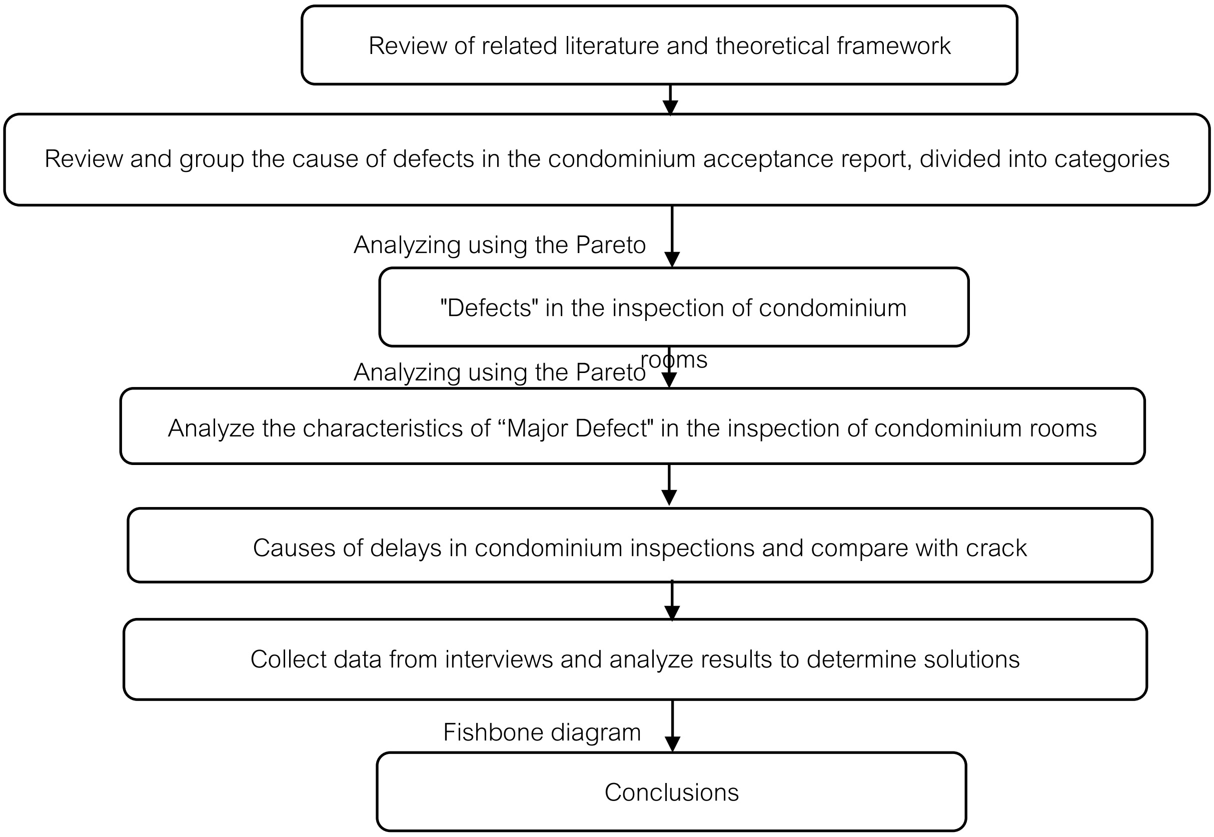


Fig. 1 Research methodology

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การวิเคราะห์ข้อบกพร่อง

จากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องหลักด้วยหลักการพาเรโต้ พบว่า มีข้อบกพร่องอยู่ 7 รายการจากข้อบกพร่องทั้งหมด 59 รายการใน Table 1 และหากลดข้อบกพร่อง 7 รายการนี้ได้จะสามารถลดผลกระทบได้ 81.69 % โดย 7 รายการนี้ อยู่ในหมวดผนัง(W) จำนวน 5 รายการ ได้แก่ การฉาบปูนผนัง (W1) ผนังไม่ได้ดิ่ง (W2) การเก็บงานทาสี (W5) การรั่วซึม (W3) และความชื้น (W4) โดยข้อบกพร่องของหมวดผนัง (W) ดังกล่าว คิดเป็น 59.98% ของข้อบกพร่องทั้งหมด นอกจากนี้ ยังพบข้อบกพร่องอยู่ในหมวดพื้น (F) และหมวดประตู (D) อย่างละ 1 รายการ ดังแสดงใน Fig. 2 และ Fig. 3

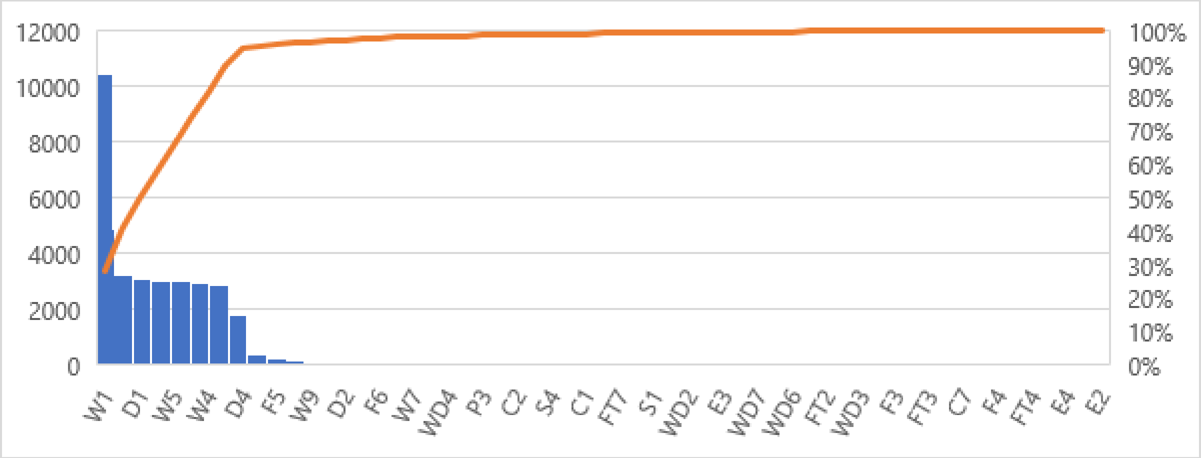


Fig. 2 Pareto chart show all the Importance Defect

Table 1 Details about Importance Defect

No.	Defect	No. of Defect	Percent	cumulative percentage
1	Wall plastering (W1)	10445	27.93	27.93
2	Floor flatness (F2)	4871	13.02	40.95
3	Installation completed (D1)	3251	8.69	49.65
4	Vertical alignment (W2)	3050	8.16	57.80
5	Paint repair (W5)	3040	8.13	65.93
6	Leakage (W3)	2992	8.00	73.93
7	Moisture (W4)	2901	7.76	81.69

(A) Wall plastering (W1) (B) Floor flatness (F2) (C) Installation completed (D1)

Fig. 3 Importance Defects

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องสำคัญที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ การฉาบปูนผนัง (W1) และนำไปหารายละเอียดย่อยได้ด้วยหลักการวิเคราะห์พาเรโต้อีกครั้ง เพื่อระบุลักษณะข้อบกพร่องสำคัญในการฉาบปูนผนัง พบว่า ข้อบกพร่องสำคัญในการการฉาบปูนผนัง มีหัวข้อย่อย ทั้งสิ้น 13 หัวข้อย่อย และหากป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่อง ในการเก็บงานปูน (W1.1) และความราบเรียบของผนัง (W1.2) จะสามารถลดผลกระทบของปัญหาที่เกิดจากงานฉาบปูนผนังได้ 78.82% ดังแสดงใน Fig. 4 และ Table 2

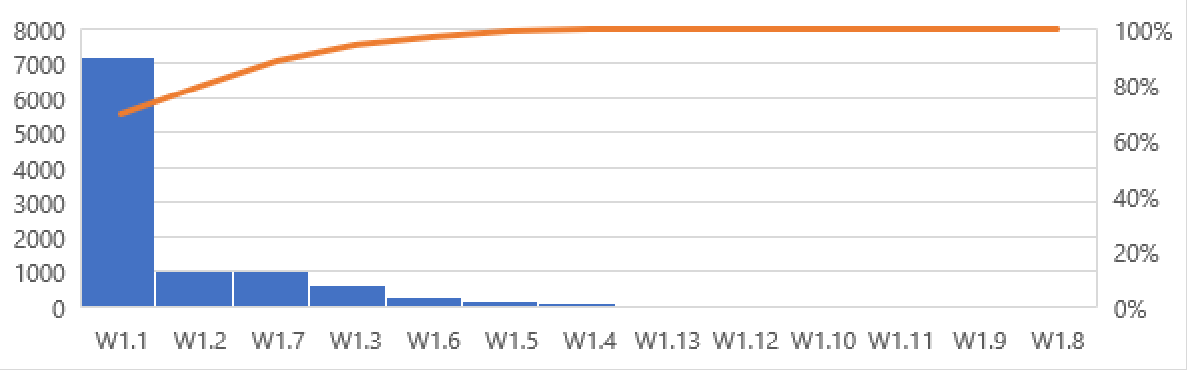


Fig. 4 The Pareto chart shows the Importance Defect of plastering the wall

Table 2 Details the Importance Defect of plastering the wall

No.	Defect	No. of Defect	Percent	Cumulative Percentage
1	Plastering (W1.1)	7211	69.04	69.04
2	Smoothness of the wall (W1.2)	1021	9.78	78.82
3	Paint (W1.7)	1004	9.61	88.43
4	Keep skim work (W1.3)	621	5.95	94.37
5	Groove (W1.6)	282	2.70	97.07
6	Groove to reveal the foam (W1.5)	179	1.71	98.79
7	Checking line of wall (W1.4)	89	0.85	99.64
8	Ceiling (W1.13)	12	0.11	99.75
9	Build-in (W1.12)	9	0.09	99.84
10	Cleaning (W1.10)	7	0.07	99.91
11	Cut steel (W1.11)	7	0.07	99.97
12	Fame (W1.4)	2	0.02	99.99
13	Lighting box (W1.8)	1	0.01	100.00

จากข้อบกพร่องสำคัญของงานผนังทั้งหมด จำนวน 8232 รายการ คิดเป็น 78.82% ของข้อบกพร่องทั้งหมด จัดอยู่ในรอยร้าว 5 ประเภท ตามแนวทางคู่มือการตรวจสอบรอยร้าว (วีระศิริ, 2554) ได้แก่ 1. รอยร้าวผนังแบบแตกลายงา จำนวน 92.23% 2. รอยร้าวผนังแนวดิ่ง จำนวน 6.32% 3. รอยร้าวบริเวณมุมขอบวงกบ จำนวน 1.06% 4. รอยร้าวผนังแบบแนวทแยง จำนวน 0.39% 5. รอยร้าวบริเวณหัวเสา (ไม่พบในกรณีนี้)

เมื่อนำชนิดของรอยร้าวที่ตรวจพบทั้ง 4 ประเภทมาตรวจสอบขนาดของรอยร้าวตามแนวคิดของ Burland et al. (1977). ได้กำหนดระดับความรุนแรงของรอยร้าวประเภทต่างๆ ดังแสดงใน Table 3 พบว่ารอยร้าวที่มีขนาดความกว้างน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร เป็นรอยร้าวที่ไม่ต้องแก้ไขและไม่ส่งผลต่อความเสียหายของโครงสร้าง มีจำนวน 95.89% รอยร้าวที่มีขนาดความกว้างน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร เป็นรอยร้าวที่สามารถสังเกตเห็นได้และแก้ไขด้วยการตกแต่งและยาปูน มีจำนวน 3.98% รอยร้าวที่มีขนาดความกว้าง 5–15 มิลลิเมตร เป็นรอยร้าวที่จำเป็นต้องแก้ไขโดยการรื้อผนังและก่อใหม่บางส่วน มีจำนวน 0.13%

Table 3 Building damage conditions are classified by wall crack width

Condition of Damage	Nature of the Damage	Crack Width (Prediction)	Percent of Cracks Found in Study Area
Not Damage	Hairline Cracks	< 0.1 mm.	78.34
Very Little	small crack Difficult to notice if not check well This crack does not need to be fixed, and can be concealed when painted	< 1 mm.	17.55
Little	There are visible cracks. and may need to be decorated by plastering of Windows and doors may get stuck.	< 5 mm.	3.98
Medium	There are cracks that need to be fixed by removing the cracks and adding new cement legs. Sometimes some walls may have to be demolished and rebuilt. jammed doors and windows and there may be a break in the pipe that is attached or embedded in the wall. Outside air can blow through the cracks.	5-15 mm. or there are multiple cracks wider than 3 mm.	0.13
serious	There were many large cracks that had to be fixed by demolishing some of the walls and rebuilding them. Especially the part above the door and window. Door frames and windows are distorted. A sloping floor, a sloping wall can be observed, depending on the number of cracks, not going vertically, cracked pipes and beams may lose their bearing capacity.	15-20 mm. and depending on the number of cracks	-
very dangerous	There are cracks that need to be fixed urgently. It may have to be completely or partially rebuilt due to loss of bearing capacity and tilted walls that must be supported. The windows are broken and the structure is not safe and secure.	25 mm. and depending on the number of cracks	-

2. สาเหตุของข้อบกพร่องสำคัญ

สาเหตุข้อบกพร่องของงานฉาบปูนผนัง (W1) เนื่องจากการเก็บงานปูน (W1.1) และความราบเรียบของผนัง (W1.2) นำมาวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิก้างปลา ดังแสดงใน Fig. 5 แบ่งสาเหตุออกเป็น 5 สาเหตุ คือ 1. แรงงานหรือคน ได้แก่

ขาดคนงานที่มีฝีมือ คนงานไม่เพียงพอ และคนงานทิ้งงานกลางคัน 2. วัสดุ ได้แก่ วัสดุไม่ตรงตามข้อกำหนด วัสดุขาดตลาด และการขึ้นราคาของวัสดุ 3. เครื่องจักร ได้แก่ ขาดเครื่องจักรที่มีคุณภาพ 4. กระบวนการ ได้แก่ ขั้นตอนการตรวจสอบไม่มีความรัดกุม การควบคุมงานโดยผู้ไม่มีประสบการณ์ และขาดการจัดการเรื่องงบประมาณที่มีประสิทธิภาพ 5. สภาพแวดล้อม ได้แก่ สภาพอากาศมีผลต่องานฉาบปูน

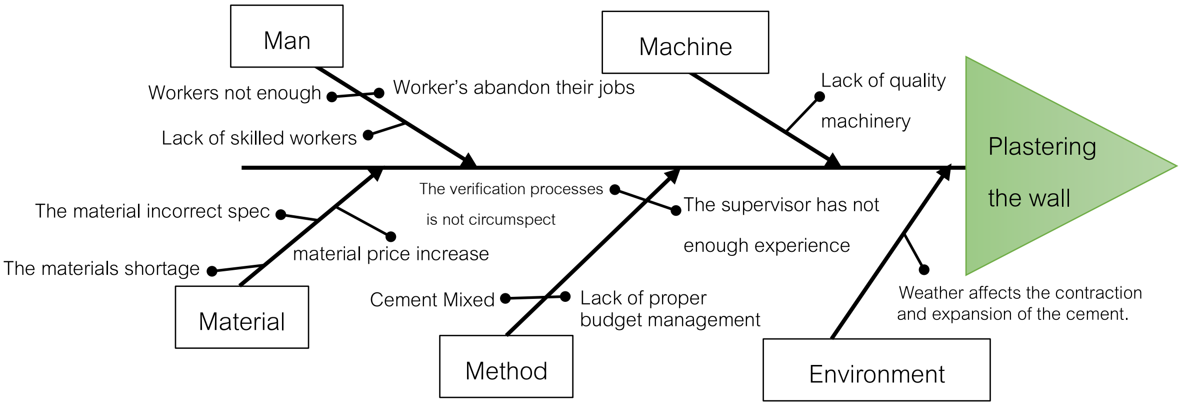


Fig. 5 Fishbone diagram shows the cause of the problem of plastering the wall

จากการสัมภาษณ์และการระดมความคิดผ่านแผนภูมิก้างปลา พบว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากพฤติกรรมของโครงสร้างเสียหาย แต่สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องมากที่สุดคือ ขั้นตอนการตรวจสอบไม่มีความรัดกุม รองลงมาคือ การขาดคนงานที่มีฝีมือ ทำให้เกิดข้อบกพร่องของงานและเกิดความล่าช้าต่อการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียม ดังนั้นจึงควรดำเนินการแก้ไขในขั้นตอนทั้งสองเพื่อให้ลดความล่าช้าดังกล่าว

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการตรวจรับห้องของคอนโดมิเนียม โซนธนบุรี-คลองสาน-บางกอกน้อย-บางกอกใหญ่-บางพลัด โซนห้วยขวาง-จตุจักร-ดินแดง และโซนพระโขนง-บางนา-สวนหลวง-ประเวศ ทั้งหมด 377 หน่วย จากการศึกษาพบข้อบกพร่องจำนวน 37,398 รายการ โดยมีข้อบกพร่องรวมสูงสุด 7 รายการจากข้อบกพร่องทั้งหมด 59 รายการ ได้แก่ หมวดผนัง(W) คือ การฉาบปูนผนัง (W1) ผนังไม่ได้ดิ่ง (W2) การเก็บงานทาสี (W5) การรั่วซึม (W3) หมวดพื้น (F) คือ ความเรียบของพื้น (F2) และหมวดประตู (D) คือ ความเรียบร้อยในการติดตั้ง (D1) และหากลดข้อบกพร่อง 7 รายการนี้ได้จะสามารถลดผลกระทบได้ 81.69 % โดยหมวดผนัง (W) เป็นงานที่มีรายการแก้ไขงานมากที่สุดถึง 59.98% โดยมีสาเหตุมาจาก ขั้นตอนการตรวจสอบไม่มีความรัดกุม และรองลงมาคือ การขาดคนงานที่มีฝีมือ และจากการวิเคราะห์รอยร้าวพบว่าส่วนใหญ่เป็นรอยร้าวผนังแบบแตกลายงา มีขนาดความกว้างน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร เป็นรอยร้าวที่ไม่ต้องแก้ไขและไม่ส่งผลต่อความเสียหายของโครงสร้าง

ข้อเสนอแนะ

สำหรับสาเหตุที่ทำให้ข้อบกพร่องหมวดผนังที่เกิดขึ้นบ่อยเพราะไม่มีการวางแผนการทำงาน และการเตรียมการก่อนเริ่มงานรวมถึงขั้นตอนการทำงานและวิธีการตรวจสอบ หากมีการควบคุมงานและตรวจสอบเป็นระยะ อาจจะสามารถ

ลดระยะเวลาการส่งมอบห้องชุดคอนโดมิเนียมลง เนื่องจากรายการข้อบกพร่องเกิดขึ้นเล็กน้อย สำหรับรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่มีขนาดมากกว่า 5 มิลลิเมตร ต้องมีการติดตามขนาดของรอยร้าวอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปวิเคราะห์หาสาเหตุที่เกี่ยวกับโครงสร้างต่อไป

เอกสารอ้างอิง

พิจาริน เอ่งฉ้วน, 2563. กรณีศึกษาต้นทุนคุณภาพในงานสถาปัตยกรรมในโครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กิตติพงษ์ พรมพิมพ์, 2561. การแก้ไขงานสถาปัตยกรรมระหว่างส่งมอบ บ้านพักอาศัยระบบสำเร็จรูป กรณีศึกษาโครงการโมดิวิลล่า บางนา จังหวัดสมุทรปราการ. วิชาวิศวกรรมศาสตรมาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ดนัย แก้วเจริญ, 2559. กรณีศึกษาผลกระทบจากการแก้ไขงาน สถาปัตยกรรมระหว่างส่งมอบบ้านพักอาศัย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ธเนศ วีระศิริ. 2554. คู่มือการตรวจสอบรอยร้าว สาเหตุและการแก้ไข, พิมพ์ครั้งที่ 6. จัดพิมพ์โดย วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ

วิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์, 2555. ทำไมต้องใช้พาเรโต้. สืบค้นจาก https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/qm177_p23-25.pdf

Coccia, M. 2017. The Fishbone diagram to inentify, systematize and analyze the sources of general-purpose technologies, Journal of Social and Administrative Sciences. Volume 4, No. 4

Burland, J.B., Broms, B.B., DeMello, V.F.B. 1977. Behavior of foundations and structures: State of the art report. In: Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, pp. 495–546.

Yamane, Taro.1973. Statistics, An Introductory Analysis, 2nd Ed., New York: Harper and Row.

Building a prototype automatic vending machine, then finding satisfaction and ideas for improvement

Pakvalunh Panitpichetvong[a,*], Borvonsak Markpoon[b], Phongpitak Suksantilap[a], Kitti Chomchay[a], Prathan Satidvengtong[a], Penpan Laksamiwanit[a]

[a]Program in Information Technology, Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi university, Bangkok 10170, Thailand

[b]Program in Multimedia Technology and Animation, Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi university, Bangkok 10170, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pakvalunh.pan@bkkthon.ac.th

Abstract

Common issues that many individuals ignored Before this study was conducted. The objectives of this research were 1) to build a prototype for an automated vending machine using an Arduino board. 2) To determine whether the samples were satisfied with the automatic vending machine prototype. 3) To gather ideas to enhance the automatic vending machine prototype further. The research sample was selected at random. This research's statistics were used for analysis by percentage, t-test, and Anova.

According to the results, the servo motor can always roll a product into a product pickup when a user inserts a coin into a coin validator. Samples had a high degree of satisfaction. The department determined that the satisfaction levels for structure and usability were different at the level of 0.05, significant from one another utilising the satisfaction findings from a t-test. Usability varied, with the first year being the most satisfied, according to Anova satisfaction statistics broken down by academic year.

Keywords: prototype automatic vending, vending, vending machine

Introduction

Currently, customer behaviour focuses on convenience, saving money and time. Consumers are willing to buy a product or service if it makes it more convenient. The changes in consumer behaviour affect the new type of businesses that meet the needs of consumers more and more continuously, such as ready-to-eat products, freight forwarding businesses, convenience stores, online selling, and marketing products through automatic machines, etc.

An automatic vending machine sells through the machine that doesn't have a salesperson or the front store. The seller must constantly replenish the product. For the part of buyer, they must insert a coin to receive the product. Machine operation may be broken or stolen if the machine malfunctions. The idea of developing the machine started from the ancient Greek invention of the machine that dispensed holy water to those who worshipped in the church. For Thailand, second-hand vending machines from Japan were imported and modified to support Thai electricity and currency. Vending machines are a way to sell products that are easily

accessible to consumers everywhere. Nowadays, many machines sell products such as drinking water dispensers, ice dispensers, music boxes, gas dispensers, coin-operated washing machines, etc.

Vending machines are helpful to both shoppers and business owners, so they have developed a wide range of commercial vending machines. Because the cafeteria is located on the ground floor of this school building, which also houses classrooms. Therefore, students often use the restrooms in the building, and tissues need to be provided there. Thus, the researcher saw the benefits of a vending machine and then developed an automatic vending machine prototype that could sell dry tissues and wet tissues. This facilitates the users who use the restroom and assess the satisfaction of the users, along with taking suggestions to improve the automatic vending machine prototype the next time.

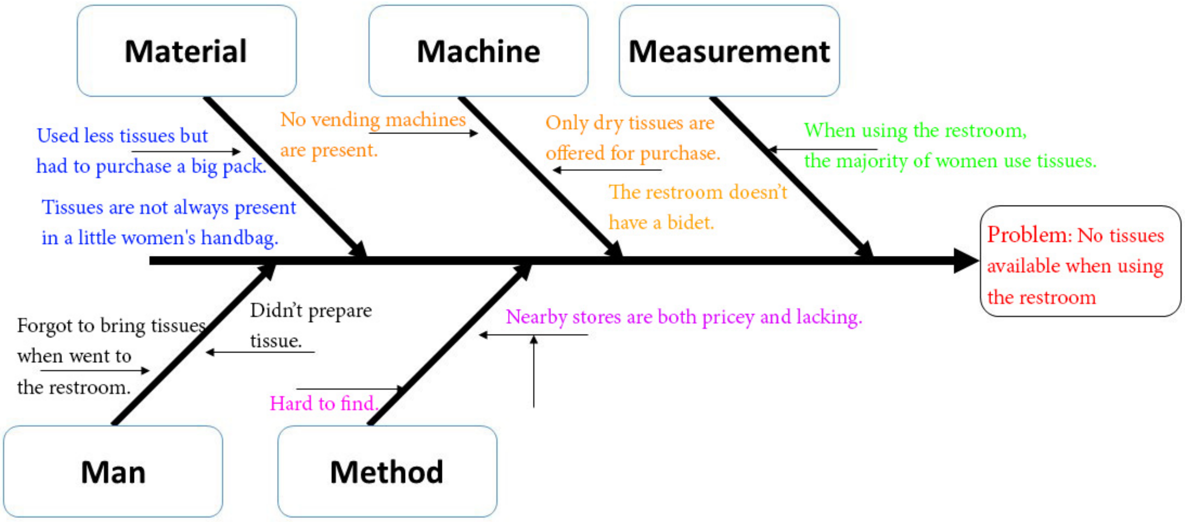


Fig. 1 Fishbone Diagram shows tissue problem

The objectives of this research

1. Build a prototype for an automated vending machine by using an Arduino board to operate it.
2. To determine whether the samples were satisfied with the automatic vending machine prototype.
3. To gather ideas to enhance the automatic vending machine prototype further.

Hypothesis

H_0 means the sample had no difference in satisfaction with the automatic vending machine prototype at the significance level of 0.05.

H_1 means the sample had different satisfaction with the automatic vending machine prototype at the significance level of 0.05.

Literature Review

The researcher reviewed related literature and research as follows.

The meaning of the automatic vending machine

It sells goods consumers have not planned to buy before (Kotler, 1997), such as candy, coffee, soft drinks, stockings, condoms, etc. Most automatic vending machines are popular at gas stations, hotels, large retail stores, and factories, where the devices can provide 24-hour service. Japan has the most significant number of automatic vending machines. Based on the population average and testing customer purchases and expenses via DoCoMo mobile phone.

McCarthy and Perreault's automatic definition of vending machine is a retail sale without a salesperson to serve. The products on sale are goods that consumers buy daily, but only a few items are small and standard. (McCarthy and Perreault. 1984)

Quality function deployment

It is a design method that involves determining the client's needs, assessing the product's design and operational procedures to fulfil those demands, and collecting feedback from the consumer on the product. Which must collaborate to fulfil these demands and provide goods or services to optimise client satisfaction. (Wangjaroen, 2004)

American Production and Inventory Control Society (APICS, 2011) said that it is a design method that involves determining the needs of the client, assessing the product's design and operational procedures to fulfil those demands, and collecting feedback from the consumer on the product, which must collaborate to fulfil these demands and provide goods or services to optimise client satisfaction.

ACSI model (The American Customer Satisfaction Index Model)

ACSI was developed in 1994 by Clase Fornell to measure the quality of goods and services based on customers' experiences who have purchased goods and services. ACSI consists of 6 components, as shown in the figure: Customer Expectations towards goods and services before using services, Overall Perceived Quality is a perception of consumers' opinion. The next is Perceived Value in the eyes of consumers. Which is an element that is the initial variable and another aspect that results from customer satisfaction, including Customer Complaints and Customer Loyalty, as shown in fig. 2 (Kiriya, 2015)

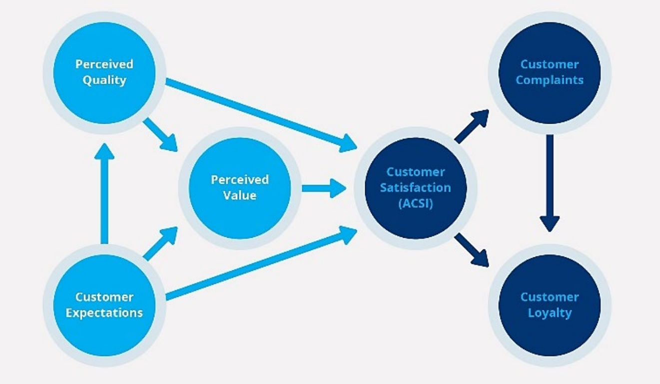


Fig. 2 The ACSI Model (Fornell, 1994).

Methodology

1. According to the observed issues from using the restroom in daily life, up to this study emerged as a substitute for those who use university restrooms. The researcher used the PDCA Model to define the problem in this model, shown in Table 1.

Table 1 PDCA model of tissue problem

Problem	Plan	Do	Check	Action
Need dry tissue	Construct a machine that offers both dry tissues for sale	Create a machine, operating the program	The automatic vending machine is useable	Develop a machine that offers both dry and moist tissues

2. Design the prototype structure of the automatic vending machine, accessories, peripherals, and Arduino Uno R3 board. Then write a set of commands to control the Arduino board in C language through the Arduino IDE desktop IDE program and test its functionality until a prototype of a complete automatic dispensing machine is obtained. The automatic vending machine prototype has exterior dimensions are 25 cm wide, 50 cm long, and 50 cm high. When assembling the materials, writing the control program, and testing the complete functionality, put wet tissue paper and dry tissue ready for use. The external structure of the automatic vending machine prototype, as shown in Fig. 3.

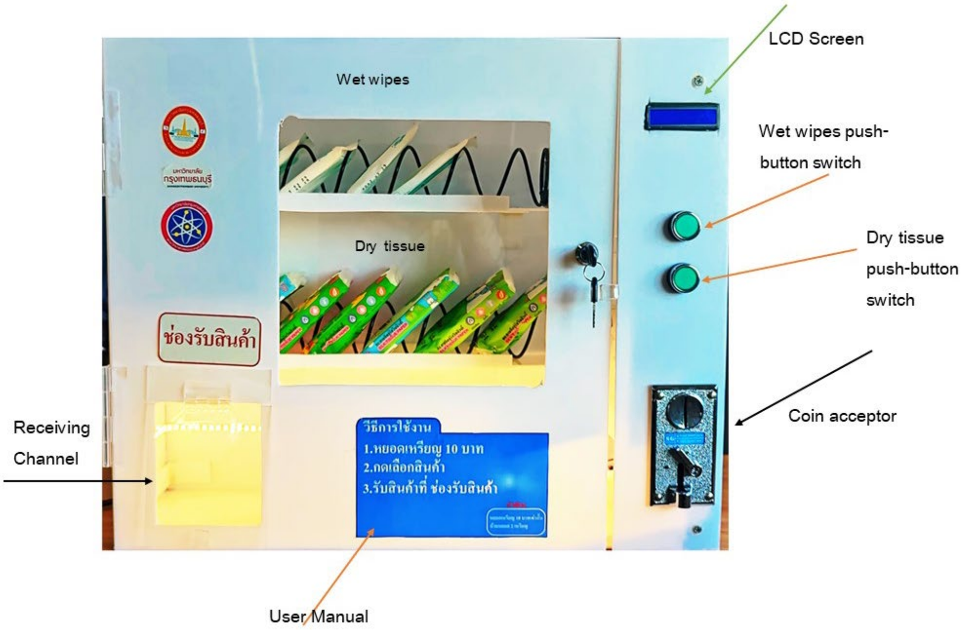


Fig. 3 The external structure of the automatic vending machine prototype

3. The population of this research was 135 undergraduate students learning in the major of Science and Technology at Bangkokthonburi University. The sample by specific random sampling from the theory of Krejcie and Morgan (1970) was about 100 people.

4. Research Instrument

The equipment of the automatic vending machine prototype is Board Arduino UNO R3, Coin Sensor, Servo Motor 360 C, LCD I2C 7×3, Push Button, Buzzer 5V, Resistor 10 k, etc. The satisfaction questionnaire for the automatic vending machine prototype was divided into two parts as follows:

Part 1 Basic information of the respondents, gender, year level and field of study.

Part 2 Satisfaction evaluation form for the automatic vending machine prototype is divided into the structure, usability, and suggestions. The questionnaire was a 5-level rating scale based on Likert's theory (1967).

5. Data Collection

The researcher prepared a questionnaire using a Google Form, generated a QR Code attached to the side of the machine, and had the students scan it to answer the satisfaction questionnaire.

6. Data Analysis

The statistic used in this research consists of percentage, t-test, and One Way Anova.

Results

1. The researcher tested the release of wet or dry tissues by inserting 10-baht coins ten times. Every time a coin is inserted, the servo motor rotates to exactly bring wet tissues or dry tissues down to the product receiving area.

2. General information of the sample is female 74.00% and male 26.00%, most of the students were in the first year 35.00%, the third year 26.00%, the second year 20.00% and the fourth year 19.00% respectively.

3. The researcher brought a satisfaction questionnaire to try with 30 students using Cronbach's alpha method to find the questionnaire's confidence value and correct the low-scoring questions before applying it to the sample.

4. Evaluation of the satisfaction of the automatic vending machine prototype. Divided into three statistical assessments: 1) Satisfaction between IT and non-IT students using Independent-Sample t-test, and 2) One Way Anova satisfaction finding between years according to Table 2–3, respectively.

Table 2's findings revealed that, at the .05 level of significance, there were differences between IT and Non-IT students' satisfaction with the structure and use. Thus, non-IT students are more interested in and valuable than IT students.

Table 2 The comparison of satisfaction between the field of study with the independent-sample t-test

Part of structure		
Field of study	t	*p*
IT & Non-IT	0.000	0.000*
Part of usability		
Field of study	t	*p*
IT & Non-IT	0.000	0.000*
Part of suggestions		
Field of study	t	*p*
IT & Non-IT	0.027	0.075

$p < .05$, two-tailed

Table 3 The comparison of satisfaction between the year with the One Way Anova

	F	Sig.
Part of the structure	2.403	0.072
Part of usability	21.757	0.000*
Part of the suggestions	1.278	0.286

$p < .05$, two-tailed

Students' satisfaction with usability varied by year, according to Table 3. Overall, first-year students were more satisfied with the structure than students from the second, third, and fourth years.

Discussion

In testing the release of goods from an automatic vending machine prototype by inserting 10-baht coins ten times, the servo motor was able to successfully rotate to bring wet or dry tissues down to the product receiving area every time. In line with Netiwut Buri and Chuchart Pharanat (2018), who developed a vending machine to supply electricity for mobile phones, found that the test of 1,2,5 and 10 baht coins ten times was usually used every time. In terms of user satisfaction, it was found that the score was good. Comparisons between fields of the study showed that IT subjects and non-IT subjects had other structural and usability satisfactions and the first year had the most satisfaction in terms of useability.

Conclusion

The structure and usefulness of the vending machine prototype were found to differ between IT and non-IT students in three significant ways. Because IT students may view an image of the equipment in operation. Nonetheless, people who do not major in IT won't understand machine construction—a different kind of

satisfaction. The satisfaction survey conducted throughout the year showed the first-year students' need for familiarity with the university environment and the condition of the restrooms. They are causing tissue not to be prepared in advance when a vending machine is present. As a result, first-year students are happier than second-year students who are more accustomed to the restroom setting. According to the findings, Year 1 had the highest level of satisfaction, followed by Years 2, 3, and 4, in that order.

Recommendation

The next operated vending machine prototype should include the following features: It should take coins or banknotes, have a money exchange mechanism, contain more products, and generate an alert when the products are empty Table 4's PDCA model illustrates this.

Table 4 PDCA model from the suggestions

Problems	Plan	Do	Check	Action	% of suggestion
Additional coin or bank options	Develop the automatic vending machine	Change equipment and rewrite the program	Verify that orders are followed	To the next phase	95%
Add additional products, like sanitary pads	Add more product slot	Develop the machine	It can add more product	To the next phase	92%
Alert when the products are empty	Set up the alert system	Rewrite the program to connect with a mobile phone	It can alert when the products are empty	To the next phase	86.8%

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

American Production and Inventory Control Society (APICS). 2011. Operation management body of knowledge framework. APICS The Association for Operations Management. The USA.

Fornell, C., Johnson, M.D., Anderson, E.W., Cha, J., Bryant, B.E. 1996. The American customer satisfaction index: Nature, purpose, and findings. J. Mark. 60: 7–18.

Kotler, P. 1997. Marketing Management (9th ed). New Jersey: Prentice–Hall.

Krejcie, R.V., Morgan, D.W. 1970. Determining sample size for research activities. Educ. Psychol. Meas. 30: 607–610.

McCarthy, J.E., Perreault, Jr., William, D. 1984. Basic marketing (8th ed). Illinois: The Irwin.

Kruathongkhiao, K. 2015. Customer satisfaction of budget hotels in Thailand, an ACSI and H-CSI approach. M.Sc. thesis, Faculty of commerce and accountancy, Thammasart University, Pathum Thani, Thailand. [in Thai]

Buri, N., Pharanat, C. 2018. To develop a vending machine that supplies electricity for mobile phones. (Research Report). Rajabhat Maha Sarakham.

Wangjaroen, W. 2004. Quality function deployment that interesting technique for food product development. Food 34: 21–28.

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของโรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟิน

A feasibility study of investment on solar roof top for normal paraffin plant

พงษ์มานัส ลาญดล[a,*], **สิรางค์ กลั่นคำสอน**[b]

Pongmans Landol[a,*], Sirang Klankamsorn[b]

[a]สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

[b]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

[a]Program of Engineering and Technology Management, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus

[b]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus

*Corresponding author. E-mail address: Pongmanas.l@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาของโรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟิน การศึกษาประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) การพยากรณ์ปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้า 2) การออกแบบเทคนิคทางวิศวกรรม และ 3) การวิเคราะห์ทางการเงินและการวิเคราะห์ความไวจากการลงทุน ผลการศึกษาพบว่า 1) ความต้องการใช้ไฟฟ้าของโรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟินประมาณ 238,520 kWh ต่อเดือน 2) การออกแบบทางวิศวกรรมควรเลือกระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อเข้ากับระบบจำหน่าย มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโน คลิสตัลไลน์และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบ On grid มีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์รวม 331kWh และ 3) ผลการศึกษาทางการเงินพบว่ามีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 8,559,495 บาท อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 16.56 และระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.8 ปี ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการศึกษามีความเป็นไปได้และคุ้มค่าในการลงทุน

คำสำคัญ: การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ, เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา, โรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟิน

Abstract

The purpose of this research is to study the feasibility of investing in power generation from solar cells of a normal paraffin plant. The study consisted of 3 parts: 1) Electricity demand forecasting, 2) Engineering technique design and 3) Financial analysis and investment sensitivity analysis. The study is found that 1) The electricity demand of the plant is approximately 238,520kWh per month. 2) The engineering design should select a PV power generation system connected to the supply system. There are monocrystalline solar panels and on grid inverters with a total installed capacity of 331kWh and 3) The results of the financial study showed that the net present value is 8,559,495 baht. The internal rate of return is 16.56 per cent and the payback period is 5.8 years. Therefore, it can be concluded that the study is feasible and worth the investment.

Keywords: Normal paraffin plant, Project feasibility study, Solar roof top

คำนำ

โรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟิน (Normal Paraffin) และสารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material) ที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้ทำการผลิต นอร์มอลพาราฟินและสารเปลี่ยนสถานะ รวมทั้งผลิตภัณฑ์พลอยได้ คือ กรีนโซลเวนท์ (Green Solvent) และเฮฟวีพาราฟิน (Heavy Paraffin) จากน้ำมันปาล์ม กำลังการผลิตรวมสูงสุด 130 ตัน/วัน มีกระบวนการผลิตเริ่มจากการป้อนน้ำมันปาล์มไปผสมกับสารตัวกลางและแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นปั้มเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะส่งเข้าสู่ถังแยกวัฏภาคเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแหลวและแก๊สออกจากกัน ของเหลวที่ได้คือผลิตภัณฑ์นอร์มอลพาราฟิน และถูกส่งเข้าหอกลั่นแยก จะได้ผลิตภัณฑ์สารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 เกรด และได้กรีนโซลเวนท์ กับเฮฟวีพาราฟินเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้

ในกระบวนการผลิตดังกล่าวมีการใช้พลังงานจากไฟฟ้าเป็นพลังงานหลัก มีเครื่องจักรที่ใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) เครื่องอัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Compressor) ปั้มลมสุญญากาศ (Vacuum Pump) เครื่องหล่อเย็น (Cooling Tower) หม้อต้มไอน้ำ (Boiler) หม้อต้มน้ำมันร้อน (Hot Oil) และปั้มในการส่งถ่ายวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ตามเส้นท่อ เครื่องจักรดังกล่าวมีปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม 2,103.4kW อย่างไรก็ตามเครื่องจักรและอุปกรณ์ดังกล่าวไม่ได้ทำงานพร้อมกันทั้งหมด หรือทำงาน 100% ตลอดเวลาแต่จะทำงานตามกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันไปตามขั้นตอนการผลิต มีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ขนาดแรงดัน 22 KV มีหม้อแปลง 2,000 KVA 1ชุด และ 500 KVA 1ชุด จากการศึกษาบันทึกการใช้ไฟฟ้า 2563 ถึง 2565 พบว่ามีปริมาณการใช้ไฟฟ้าของโรงงาน 6,854,600 kWh และมีค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 24,535,965.95 บาท

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าดังกล่าวทำให้เกิดต้นทุนในการผลิตสูง งานวิจัยฉบับนี้เห็นถึงความสำคัญของการใช้พลังงานทดแทนเป็นแนวทางการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สำคัญคือ การติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในโรงงาน เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า ทั้งนี้จะมีการติดตั้งโดยใช้พื้นที่หลังคาของอาคารในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและทำการจำหน่ายจ่ายไฟฟ้าไปยังโรงงาน

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ติดตั้งบนหลังคาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถูกในแสดงในงานวิจัยของ ธนาพล (2560) ซึ่งได้ทำการประเมินผลประโยชน์ทางพลังงาน สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์พบว่า โครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่ออายุการใช้งานระบบมากกว่า 17 ปี ปฏิพล (2564) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนเข้าร่วมโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับภาคประชาชน พบว่าประเทศไทยสามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บน หลังคาได้ทุกพื้นที่ของประเทศ มีระยะเวลาในการรับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 6 ชั่วโมงต่อวัน เลือกใช้ระบบที่เชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้า โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคลิสตัลไลน์ อรพรรณ (2555) การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ของบริษัท เอ ผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านการเงินพบว่า โครงการนี้คุ้มค่าแก่การลงทุน โดยอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ ร้อยละ 15.27 จิราภรณ์ (2559) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนเครื่องสูบน้ำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ของไร่ส้มโสภณผลการศึกษาด้านการเงินภายใต้อายุโครงการ 15 ปี พบว่าโครงการมีอัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 32.82 อัตราผลตอบแทนความสามารถในการทำกำไรเท่ากับ 1.92 เท่า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงานของโรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟิน ด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า เทคนิคทางวิศวกรรม และการวิเคราะห์ทางการเงินและทดสอบค่าความแปรเปลี่ยนของโครงการ

งานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้ 1) พยากรณ์การใช้ไฟฟ้าในอนาคตของโรงงาน 2) ศึกษารูปแบบและทางเลือกด้านเทคนิคของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 3) วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านการเงินของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงาน 4) ทำการศึกษาโดยการกำหนดข้อสมมติฐานทางการเงินและนำมาคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดทางการเงินและทำการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน และ 5) ทดสอบค่าความแปรเปลี่ยนของโครงการ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. การพยากรณ์ทางสถิติ (กรินทร์, 2561)

1.1 วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \tag{1}$$

1.2 วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Method)

$$MA(k)_t = \frac{1}{k}\sum_{i=t-k+1}^{n} y_i \tag{2}$$

1.3 วิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โปแนนเชียลครั้งเดียว (Single Exponential Smoothing Method)

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1-\alpha)\hat{Y}_t \tag{3}$$

2. ความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์

2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{t=0}^{n}(Y_t - F_t)^2}{n} \tag{4}$$

2.2 ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error; MAE หรือ Mean Absolute Deviation: MAD)

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^{n}\left|Y_1 - F_t\right|}{n} \tag{5}$$

2.3 ค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE)

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Y_t - F_1}{Y_t}\right|}{n} \times 100\% \tag{6}$$

3. ทฤษฎีเกี่ยวกับการเงิน (เริงรัก, 2544)

3.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (Net Present Value: NPV)

$$NPV = \sum_{t=1}^{n}\frac{NB_t}{(1+WACC)^t} - \sum_{t=1}^{n}\frac{IC_t}{(1+WACC)^t} \tag{7}$$

กำหนดให้ NB_t = ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานปีที่ t   n = อายุของโครงการ (ปี)

IC_t = ต้นทุนการลงทุนในปีที่ t   t = ระยะเวลาโครงการ (0, 1, 2, …, n)

WACC = ต้นทุนเงินทุนถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

3.2 อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Interest Rate of Return: IRR)

$$NPV = \sum_{t=1}^{n}\frac{NB_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{n}\frac{IC_t}{(1+r)^t} = 0 \tag{8}$$

กำหนดให้ NB_t = ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานปีที่ t n = อายุของโครงการ (ปี)

IC_t = ต้นทุนการลงทุนในปีที่ t t = ระยะเวลาโครงการ (0, 1, 2, …, n)

WACC = ต้นทุนเงินทุนถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก r = อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR)

3.3 การกำหนดอัตราส่วนลด (Weighted Average Cost of Capital หรือ WACC)

$$WACC = (We \times Ke) + [Wd \times Kd \times (1 - Tax)] \quad (9)$$

กำหนดให้ We = สัดส่วนเงินลงทุนของผู้ประกอบการ Kd = ต้นทุนเงินทุนจากการกู้ยืม

Ke = ต้นทุนเงินทุนของผู้ประกอบการ Tax = อัตราภาษีเงินได้นิติบุคคล

Wd = สัดส่วนเงินลงทุนจากการกู้ยืม

3.4 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period หรือ PB) หาได้จากเงินลงทุนเริ่มโครงการหารด้วยกระแสเงินสดรับสุทธิในปีคืนทุนที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสะสม

3.5 ดัชนีความสามารถในการทำกำไร (Profitability Index: PI)

$$PI = \sum_{t=1}^{n} \frac{NB_t}{(1+WACC)^t} / \sum_{t=1}^{n} \frac{IC_t}{(1+WACC)^t} \quad (10)$$

กำหนดให้ NB_t = ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานปีที่ t n = อายุของโครงการ (ปี)

IC_t = ต้นทุนการลงทุนในปีที่ t t = ระยะเวลาโครงการ (0, 1, 2, …, n)

3.6 การทดสอบค่าความแปรเปลี่ยนของโครงการ (Switching Value Test: SVT)

3.6.1 ค่าความแปรเปลี่ยนด้านผลตอบแทน (Switching Value Test of Benefits)

$$SVT_B = (NPV / PVB) \times 100 \quad (11)$$

3.6.2 ค่าความแปรเปลี่ยนด้านต้นทุนในการดำเนินงาน (Switching Value Test of Operation Cost)

$$SVT_{OC} = (NPV / PVOC) \times 100 \quad (12)$$

3.6.3 ค่าความแปรเปลี่ยนด้านต้นทุน (Switching Value Test of Cost)

$$SVT_C = (NPV / PVC) \times 100 \quad (13)$$

3.6.4 ค่าความแปรเปลี่ยนด้านต้นทุนการลงทุน (Switching Value Test of Investment Cost)

$$SVT_{IC} = (NPV / PVIC) \times 100 \quad (14)$$

กำหนดให้ PVB = มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทน PVOC = มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนการดำเนินงาน

PVC = มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม PVIC = มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนในการลงทุน

4. วิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้านเทคนิค (Technical Feasibility) เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคต่างๆ โดยวิเคราะห์จากข้อมูลทางเทคนิคที่ได้มาและเลือกเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงการ การเลือกกระบวนการผลิตที่เหมาะสม การเลือกเครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ตรงกับลักษณะงาน ขนาดการผลิตและจังหวะการลงทุนที่ให้ผลตอบแทนสูงสุด และการเลือกทำเลที่ตั้งของโครงการที่เหมาะสมเพื่อนำไปสู่การประมาณการต้นทุนที่ถูกต้องและสมเหตุสมผล (ประสิทธิ์, 2542)

5. ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ 1) ระบบไม่เชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (Off Grid System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบปิดไม่มีพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่มีแบตเตอรี่สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 2) ระบบที่เชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (On Grid System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย 3) ระบบที่เชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ที่มีแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรอง

(Hybrid System) เป็นระบบที่ทำงานผสมผสานระหว่าง Off Grid และ On Grid (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563)

วิธีการวิจัย

1. ด้านการพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเป็นการนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากอดีตไปพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Minitab 3 วิธีการ คือ 1) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) 2) วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Method) 3) วิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โปแนนเชียลครั้งเดียว (Single Exponential Smoothing Method) วิธีนี้จะนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากอดีตไปหาค่า α ด้วย Excel Solver และนำค่า α ที่ได้ไปใส่ในโปรแกรม Minitab ทั้ง 3 วิธีทำการพยากรณ์ไปข้างหน้า 12 เดือน จากนั้นตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ว่าวิธีการใดมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และนำค่า Forecasting ที่ได้จากวิธีการนั้นไปใช้ในการออกแบบการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

2. ด้านเทคนิคและวิศวกรรม เมื่อทราบผลการพยากรณ์การใช้ไฟฟ้าในอนาคตแล้วดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละระบบ เมื่อได้ระบบการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับโรงงานแล้ว ทำการสำรวจพื้นที่ของอาคารที่จะติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าโดยคำนึงถึงน้ำหนักที่โครงสร้างรับได้ ความปลอดภัย และการบำรุงรักษาเป็นสำคัญ พื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีลักษณะหลังคาที่มีพื้นที่ราบ ไม่มีสิ่งกีดขวาง สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

3. ด้านการเงินเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ เครื่องมือทางการเงิน และการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนโครงการ (เริงรัก, 2544) ดังนี้ 1) การหาต้นทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (WACC) 2) มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (Net Present Value: NPV) 3) อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Interest Rate of Return: IRR) 4) ระยะเวลาคืนทุนปรับมูลค่าเงิน (Payback Period: PB) 5) ดัชนีความสามารถในการทำกำไร (Profitability Index: PI) โดยใช้หลักเกณฑ์การตัดสินใจดัง Table 2 และการทดสอบค่าความแปรเปลี่ยนของโครงการ (Switching Value Test: SVT)

Table 2 Decision criteria

หลักเกณฑ์การตัดสินใจ	การตัดสินใจ	หลักเกณฑ์การตัดสินใจ	การตัดสินใจ
NPV ≥ 0	ลงทุน	PI ≥ 0	ลงทุน
IRR ≥ WACC	ลงทุน	PB (i > 0)	ขึ้นอยู่กับดุลพินิจ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการพยากรณ์ด้วยโปรแกรม Minitab ดัง Fig. 1–3 พบว่าวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Method) มีความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ MSE น้อยที่ดีที่สุด 5,509,523,004 ดัง Table 3 และมีผลการพยากรณ์เท่ากับ 238,520 kWh ต่อเดือน หรือ 331 kW ต่อชั่วโมง ดัง Fig 2. ซึ่งจะนำค่าการพยากรณ์ที่ได้ไปออกแบบติดตั้งและประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

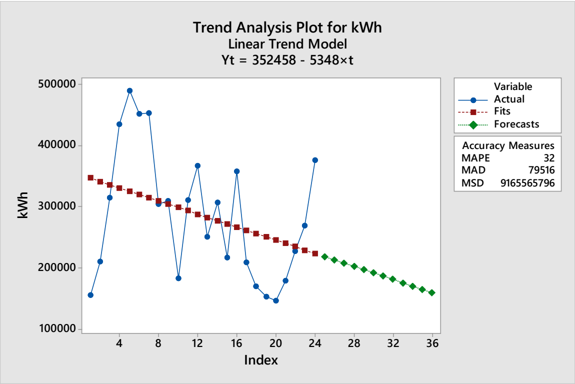


Fig. 1 Simple linear regression analysis

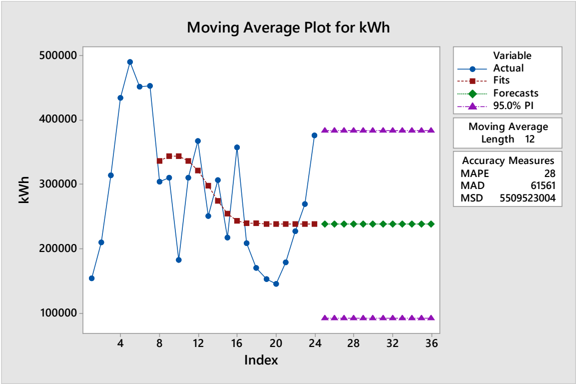


Fig. 2 Moving average method

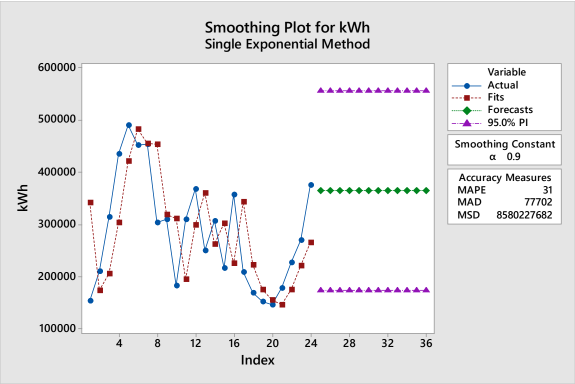


Fig. 3 Single exponential smoothing method

Table 3 Forecast error

Time Series	MSE	MAD	MAPE	Time Series	MSE	MAD	MAPE
Linear regression analysis	9.1E+09	79,516	32	Single exponential smoothing	8.5E+09	77,702	31
Simple moving average	5.5E+09	61,561	28				

2. ด้านเทคนิคและวิศวกรรม เพื่อให้ได้ระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุดกับโรงงาน ได้ทำการพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามทฤษฎีข้างต้นที่กล่าวมา ทั้ง 3 ระบบ ดัง Table 4

Table 4 Advantages and disadvantages

ระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Off Grid System	ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในบ้านได้โดยตรงและสำรองไฟฟ้าไว้ใช้ได้	ใช้เงินลงทุนซื้อแบตเตอรี่สูง
On Grid System	สามารถขายไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายได้ การบำรุงรักษาและติดตั้งง่าย ใช้เงินลงทุนต่ำ ระบบไฟฟ้ามีความเสถียรมากกว่าระบบอื่นเพราะมีระบบไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายเชื่อมต่ออยู่	ไม่สามารถสำรองไฟฟ้าไว้ใช้ในช่วงไม่มีแสงอาทิตย์ได้
Hybrid System	สำรองไฟฟ้าไว้ใช้ได้ สามารถทำงานได้ทั้งสองระบบ สามารถเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟได้ สามารถนำไฟฟ้าขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายได้	ใช้เงินลงทุนสูง การบำรุงรักษายุ่งยาก

จากการวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 ระบบนั้น สามารถสรุปได้ว่าระบบที่เชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (On Grid) มีความเหมาะสมกับโรงงานมากกว่าระบบอื่นๆ เนื่องจาก

สามารถนำไฟฟ้าขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายได้ การบำรุงรักษาง่าย ติดตั้งง่าย ใช้เงินลงทุนต่ำ ระบบไฟฟ้ามีความเสถียรมากกว่าระบบอื่นเนื่องจากมีระบบไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายเชื่อมต่ออยู่ ซึ่งในระบบนี้จะมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคลิสตัลไลน์ ที่มีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าที่สูง และมีความเหมาะสมในการติดตั้งบนหลังคาของโรงงาน มีอินเวอร์เตอร์เป็นแบบ On Grid Inverter 3เฟส เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรง เป็นกระแสสลับและทำการจำหน่ายไฟฟ้าไปยังโหลดในโรงงาน ดัง Fig.4

Table 5 Solar photovoltaic capacity

ชื่ออาคาร	พื้นที่ (ตรม.)	จำนวน (แผง)	กำลังการผลิต (kWh)	ชื่ออาคาร	พื้นที่ (ตรม.)	จำนวน (แผง)	กำลังการผลิต (kWh)
สำนักงาน	288	100	54	จอดรถ	321	100	54
คลังสินค้า	1080	414	223	รวม	1,689	614	331

พื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จากการสำรวจพื้นที่หลังคาโรงงานมีอาคารคลังสินค้า อาคารสำนักงาน และอาคารจอดรถ เป็นอาคารที่มีความเหมาะสมกับการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทั้ง 3 อาคาร รวมกันเท่ากับ 331kWh ตามการพยากรณ์ข้างต้น มีรายละเอียด ดัง Table 5 และจะใช้อาคารควบคุมการผลิตในการติดตั้งเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ตามแผนผังโรงงานดัง Fig. 5

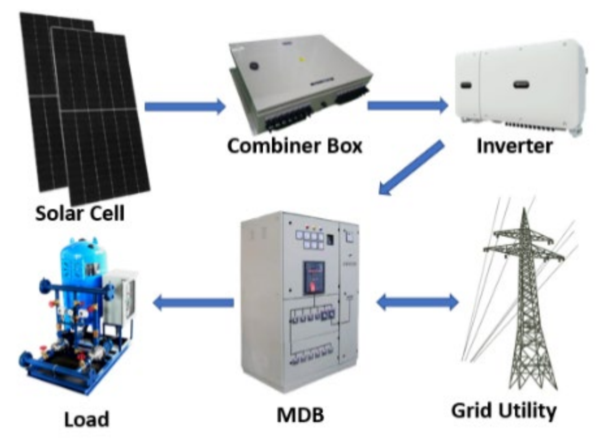


Fig. 4 Solar rooftop on grid system

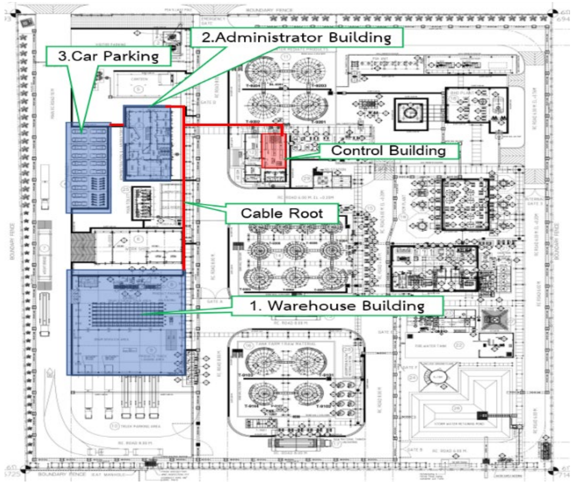


Fig. 5 Normal Paraffin plant layout

3. ผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านการเงินมีข้อสมมติในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ดังนี้ 1) การศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดระยะเวลาในการดำเนินโครงการ 20 ปี จากอายุการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ 2) เงินลงทุนของโครงการมาจากเงินทุนส่วนของเจ้าของ (We) ร้อยละ 30 เงินทุนจากการกู้ยืม (Wd) ร้อยละ 70 อัตราผลตอบแทนเงินทุนส่วนเจ้าของทุนร้อยละ 10 และภาษีเงินได้นิติบุคคลเท่ากับอัตราร้อยละ 20 ตามอัตราภาษีใหม่ที่ประกาศใช้ในปี พ.ศ.2556 3) อัตราดอกเบี้ยกู้ยืมหรือต้นทุนเงินทุนจากการกู้ยืม (Kd) มีค่าเท่ากับร้อยละ 10.97 โดยมาจากอัตราดอกเบี้ยสินเชื่อธุรกิจ SME ธนาคารกสิกรไทย อัตราดอกเบี้ย ปี พ. ศ. 2565 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 5.97 และมาจากค่าความเสี่ยงร้อยละ 5.00 (MLR+5) 4) รายได้ของโครงการ คือ ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากค่าไฟฟ้า จะคิดอัตราค่าไฟฟ้าตามประเภท กิจการขนาดใหญ่ แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์ ซึ่งคิดในอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU) ได้แก่ ช่วง Peak หน่วยละ 4.1839 บาท และนอกช่วง Off Peak หน่วยละ 2.6037 บาท ค่า Ft 0.9843 บาท (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2561) 5) อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ TOU Peak 243 วัน และ Off Peak 122 วัน 6) แผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า สามารถใช้งานได้ตลอด

อายุโครงการ เมื่อตัดค่าเสื่อมราคาตามเส้นตรงแล้ว จะมีมูลค่าเท่ากับศูนย์ในปีที่ครบอายุโครงการ 7) กำหนดให้รอบระยะเวลา 1 เดือน เท่ากับ 30 วัน และ 1 ปี เท่ากับ 365 วัน สำหรับการคำนวณต่างๆ 8) กำหนดเวลาการรับแสงอาทิตย์ 6 ชม. ต่อวัน

ทำการกำหนดต้นทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก WACC ดังสมการที่ (9)

= (0.3 x 0.1) + (0.7 x 0.1097 x (1-0.2))

= 0.914 หรือร้อยละ 9.14

การประมาณต้นทุน แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ 1) ต้นทุนในการลงทุนเท่ากับ 6,351,160 บาท ดัง Table 7 2) ต้นทุนในการดำเนินการเท่ากับ 984,000 บาทต่อปี ดัง Table 8 3) ต้นทุนในการบริหารเท่ากับ 984,000 บาทต่อปี ดัง Table 9 เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้มีขนาดกำลังการผลิตสูง 331 kWh และมีอุปกรณ์ที่ติดตั้งจำนวนมาก จึงต้องมีฝ่ายบริหารเพื่อดูแลด้านการจัดการ มีวิศวกร พนักงานฝ่ายผลิต และพนักงานซ่อมบำรุง ทำหน้าที่ดูแลการทำงาน ตรวจสอบ บำรุงรักษา และล้างแผงเซลล์ ต้นทุนทั้ง 3 ส่วน นำมาทำการประมาณผลตอบแทน ซึ่งใช้อัตราคิดลดจากการหาต้นทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก อัตราร้อยละ 9.14 เพื่อให้มูลค่าเงินแต่ละช่วงเวลาเป็นมูลค่าเงินปัจจุบัน โดยทำการวิเคราะห์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินใจลงทุนโครงการ

Table 6 Investment ratio

ที่มาเงินทุน	สัดส่วน	จำนวน (บาท)	ที่มาเงินทุน	สัดส่วน	จำนวน (บาท)
1. จากส่วนของเจ้าของ	30%	1,945,308	2. จากการกู้ยืม	70%	4,445,812
			รวม		6,351,160

Table 7 Investment cost

รายการ	หน่วยละ (บาท)	จำนวน	จำนวน (บาท)	รายการ	หน่วยละ (บาท)	จำนวน	จำนวน (บาท)
1.แผงเซลล์แสงอาทิตย์	5,940	614ชุด	3,647,160	5.ค่าขออนุญาตติดตั้ง	50,000	1หน่วย	50,000
2.ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า	200,000	1ชุด	200,000	6.ค่าการออกแบบ	80,000	1หน่วย	80,000
3.อินเวอร์เตอร์	129,000	6เครื่อง	774,000	7.ค่าบริหารงานติดตั้ง	100,000	1หน่วย	100,000
4.ค่าติดตั้งและอุปกรณ์	1,500,000	1หน่วย	1,500,000	รวม			6,351,160

Table 8 Operation cost

รายการ	หน่วยละ (บาท)	จำนวน (เดือน)	จำนวน (บาท/ปี)	รายการ	หน่วยละ (บาท)	จำนวน (เดือน)	จำนวน (บาท/ปี)
1.ค่าซ่อมบำรุงและล้างแผ่นเซลล์	10,000	12	120,000	5.พนักงานฝ่ายผลิต	16,000	12	192,000
2.ค่าสาธารณูปโภค	5,000	12	60,000	6.วิศวกร	30,000	12	360,000
3.ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	5,000	12	60,000	7.ช่างซ่อมบำรุง	16,000	12	192,000
4.พนักงานฝ่ายผลิต	16,000	12	192,000	รวม			984,000

Table 9 Management cost

รายการ	หน่วยละ (บาท)	จำนวน (เดือน)	จำนวนเงิน (บาท/ปี)	รายการ	หน่วยละ (บาท)	จำนวน (เดือน)	จำนวนเงิน (บาท/ปี)
1.ผู้จัดการทั่วไป	45,000	12	540,000	4.พนังงานการตลาด	16,000	12	192,000
2.พนักงานบัญชี	16,000	12	192,000	5.ค่าใช้จ่ายการตลาด	5,000	12	60,000
3.พนังงานการตลาด	16,000	12	192,000	รวม			984,000

Table 10 Yearly benefits

ปีที่	ค่าใช้จ่าย (บาท)	รายได้ (บาท)	ผลตอบแทน (บาท)	เงินคงเหลือสุทธิ (บาท)	ปีที่	ค่าใช้จ่าย (บาท)	รายได้ (บาท)	ผลตอบแทน (บาท)	เงินคงเหลือสุทธิ (บาท)
0			-6,351,160	-6,351,160	11	1,997,778	3,100,891	1,103,112	5,783,082
1	1,997,778	3,100,891	1,103,112	-5,248,047	12	1,997,778	3,100,891	1,103,112	6,886,195
2	1,997,778	3,100,891	1,103,112	-4,144,934	13	1,997,778	3,100,891	1,103,112	7,989,308
3	1,997,778	3,100,891	1,103,112	-3,041,821	14	1,997,778	3,100,891	1,103,112	9,092,421
4	1,997,778	3,100,891	1,103,112	-1,938,708	15	1,997,778	3,100,891	1,103,112	10,195,534
5	1,997,778	3,100,891	1,103,112	-835,595	16	1,997,778	3,100,891	1,103,112	11,298,647
6	1,997,778	3,100,891	1,103,112	267,517	17	1,997,778	3,100,891	1,103,112	12,401,760
7	1,997,778	3,100,891	1,103,112	1,370,630	18	1,997,778	3,100,891	1,103,112	13,504,873
8	1,997,778	3,100,891	1,103,112	2,473,743	19	1,997,778	3,100,891	1,103,112	14,607,986
9	1,997,778	3,100,891	1,103,112	3,576,856	20	1,997,778	3,100,891	1,103,112	15,711,099
10	1,997,778	3,100,891	1,103,112	4,679,969					

ผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านการเงิน ดังนี้ 1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิของผลตอบแทน 8,559,495 บาท 2) อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการร้อยละ 16.56 3) ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.8 ปี 4)ดัชนีความสามารถทำกำไร 2.35 เท่า มีเกณฑ์การตัดสินใจดัง Table 11 การทดสอบความสามารถในการรับความเปลี่ยนแปลง พบว่าโครงการสามารถรับความแปรเปลี่ยนขด้านผลตอบแทนลดลงได้ ร้อยละ 30.54 ด้านต้นทุนในการดำเนินงานเพิ่มขึ้นได้ ร้อยละ 96.24 ด้านต้นทุนในการลงทุนเพิ่มขึ้นได้ ร้อยละ 134.77 และด้านต้นทุนรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 47.4 ที่ทำให้โครงการยังคุ้มค่าในการลงทุน ดัง Table 12.

Table 11 Decision criteria

หลักเกณฑ์การตัดสินใจ	การตัดสินใจ	หลักเกณฑ์การตัดสินใจ	การตัดสินใจ
NPV 8,559,495 บาท ≥ 0	ลงทุน	PI 2.35 เท่า ≥ 1	ลงทุน
IRR 16.56% ≥ WACC (9.14%)	ลงทุน	PB 5.8 ปี (i > 0)	ขึ้นอยู่กับดุลพินิจ

Table 12 Switching Value Test

การทดสอบค่าความแปรเปลี่ยน	ผลการคำนวณ	การทดสอบค่าความแปรเปลี่ยน	ผลการคำนวณ
ผลตอบแทน (SVT_B)	30.54%	ต้นทุนในการลงทุน (SVT_{IC})	134.77%
ต้นทุนในการดำเนินการ (SVT_{OC})	96.24%	ต้นทุนรวม (SVT_C)	47.4%

สรุปผลการวิจัย

โรงงานผลิตนอร์มอลพาราฟิน มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากการพยากรณ์ 331 kW ต่อชั่วโมง มีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับโรงงานคือระบบเชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ชนิดโมโนคลิสตัลไลน์และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าชนิด On Grid Inverter 3 เฟส ใช้พื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารคลังสินค้า อาคารสำนักงานและอาคารจอดรถรวม 331kWh สามารถผลิตไฟฟ้าได้วันละ 6 ชม. มีต้นทุนในการลงทุน 6,351,160 บาท มีต้นทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ร้อยละ 9.14 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านการเงินมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 8,559,495 บาท อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการร้อยละ 16.56 ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.8 ปี ดัชนีความสามารถทำกำไร 2.35 เท่า จึงสรุปได้ว่าการศึกษามีความเป็นไปได้และคุ้มค่าในการลงทุน

เอกสารอ้างอิง

กรินทร์ กาญทนานนท์. 2561. การพยากรณ์ทางสถิติ. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2563. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ. ศ. 2561–2580.

จิราภรณ์ เหลี่ยมโสภณ. 2559. การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนเครื่องสูบน้ำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ของไร่ส้มโสภณ อำเภอภูเพียง จังหวัดน่าน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนาพล ตันติสัตยกุล, พีรพล รัศมีธรรมโชติ, เมฑาพร อุ่ยสกุล. 2560. การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงาน สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 25: 1083–1099

ปฏิพล ถาวร. 2564. การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนเข้าร่วมโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา สำหรับภาคประชาชน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประสิทธิ์ ตงยิ่งศิริ. 2542. การวางแผนและการวิเคราะห์โครงการ. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

เริงรัก จำปาเงิน. 2544. การจัดการการเงิน. กรุงเทพมหานคร: บริษัท บุ๊คเน็ท จำกัด.

อรพรรณ สุวรรณสกนธ์. 2555. การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ของบริษัท เอ จำกัด อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

การประยุกต์การวิเคราะห์ลำดับชั้นแบบคลุมเครือและเทคนิคการจัดอันดับความพึงพอใจที่คล้ายคลึงผลลัพธ์อุดมคติสำหรับการคัดเลือกเทคโนโลยีการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียมในการผลิตน้ำประปาสำหรับโรงงานผลิตน้ำสามเสน 4

Application of Fuzzy AHP and TOPSIS for technology selection of cryptosporidium disinfection in water supply manufacture at samsen water treatment plant 4

ปรินทร์ ศรีเมฆารัตน์, **พัชราภรณ์ ญาณภิรัต***, **ศันสนีย์ สุภาภา**

Parin Srimakarat, Patcharaporn Yanpirat*, Sansanee Supapa

สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

Graduate Program in Engineering Management, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkhen campus, Bangkok 10900

*Corresponding author. E-mail address: fengppy@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกเทคโนโลยีสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียมในการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำสามเสน 4 ซึ่งทางเลือกของกระบวนการฆ่าเชื้อคือ การจ่ายโอโซน การจ่ายคลอรีนไดออกไซด์ และการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต จากการสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญมีหลักเกณฑ์การประเมินทางเลือกประกอบด้วย 11 หลักเกณฑ์ และมีการกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์โดยการประยุกต์วิธีกระบวนการวิเคราะห์ลำดับชั้นแบบคลุมเครือ ขณะที่การประเมินทางเลือกประยุกต์เทคนิคสำหรับการจัดอันดับความพึงพอใจที่คล้ายคลึงผลลัพธ์อุดมคติ ผลการประเมินพบว่า กระบวนการฆ่าเชื้อโดยการจ่ายคลอรีนไดออกไซด์เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: กระบวนการวิเคราะห์ลำดับชั้นแบบคลุมเครือ, เทคนิคสำหรับการจัดอันดับความพึงพอใจที่คล้ายคลึงผลลัพธ์อุดมคติ, น้ำประปา

Abstract

The objective of this research is to select a technology for Cryptosporidium disinfection in water supply manufacture at Samsen Water Treatment Plant 4. There are three anticipated process alternatives: ozone disinfection, chlorine dioxide disinfection and ultraviolet radiation disinfection. Based on the brainstorming by a selected expert group, there were 11 criteria to consider. To determine an importance weight value of each criterion, the method of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) was employed, combined with the technique of order preference by similarity to idea solution (TOPSIS) in the selection of an alternative. The results reveal that the process of chlorine dioxide disinfection was the most appropriate alternative.

Keywords: Fuzzy AHP, TOPSIS, Water supply

คำนำ

น้ำประปาเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญต่อการดำรงชีวิต สำหรับอุปโภคและบริโภค และการพัฒนาในด้านต่างๆ ของประเทศไทย เช่น ด้านสังคม ด้านเศรษฐกิจ และระดับคุณภาพชีวิตขั้นต่ำของประชาชน เป็นต้น การประปานครหลวง (กปน.) คือหน่วยงานรัฐวิสาหกิจด้านสาธารณูปโภคที่ผลิตน้ำประปาให้แก่ประชาชนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล เป้าหมายขององค์กรคือ การให้บริการประชาชนให้มีน้ำประปาสำหรับอุปโภคและบริโภคที่ถูกสุขอนามัยและได้มาตรฐานสากล กปน. มีโรงงานผลิตน้ำประปาทั้งหมด 4 โรงงาน ประกอบด้วยโรงงานผลิตน้ำบางเขน มหาสวัสดิ์ สามเสน และธนบุรี โรงงานผลิตน้ำสามเสนสูบจ่ายน้ำประปาสำหรับพื้นที่ประมาณ 200–320 ตารางกิโลเมตร บริการโรงพยาบาลขนาดใหญ่ 4 แห่ง และพระราชวัง 4 แห่ง และแหล่งชุมชนที่มีประชากรประมาณ 2.5 ล้านคน ซึ่งมีอัตราการใช้น้ำต่อวันเฉลี่ยขั้นต่ำประมาณ 4.15 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน กระบวนการผลิตน้ำประปามีขั้นตอนสำคัญ คือ การรับน้ำดิบ การจ่ายสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ กระบวนการตกตะกอน กระบวนการกรอง กระบวนการกักเก็บน้ำประปา และการสูบจ่ายน้ำประปาไปยังผู้บริโภค แสดงดัง Fig. 1

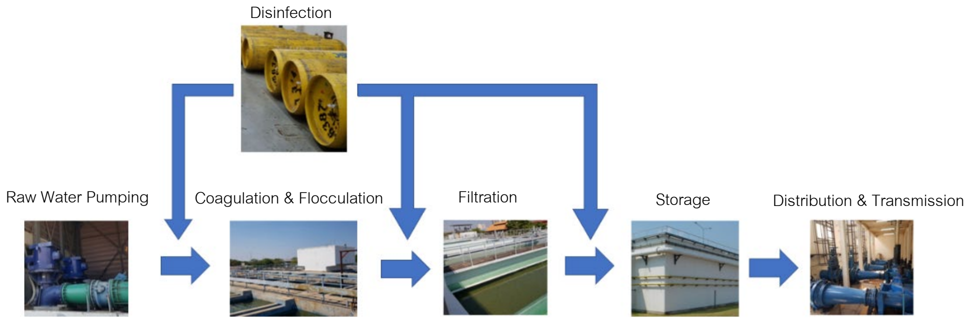


Fig. 1 Samsen water treatment plant 4: Water treatment Process

คุณภาพน้ำประปามีความสำคัญต่อด้านสุขอนามัยต่อผู้อุปโภคบริโภคซึ่ง กปน. มีการดำเนินการให้คุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานสากลโดยการใช้คลอรีน (Chlorine: Cl_2) ในกระบวนการฆ่าเชื้อก่อโรคในขั้นตอนของการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นแหล่งน้ำดิบเพียงแหล่งเดียว จากการตรวจพบเชื้อโปรโตซัวคริปโตสปอริเดียมในแม่น้ำเจ้าพระยา (Koompapong and Sukthana, 2012) ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำสามเสน เชื้อโปรโตซัวดังกล่าวเป็นเชื้อก่อโรคที่อาศัยอยู่ในระบบขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์สี่เท้า แพร่กระจายผ่านทางอุจาระ กรณีที่ผู้บริโภคน้ำจากแหล่งน้ำได้รับเชื้ออาจก่อให้เกิดอาการท้องร่วงอย่างรุนแรง และในกรณีผู้ป่วยที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่องอาจป่วยเรื้อรังหรือเสียชีวิตได้ Bogan (2018) และ Jameson et al. (2008) ศึกษาโปรโตซัวคริปโตสปอริเดียมพบว่า ทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพต่อผู้ใช้น้ำอย่างรุนแรงและแพร่ระบาดเป็นวงกว้างได้เมื่อเข้าสู่ระบบประปา การฆ่าเชื้อสามารถทำได้ด้วยการใช้แสงอาทิตย์อย่างน้อย 8 ชั่วโมง การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต การจ่ายโอโซน (Jameson et al., 2008; Soliman et. al, 2018) หรือการฆ่าเชื้อด้วยสารคลอรีนซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบของความเข้มข้นของคลอรีน เวลาสำหรับฆ่าเชื้อโรค ค่า pH อุณหภูมิ ความขุ่น และสารประกอบอินทรีย์ (Shaofeng et al., 2011) แต่ประสิทธิผลการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียมจะลดลงเมื่อมีสารประกอบอินทรีย์ในกระบวนการตกตะกอน หรือค่าความขุ่นมากกว่า 0.2 NTU (Xagoraraki et al., 2004) และจะฆ่าเชื้อโรคได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกรดและอุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียส จากระบบบำบัดน้ำประปาของ กปน. ซึ่งใช้การกรองและฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน แต่โปรโตซัวคริปโตสปอริเดียมไม่สามารถฆ่าได้จากคลอรีน เนื่องจากเชื้อสามารถสร้างถุงหุ้มเซลล์ (Oocyst) ที่ป้องกันคลอรีนได้ นอกจากนี้ต้องใช้การกรอง

น้ำประปาให้มีความขุ่นระหว่าง 0.1–0.2 NTU จึงมั่นใจได้ว่า ปราศจากการปนเปื้อนของคริปโตสปอริเดียม แต่ปัจจุบันเกณฑ์ควบคุมคุณภาพน้ำประปาของ กปน. มีค่าความขุ่นไม่เกิน 1 NTU เท่านั้น จึงเป็นความเสี่ยงในระบบประปาที่อาจทำให้เกิดการแพร่ระบาดในวงกว้าง นอกจากนี้ WHO ได้กำหนดแผนน้ำประปาปลอดภัยว่า น้ำประปาต้องปลอดจากเชื้อก่อโรคนี้ ส่งผลให้ กปน. มีความเสี่ยงสูงจากการระบาดของเชื้อคริปโตสปอริเดียมในอนาคต

การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi Criteria Decision Analysis: MCDA) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์เพื่อตัดสินใจกรณีที่มีหลักเกณฑ์การตัดสินใจประกอบด้วยหลักเกณฑ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (Abrishamchi et al., 2005) งานวิจัยของ Lee (2014) แนะนำการใช้หลักการคลุมเครือ (Fuzzy) ร่วมกับกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) เพื่อกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับหลักเกณฑ์ที่มีข้อมูลไม่สมบูรณ์หรือข้อมูลทางภาษา (Ishak and Wanli, 2020) และเพิ่มความแม่นยำมากกว่าวิธี AHP (Afriliansyah et al., 2020) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Miloševic et al. (2021) ซึ่งเปรียบเทียบระหว่าง Fuzzy AHP กับ Interval AHP สำหรับการจัดการมรดกทางสถาปัตยกรรมของเมืองอัจฉริยะ พบว่า Interval AHP เหมาะสมในกรณีที่มีความแตกต่างของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ แต่ Fuzzy AHP มุ่งเน้นตามวัตถุประสงค์มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Vinodh et al. (2014) และ Santos et al. (2016) ซึ่งใช้ Fuzzy AHP คำนวณน้ำหนักหลักเกณฑ์ร่วมกับ TOPSIS สำหรับการจัดอันดับทางเลือก เนื่องจากน้ำประปาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีข้อจำกัดในการเรียกคืนผลิตภัณฑ์ด้อยคุณภาพ และพื้นที่รับผิดชอบในการสูบจ่ายน้ำประปาเป็นพื้นที่สำคัญของกรุงเทพฯ ดังนั้นการปรับปรุงกระบวนการฆ่าเชื้อก่อโรคจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำประปาเพื่อลดความเสี่ยงต่อผู้บริโภคทั้งในปัจจุบันและอนาคต งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียมในกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำสามเสน 4 เพื่อวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมในเชิงเทคนิคโดยการประยุกต์การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษาโดยคาดว่าจะสามารถขยายผลการปรับปรุงไปยังโรงงานผลิตน้ำประปาอื่นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) แอพพลิเคชั่น google form สำหรับการสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญโดยการออกแบบสอบถามแบบออนไลน์ และ 2) Excel spreadsheet สำหรับการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ และการประเมินทางเลือกเทคโนโลยีการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

วิธีการ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. กำหนดคุณสมบัติและคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญ

2. ออกแบบลำดับชั้นการตัดสินใจ (Hierarchical structure) โดยการออกแบบหลักเกณฑ์การประเมิน อิงตามข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการประชุมระดมสมองจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ เพื่อกำหนดหลักเกณฑ์หลักและหลักเกณฑ์รอง และทางเลือกเทคโนโลยีสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียม

3. วิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์โดย Fuzzy AHP

4. จัดอันดับความสำคัญของทางเลือกโดยวิธี TOPSIS โดยใช้ค่าน้ำหนักความสำคัญที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ประกอบการวิเคราะห์

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลและวิจารณ์

1. กำหนดคุณสมบัติและคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญ คัดเลือกจากพนักงานในสังกัดสายงานระบบผลิตน้ำของ กปน. โดยผู้เชี่ยวชาญต้องเป็นคณะทำงานแผนน้ำประปาปลอดภัยด้านผลิตน้ำ (กตผ.) และมีสมรรถนะการวางแผนผลิต ที่ระดับ 3 และ 4 ซึ่งเชี่ยวชาญในระบบผลิตน้ำ สามารถวางแผนเพื่อปรับปรุงและพัฒนาได้ มีพนักงานที่มีคุณสมบัติทั้งหมด 347 คน และการหารือร่วมกับ กตผ. จึงได้ผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 4 ท่าน มีรายละเอียดแสดงดัง Table 1

Table 1 Expertise of experts

Expert	Criteria for the Experts List Selection			
	Educational Background	Work Experiences (years)	WSP working group	Competency
A	Environmental Engineering	33	✓	4
B	Electrical Power Industrial Technology	34	✓	4
C	Public Health Civil and Environmental Engineering	24	✓	4
D	Water Resource and Environmental Engineering	11	✓	3

2. ออกแบบลำดับชั้นการตัดสินใจ การกำหนดทางเลือกปรับปรุงกระบวนการฆ่าเชื้อโรค โดยต้องมีค่าประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียม (Log Reduction Value: LRV) ขั้นต่ำ 2 LRV หรือจำนวนเชื้อลดลงประมาณร้อยละ 99 โดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคที่เหมาะสมมีทั้งหมด 4 วิธี คือ การจ่ายโอโซน (O_3) การจ่ายคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) และระบบ Reserve Osmosis (RO) (USEPA, 2011; WHO, 2017) แต่ระบบ RO ถูกยกเว้น เพราะไม่ผ่านการพิจารณาโดย กปน. รายละเอียดการติดตั้งระบบสำหรับ 3 ทางเลือกมีรายละเอียดดังนี้

(1) ระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซน โดยใช้ Ozone Generator สร้างโอโซนเพื่อใช้ฆ่าเชื้อโรคหลัก (Primary Disinfection) มีการจ่ายสารโอโซนทั้งหมด 2 ครั้ง คือ ก่อนการตกตะกอน (Pre-Ozonation) และหลังการกรองน้ำ (Post-Ozonation) และใช้ระบบจ่ายคลอรีนเป็นกระบวนการฆ่าเชื้อรอง (Second Disinfection)

(2) ระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนไดออกไซด์ เป็นระบบฆ่าเชื้อโรคหลัก ซึ่งใช้ Chlorine Dioxide Generator ซึ่งผสมสารตั้งต้น 2 สาร คือ โซเดียมคลอไรด์ ($NaClO_2$) กับ Cl_2 และใช้ระบบจ่ายคลอรีนเป็นกระบวนการฆ่าเชื้อโรครอง โดยต้องควบคุมค่า Contact time (Ct) เพื่อป้องกันไม่ให้สารไม่พึงประสงค์ 2 ชนิด คือ คลอเรต (Chlorate) และคลอไรต์ (Chlorite) เกิดขึ้นในน้ำประปามากกว่า 700 ไมโครกรัมต่อลิตร (μg/l) (WHO, 2017)

(3) ระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต โดยติดตั้งเครื่องสร้างและเครื่องฉาย สำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อโรคหลัก วิธีนี้ไม่เกิดสารไม่พึงประสงค์ เนื่องจากไม่ใช่กระบวนการทางเคมี แต่ไม่มีสารฆ่าเชื้อโรคอิสระคงเหลือในน้ำ ต้องมีระบบจ่ายคลอรีนเป็นกระบวนการฆ่าเชื้อโรครอง

การกำหนดหลักเกณฑ์การคัดเลือกใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านผ่านโทรศัพท์ สามารถจำแนกออกเป็นหลักเกณฑ์หลักและหลักเกณฑ์รอง รายละเอียดดัง Table 2 และโครงสร้างลำดับชั้นการตัดสินใจแสดงดัง Fig. 2

Table 2 Main criteria and sub criteria for MCDA

Main Criteria	Sub Criteria	Source
C1 Effective Disinfection (ED)	C1.1 Contact time (Ct)	USEPA (2011); WHO (2017)
	C1.2 pH dependency (pH)	
	C1.3 Turbidity	
C2 Effects from Disinfection (EFD)	C2.1 Disinfection by products (DBPs)	Crittenden et al. (2012)
	C2.2 Odor of water (Odor)	Desiderio and Nibbering (2010)
C3 Operator risk (OR)	C3.1 Threshold Limit Value Time Weight average (TWA)	USEPA (2011)
	C3.2 Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH)	
C4 Environment Effect (EE)	C4.1 Health concern level (Health)	WHO (2017)
	C4.2 Instability of Disinfection level (Instability)	
C5 Operate Skill (OS)	C5.1 Skill level (Skill)	Association of Boards of Certification (2018)
	C5.2 Process Control level (Control)	Earth Tech Canada Inc. (2005)

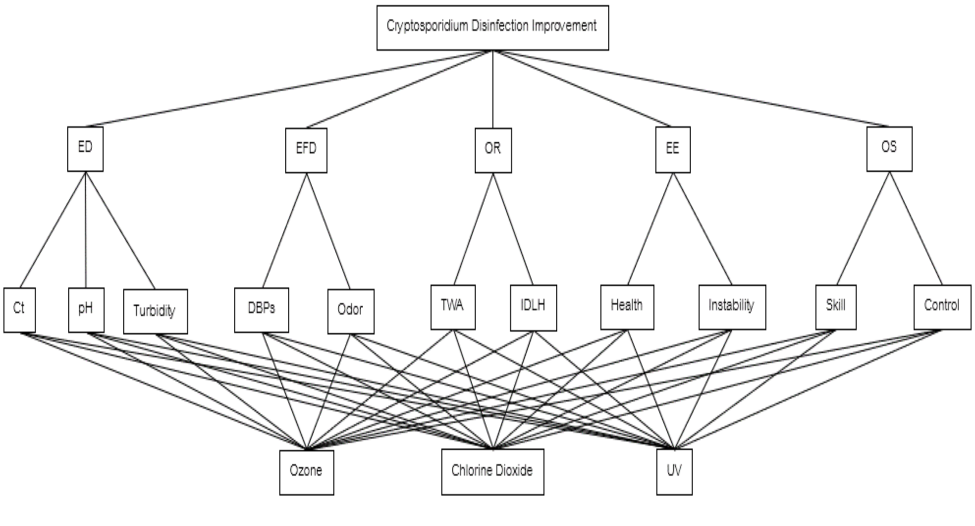


Fig. 2 FAHP model for disinfection process improvement in samsen water treatment plant 4

3. วิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์โดย Fuzzy AHP เนื่องจากการระบาดของโรคระบาดไวรัสโคโรน่า 2019 (COVID-19) ในประเทศไทยที่เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 ผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนจึงทำการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์หลักและรอง ผ่านการสัมภาษณ์ทางโทรศัพท์และแบบประเมินในแอพพลิเคชั่นออนไลน์ Google Form เป็นรายบุคคลในการเปรียบเทียบความสำคัญแบบเป็นคู่ (Pairwise comparison) โดยใช้ตัวแปรเชิงภาษาและทฤษฎีฟัซซี่แบบสามเหลี่ยมรายละเอียดดัง Table 3 และ Fig.3 (Buckley, 1985) กำหนดค่าตัวแปร a, b และ c คือ ค่าน้อยที่สุด ค่ากลาง และค่ามากที่สุดของ Fuzzy triangular number ซึ่งเหมาะสมต่อค่าข้อมูลพื้นฐานที่มีความชัดเจนต่อทิศทางในการตัดสินใจ ดัง Fig. 3 และ Equation 1 ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ n คือ จำนวนของหลักเกณฑ์ ซึ่งการประเมินเปรียบเทียบสัดส่วนน้ำหนัก ตั้งแต่ i ถึง j โดย $i = 1,2,\ldots,n$ $j = 1,2,\ldots,m$ $G = g_1, g_2, \ldots, g_n$ และกำหนด $M_{gi}^1, M_{gi}^2, \ldots, M_{gi}^m$ ในการหาค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์ (w_i) ของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนด้วยหลักการ Geometric Mean เพื่อหาค่า $\tilde{r}_{ij}$ (Geometric mean of Fuzzy comparison values) และคำนวณค่าน้ำหนักแบบผกผัน $\widetilde{w}_i$ (Fuzzy Weight) ดัง Equation 2 และ 3 จากนั้นคำนวณหาค่า w_i ด้วยค่า COA (Centre of area) ดัง Equation 4 และปรับปรุงค่าน้ำหนัก (Normalization) อีกครั้ง จึงคำนวณค่า v_{ij} (Weighted Normalized Matrix) ได้ด้วย Equation 5 ได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์หลักและรองจากผู้เชี่ยวชาญแต่ละคน

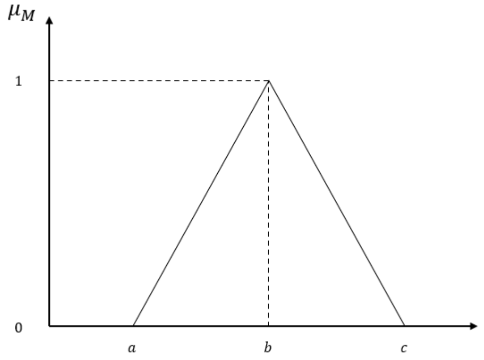


Fig. 3 Triangular Fuzzy Number (TFN)

$$\mu_M = (a, b, c) \tag{1}$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\prod_{j=1}^{n} M_{gi}^{j}\right)^{1/n} \tag{2}$$

$$\widetilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (r_1 \oplus r_2 \ldots .\oplus r_n)^{-1} \tag{3}$$

$$w_i = \frac{a + b + c}{3} \tag{4}$$

$$v_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \widetilde{w}_i \tag{5}$$

Table 3 Linguistic terms for criteria weighting

Linguistic terms	Fuzzy triangular number
Very low Importance (VL)	(1,1,1)
Moderately Importance (MI)	(2,3,4)
Importance (I)	(4,5,6)
Very Importance (VI)	(6,7,8)
Absolute Importance (AI)	(9,9,9)

โดยค่าน้ำหนักผ่านการตรวจสอบค่าความสอดคล้อง (Consistency Raito: CR) ด้วยค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะสูงที่สุด (Max Eigenvector: λ_{max}) จาก Equation 6 นำไปสู่การคำนวณค่าดัชนีคงตัว (Consistency Index: CI) และค่า CR ตาม Equation 7 และ 8 อ้างอิงค่า RI (Random consistency Index) (Shyamprasad and Kousalya, 2021) ใน Table 4 โดยค่า CR ทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 0.1 ถือว่ามีความสอดคล้องสำหรับการให้คะแนนเปรียบเทียบของผู้เชี่ยวชาญ

$$\lambda_{max} = (\sum GM_{11-n1} * \bar{X}_1) +\ldots+(\sum GM_{1n-ni} * \bar{X}_n) \quad (6)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \quad (7)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

จากนั้นนำค่าน้ำหนักความสำคัญของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 4 คนมาหาค่าเฉลี่ยได้ค่าน้ำหนักความสำคัญโดยรวมของหลักเกณฑ์หลัก หลักเกณฑ์รองสำหรับแต่ละหลักเกณฑ์หลัก (Local weight) และค่าน้ำหนักความสำคัญโดยรวม (Global importance weight) สำหรับหลักเกณฑ์รองที่จะถูกใช้ในการประเมินเพื่อจัดอันดับทางเลือกในขั้นตอนของ TOPSIS ต่อไป มีรายละเอียดแสดงดัง Table 5

Table 4 ค่าประมาณการ RI (Shyamprasad and Kousalya, 2021)

n	3	4	5	6	7	8
RI Values	0.52	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

Table 5 Global Weights from Fuzzy AHP

Main Criteria		Sub-Criteria		Global Weight
Symbol	Weight	Symbol	Weight	
C1	0.279	C1.1	0.405	0.113
		C1.2	0.222	0.062
		C1.3	0.398	0.111
C2	0.286	C2.1	0.703	0.201
		C2.2	0.297	0.085
C3	0.157	C3.1	0.535	0.084
		C3.2	0.471	0.074
C4	0.156	C4.1	0.564	0.088
		C4.2	0.436	0.068
C5	0.122	C5.1	0.475	0.058
		C5.2	0.516	0.063

4. จัดอันดับความสำคัญของทางเลือกโดยวิธี TOPSIS ใช้ค่าข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพจากแต่ละหลักเกณฑ์รองและค่าน้ำหนักความสำคัญโดยรวม (Global Weights) จาก Table 5 เพื่อจัดอันดับทางเลือกจากทั้งหมด 3 ทางเลือกที่พิจารณา นำค่าเชิงปริมาณของแต่ละหลักเกณฑ์รองดัง Table 6 โดยปรับปรุงค่าข้อมูลด้วย Equations 9 และ 10 หาทางเลือกที่มีค่าใกล้เคียงกับอุดมคติ (CC_i) มากที่สุด โดยคำนวณหาระยะห่างจากค่าในอุดมคติเชิงบวก (S_{PIS}) โดย $PIS = \{PIS_1, PIS_2, \ldots, PIS_n\}$ และค่าในอุดมคติเชิงลบ (S_{NIS}) โดย $NIS = \{NIS_1, NIS_2, \ldots, NIS_n\}$ จาก Equation 11, 12, 13, 14 และ 15 เมื่อกำหนดให้ J_1 คือ ค่าข้อมูลเชิงบวก J_2 คือ ค่าข้อมูลเชิงลบ การคัดเลือกทางเลือกที่อันดับดีที่สุดในการฆ่าเชื้อโรค แสดงใน Table 7

$$\bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} X_{ij}^2}} \quad (9)$$

$$V_{ij} = r_{ij} * W_i \quad (10)$$

$$PIS = \{(max_i V_{ij} | j \in J_1), (min_i V_{ij} | j \in J_2)\} \quad (11)$$

$$NIS = \{(min_i V_{ij} | j \in J_1), (max_i V_{ij} | j \in J_2)\} \quad (12)$$

$$S_{PIS_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(V_{ij} - P\square S_j\right)^2} \quad (13)$$

$$S_{NIS_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(V_{ij} - NIS_j\right)^2} \quad (14)$$

$$CC_i = \frac{S_{NIS_i}}{S_{PIS_i} + S_{NIS_i}} \quad (15)$$

Table 6 Data for TOPSIS method

Alternative	C1			C2		C3		C4		C5	
	C1.1	C1.2	C1.3	C2.1	C2.2	C3.1	C3.2	C4.1	C4.2	C5.1	C5.2
O_3	7.80	2	5	3	2	0.20	9.80	3	3	5	3
ClO_2	232	2	1	2	1	0.30	13.35	3	4	3	3
UV	5.80	1	1	0	0	0.05	10.00	0	0	3	5

Table 7 Ranking by TOPSIS method

Alternative	Ranking			
	Expert A	Expert B	Expert C	Expert D
O_3	2	2	2	2
ClO_2	1	1	1	1
UV	3	3	3	3

สรุป

ผลการจัดอันดับทางเลือกเทคโนโลยีการฆ่าเชื้อคริปโตสปอริเดียมในกระบวนการผลิตน้ำประปาทางด้านเทคนิคที่เหมาะสมต่อระบบการผลิตน้ำประปาของ กปน. จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 4 คน พบว่าเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ การจ่ายคลอรีนไดออกไซด์ มีความเหมาะสมเป็นอันดับที่หนึ่ง รองลงมาคือ การจ่ายโอโซน และการฆ่าเชื้อโรคด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ตามลำดับ ถึงแม้การจ่ายโอโซจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่มีข้อด้อยด้าน DBPs แต่เนื่องจากคะแนนค่าน้ำหนักความสำคัญโดยรวมอันดับที่หนึ่ง คือ DBPs ทำให้ถูกพิจารณาความเหมาะสมน้อยกว่าคลอรีน -ไดออกไซด์ แต่ยังคงมีค่าข้อมูลเชิงบวกสูงกว่าการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต สำหรับด้านความเหมาะสมในการลงทุนเพื่อปรับเปลี่ยนระบบจำเป็นต้องมีการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Taijrishi, M., Mariño, M.A. 2005. Case study: Application of multicriteria decision making to urban water supply. 131: 326. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496

Afriliansyah, T., Nababan, E.B., Situmorang, Z. 2019. Performance analysis of Fuzzy AHP in the rankings. doi: 10.4108/eai.20-1-2018.2281865

Association of Boards of Certification. 2018. Need-to-Know criteria water treatment operator Class VI.

Bogan, J.E. 2018. Disinfection techniques for cryptosporidium. Dairy Vet. Sci J. 7: 555718. doi: 10.19080/JDVS.2018.07.555718

Buckley. 1985. Ranking alternative using fuzzy. Fuzzy Sets Syst. 15: 21–3. doi.org/10.1016/0165-0114(85)90013-2

Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G. 2012. MWH's Water Treatment Principle and Design, 3rd ed. John Wiley & Son, Inc. New Jersey, USA.

Desiderio, M.D., Nibbering, N.M.M. 2010. White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. John Wiley & Son, Inc. New Jersey, USA.

Earth Tech (Canada) Inc. 2005. Chlorine and Alternative Disinfectants Guidance Manual. Manitoba Water Stewardship. Manitoba, Canada.

Jameson, P.B. Hung, Y.T., Kuo, C.Y., Bosela, P.A. 2008. Cryptosporidium outbreak (Water treatment failure): North Battleford, Saskatchewan, Spring 2001. 22: 342. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:5(342)

Koompapong, K., Sukthana, Y 2012. Seasonal variation and potential sources of cryptosporidium contamination in surface water of Chao Phraya River and Bang Pu Nature Reserve Pier, Thailand. Southeast Asia J. Trop. Med. Public Health 43: 832–840

Ishak, A., Wanli. 2020. Analysis of Fuzzy AHP-TOPSIS methods in multi criteria decision making: Literature review. 1003: 012160. doi:10.1088/1757-899X/1003/1/012160

Lee, S. 2014. Determination of priority weights under multiattribute decision-making situations: AHP versus Fuzzy AHP. J. Constr. Eng. Manag. 141: 05014015. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000897.

Miloševic, M.R., Miloševic, D.M., Stanojevic, A.D., Stevic, D.M., Simjanovic, D.J. 2021. Fuzzy and Interval AHP Approaches in Sustainable Management for the Architectural Heritage in Smart Cities. Mathematics 9: 304. doi.org/10.3390/math9040304

Santos, J., Pagsuyoin, S.A., Latayan, J. 2016. A multi-criteria decision analysis framework for evaluating point-of- use water treatment alternatives. Clean Technol. Environ. Policy. 18: 1263–1279. doi.org/10.1007/s10098-015-1066-y

Shaofeng, L., Ran Zhilin, R., Chongwei, C., Yixing, Y. 2011. Study on the inactivation of cryptosporidium and giardia by chlorine dioxide in water. 469: 1819–1822. doi.org/10.1109/CDCIEM.2011.469

Shyamprasad, V., Kousalya, P. 2020. Role of consistency and random index in analytic hierarchy process- a new measure. NOIEAS. 19: 233–239. doi.org/10.1007/978-981-15-3215-3

Soliman, A., El-Adawy, A., Abd El-Aal, A.A., Elmallawany, M.A., Nahnoush, R.K., Abd Eiaghni, A.R., Negm, M.S., Mohsen, A. 2018. Usefulness of sunlight and artificial UV radiation versus chlorine for the inactivation of

cryptosporidium oocysts: An in vivo animal study. Maced. J. Med. Sci. 6: 975–981. doi: 10.3889/ oamjms.2018.180

USEPA. 2011. Water Treatment Manual: Disinfection. Environmental protection agency, Johnstown Castle, Co. Wexford, Ireland. pp. 187

Vinodh, S., Prasanna, M., Prakash, N.H. 2014. Integrated fuzzy AHP-TOPSIS for selecting the best recycling method: A case study. Appl. Math. Model. 38: 4662–4672. doi.org/10.1016/j.apm.2014.03.007

WHO. 2017. Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum. WHO Graphics, Switzerland and Interligar, Brazil, pp. 631

Xagoraraki, I., Harrington, G.W., Assavasilavasukul, P., Standridge, J.H. 2004. Removal of emerging waterborne pathogens and pathogen indicators by pilot-scale conventional treatment. doi.org/10.1002/ j.1551-8833.2004.tb10632.x

ระบบเฝ้าระวังผู้ขับขี่ด้วยอุปกรณ์วัดคลื่นไฟฟ้าสมองแบบสวมใส่

Driver vigilance system using wearable EEG device

<u>นันท์นภัส ศิริบุญญพัฒน์</u>, มุสตากีม แหล๊ะหลง, นริสรา หมิดสะแหล้, ยรรยงค์ พันธ์สวัสดิ์*

<u>Nannaphat Siribunyaphat</u>, Mustakeem Laehlong, Narissara Midsalae, Yunyong Punsawad*

สำนักวิชาสารสนเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ นครศรีธรรมราช 80160

School of Information Sciences, Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: yunyong.pu@wu.ac.th

บทคัดย่อ

จากปัญหาการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนจากสาเหตุการหลับของผู้ขับขี่รถยนต์ งานนี้จึงได้เสนอการเฝ้าระวังผู้ขับขี่เพื่อป้องกันการเกิดสภาวะหลับในด้วยการประยุกต์ใช้คลื่นไฟฟ้าสมอง (Electroencephalogram) โดยนำอุปกรณ์วัดคลื่นสมองแบบสวมใส่ Mindflex มาใช้วัดคลื่นไฟฟ้าสมองบริเวณส่วนหน้าและส่งข้อมูลขนาดของคลื่นอัลฟา เบต้า และธีต้า ไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อจำแนกระดับความง่วงนอน ด้วยอัลกอริทึมที่เสนอออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ง่วงน้อย ง่วงปานกลาง และง่วงมาก เพื่อแสดงผลผ่านหน้าจอให้แก่ผู้ใช้ เมื่อมีการจำแนกได้ว่าผู้ขับขี่อมีความง่วงในระดับมาก อุปกรณ์จะทำการการแจ้งเตือนด้วยสัญญาณเสียงออกมาอย่างต่อเนื่อง และดับลงเมื่อมีการตอบสนองจากผู้ใช้ด้วยการกดปุ่ม จากผลการทดสอบการทำงานด้วยการขับรถจำลอง พบว่าอุปกรณ์สามารถระบุระดับความง่วงได้ความถูกต้องประมาณ 75% แต่เป็นเพียงการสำรวจเบื้องต้น อย่างไรก็ตามระบบต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้มีความแม่นยำและสะดวกต่อการใช้งาน รวมถึงการทดสอบที่สามารถยืนยันได้ถึงการนำไปใช้งานจริงได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การเฝ้าระวังผู้ขับขี่, คลื่นไฟฟ้าสมอง, อาการง่วงนอนขณะขับรถ

Abstract

According to road accidents which cause by the sleep of motorists. Hence, this work proposed the driver vigilance to prevent the occurrence of drowsiness using an electroencephalogram (EEG). Mindflex wearable EEG was used to measure EEG signals from the frontal area and transmit alpha, beta, and theta power data to be processed by a microcontroller to classify drowsiness levels. Using the proposed algorithm, three drowsiness levels can be divided as mild, moderate, and very drowsiness, and display the results on the screen for the user interface. When the driver is drowsy at a high level, the device will continue to alert with a sound signal. The driver can respond by pressing a button to turn the sound off. The test results from driving a simulated car showed that the proposed system could identify drowsiness with an accuracy of about 75%, but this is just a preliminary study. However, the system needs to be improved for high accuracy and ease of use. Moreover, the experiment design for reality use verification and confirmation should be performed in future work.

Keywords: Electroencephalogram, Drowsiness, Driver vigilance

บทนำ

อุบัติเหตุบนท้องถนนสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ทำให้มีผู้ได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก ข้อมูลจากศูนย์ข้อมูลอุบัติเหตุในปี พ.ศ. 2564 ได้ทำการบันทึกจำนวนผู้บาดเจ็บจากอุบัติเหตุบนท้องถนนสูงถึง 883,324 คน และมีผู้เสียชีวิต 13,619 คน (ศูนย์ข้อมูลอุบัติเหตุ, 2564) ข้อมูลของกระทรวงคมนาคมที่ได้รวบรวมสถิติของอุบัติเหตุบนท้องถนนในปี พ.ศ. 2564 พบว่าการหลับในเป็นสาเหตุลำดับต้น ๆ ที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ (กระทรวงคมนาคม, 2564) จากสาเหตุนี้ทำให้กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณะภัย (ปภ.) เตือนในเรื่องการง่วงหลับในขณะขับรถนั้นก่อให้เกิดอุบัติเหตุในลักษณะที่รุนแรงได้ (กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย, 2561) และมีการรณรงค์ในเรื่อง “ง่วงไม่ขับ” เพื่อลดการเกิดอุบัติเหตุเพื่อไม่ให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน

ในปัจจุบันนี้ บริษัทผู้พัฒนารถยนต์ได้มีการพัฒนาระบบตรวจสอบอาการง่วงนอนเพื่อแจ้งเตือนการหลับใน อาทิ บริษัทรถยนต์ Audi ได้พัฒนาระบบที่ชื่อว่า driver assistance systems เมื่อระบบวิเคราะห์ว่าสมาธิของคนขับลดลงจะทำการเตือนด้วยไฟและเสียง (Audi, 2013) BMW ได้พัฒนาระบบเพื่อช่วยเหลือคนขับที่ชื่อว่า active driving assistant นอกจากนี้ (BMW, 2019) Mercedes-Benz ได้อธิบายถึงระบบ attention assist ตัวระบบจะสามารถตรวจสอบพฤติกรรมของผู้ขับขี่ได้โดยใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์มากว่า 70 รูปแบบ (Mercedes-Benz, 2013) หรือแม้กระทั้งรถยนต์จากบริษัทผู้ผลิตในฝั่งเอเชียอย่าง Honda ได้พัฒนาระบบ Driver Attention Monitor เพื่อตรวจสอบและประเมินพฤติกรรมของผู้ขับขี่ โดยรับสัญญาณจาก Electric Power Steering (EPS) (Honda, 2017) จะเห็นได้ว่า บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ได้ทำการพัฒนาระบบเหล่านี้เพื่อช่วยเหลือให้ผู้ขับขี่มีความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งราคาของรถยนต์นั้นจะเพิ่มขึ้นตามระบบที่ได้ทำการพัฒนา และรถยนต์รุ่นเก่าเองก็จะไม่มีระบบเหล่านี้เพื่อช่วยเหลือ

ระบบเฝ้าระวังผู้ขับขี่ที่มีการพัฒนาจะนำสัญญาณทางชีวการแพทย์มาตรวจสอบเพื่อช่วยในการประมวลผล สัญญาณสมอง (Electroencephalogram หรือ EEG) เป็นหนึ่งในสัญญาณที่สามารถวัดได้จากร่างกายของมนุษย์ โดยจะเป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าจากการทำงานของสมอง โดยจะวางขั้วจับสัญญาณบริเวณหนังศีรษะเพื่อให้ได้คลื่นสมอง (Brain wave) ออกมา (Devlaminck et al., 2009) สัญญาณที่ได้จะออกมาในรูปแบบของ พัลส์ (Pulse) ที่จะเปลี่ยนแปลงตามกิจกรรมหรือการกระทำต่าง ๆ สามารถแบ่งคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG rhythms) ได้ 4 ประเภท คือ คลื่นเบต้า (Beta) เป็นคลื่นที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 14-26 เฮิรตซ์ พบในสมองส่วน Frontal และ Parietal ในขณะที่กำลังคิดหรือมีความตั้งใจสูง คลื่นอัลฟา (Alpha) เป็นคลื่นที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 8-13 เฮิรตซ์ พบในขณะผ่อนคลาย มีความตั้งใจ และหลับตา คลื่นธีต้า (Theta) เป็นคลื่นที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 4-7.5 เฮิรตซ์ พบในขณะครึ่งหลับครึ่งตื่น เพิ่งนอนหลับ การคิดสร้างสรรค์และการจินตนาการ และคลื่นเดลต้า (Delta) เป็นคลื่นที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.5-4 เฮิรตซ์ พบในขณะหลับลึก การคิดเชิงซับซ้อน

โดยปกติแล้วสมองจะสร้างคลื่นที่ 4 ประเภทออกมาตลอดเวลา แต่ละช่วงจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกิจกรรมของมนุษย์ ทำให้ในการวัดสัญญาณสมองนั้นสามารถความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเหล่านี้ออกมาได้ โดยทั่วไปแล้วจะทำการวางขั้วไฟฟ้าตามตำแหน่งบนหนังศีรษะ ซึ่งระบบมาตรฐานในการวัดที่เรียกว่าระบบการวางขั้วไฟฟ้า 10-20 จากนั้นจึงทำการขยายและกรองสัญญาณก่อนนำเข้าสู่ ระบบเชื่อมต่อระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (Brain computer interface หรือ BCI) จะเป็นการนำสัญญาณสมองมาทำการแปลงเพื่อนำข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลสัญญาณทางชีวการแพทย์และมีการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการควบคุมหรือสั่งงานอุปกรณ์ต่าง ๆ (Park, et. al., 2020) รวมถึงอุปกรณ์ตรวจจับอาการหลับในขณะขับรถด้วย

มีงานวิจัยจากนักวิจัยทั่วโลกที่นำระบบ BCI มาใช้เพื่อสร้างเป็นระบบที่ใช้เฝ้าระวังผู้ขับขี่ (LaRocco, 2020) เช่น Zhang และทีมของเขาได้ทำการพัฒนาระบบ BCI โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณสมองแบบไร้สายในการรวบรวมสัญญาณ EEG ออกมาเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ ผ่านการทดสอบการขับขี่รถไฟจำลอง (Zhang, 2017) Kondapaneni และ

คณะได้ใช้ชุดตรวจจับคลื่นสมอง Neurosky Mindflex Headset เพื่อตรวจสอบระดับสมาธิของผู้สวมใส่เพื่อตรวจหาอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ ซึ่งมีการตรวจสอบการกะพริบตาและมีแดชบอร์ดแจ้งเตือน (Kondapaneni, 2021) การศึกษาของ Punsawad และคณะได้ทำการตรวจสอบความล้าทางจิตใจของผู้ทดลองผ่านสัญญาณสมองเพื่อหาค่าดัชนีที่นำมาเตือนอาการเหนื่อยล้า รวมนำค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนในเลือด (SpO2) ค่าความดันโลหิต (BP) และอัตราการเต้นของหัวใจเข้ามาใช้ในการประมวลผลในระบบนี้ด้วย (Punsawad, 2011) Stancin และทีมของเขาได้ทำการศึกษาเทคนิคในการประมวลสัญญาณ EEG ที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบตรวจจับความง่วง โดยการใช้ Fast Fourier Transform (FFT) (Stancin, 2021)

งานศึกษานี้ได้นำเสนอระบบการตรวจสอบอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ด้วยอุปกรณ์วัดคลื่นไฟฟ้าสมองแบบสวมใส่ โดยนำข้อมูลที่ได้มาจำแนกระดับความง่วงนอนโดยใช้อัลกอริทึมอย่างง่ายเพื่อการประมวลผลในเวลาจริง เพื่อทำการแจ้งเตือนไปยังผู้ขับขี่เมื่อเริ่มมีอาการง่วงนอน โดยการทดลองออกแบบเพื่อศึกษาการใช้งานอุปกรณ์วัดคลื่นไฟฟ้าสมองแบบสวมใส่ และการแจ้งเตือนตามระดับความง่วงนอน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและทดสอบกับผู้ทดลองจำนวนมากในสถานการณ์จริงต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ระบบที่นำเสนอ

ระบบที่นำเสนออาศัยการตรวจจับสัญญาณสมองของผู้ทดลองแล้วส่งค่าไปยังบอร์ด Arduino Uno เพื่อทำการประมวลและวิเคราะห์สัญญาณ เพื่อหาสัญญาณสมองในขณะที่ผู้สวมใส่มีอาการง่วงนอน โดยระบบจะทำการแจ้งเตือนเป็นเสียงผ่าน Buzzer หากพบอาการง่วงนอน และผู้ขับขี่จำเป็นต้องกดสวิตซ์เพื่อตอบสนองต่อระบบเมื่อได้ยินสัญญาณเตือน นอกจากนี้ระบบยังแสดงผลบนหน้าจอ LCD I2C ให้ผู้ทดลองรับทราบผลลัพธ์ด้วย ภาพรวมของระบบแสดงใน Fig. 1(A)

การรับสัญญาณสมอง

ในการศึกษานี้ได้ใช้อุปกรณ์ในการรับสัญญาณสมอง Mindflex ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นสมองที่พัฒนาโดย NeuroSky เป็นอุปกรณ์ที่ส่งสามารถวัดและประมวลผลคลื่นไฟฟ้าสมองออกมาเป็นค่าสเปกตรัมกำลังของความถี่ช่วงของสมองที่สามารถใช้ตรวจกิจกรรมต่างๆ เช่น การจดจ่อ มีสมาธิ Katona, 2014) อุปกรณ์มีลักษณะเป็นแถบคาดศีรษะมีอิเล็กโทรดตรวจจับสัญญาณวางอยู่บริเวณหน้าผาก และมีขั้วสัญญาณอ้างอิงทั้งหมด 2 ขั้วหนีบบริเวณใบหูทั้ง 2 ข้าง ดังแสดงใน Fig. 1(B)

(A) (B)

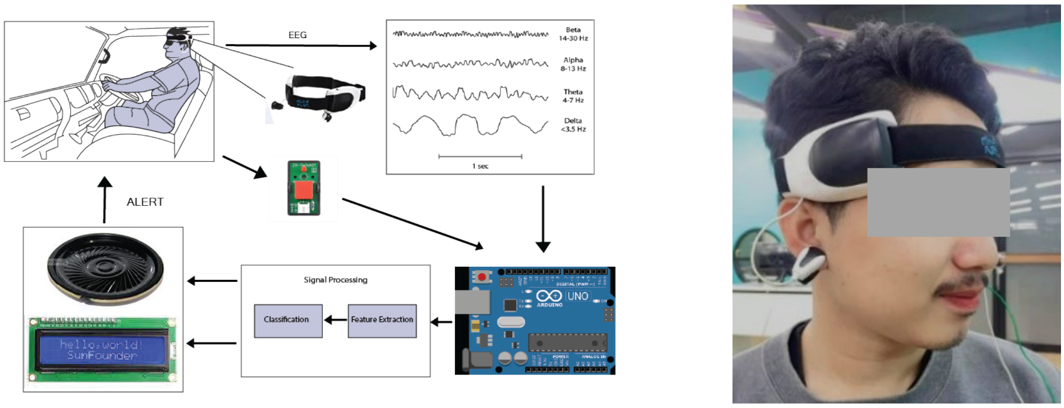


Fig. 1 (A) Components of proposed driver vigilance system using EEG. (B) EEG acquisition using Mindflex device

สัญญาณสมองที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์กับระบบที่นำเสนอนี้จะมุ่งเน้นไปที่ 3 คลื่น คือ คลื่นเบต้า คลื่นอัลฟา และคลื่นธีต้า คลื่นทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถตรวจพบได้มากในขณะที่ง่วงนอนและนอนหลับ โดยระบบจะจำแนกสัญญาณเหล่านี้เมื่ออุปกรณ์ Mindflex ได้ส่งสัญญาณที่รับได้มายังบอร์ด Arduino Uno ที่มีการเขียนโปรแกรมประมวลผลสัญญาณ โดยก่อนการประมวลผลสัญญาณ ระบบจะทำการขยายสัญญาณที่ได้รับมาเพื่อให้สามารถประมวลผลได้ง่ายขึ้น จากนั้นจึงทำการแปลงสัญญาณจากแอนาล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อให้ระบบสามารถประมวลผลได้

อัลกอริทึม

การบันทึกค่าพื้นฐาน

ในการทำงานของระบบนี้จำเป็นจะต้องมีค่าดัชนีพื้นฐานเพื่อนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการประมวลผลของผู้เข้ารับการทดลองแต่ละคน โดยได้ทำการอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้าในการนำขนาดของสเปกตรัมของสัญญาณสมองในช่วงความถี่ เบต้า อัลฟา และธีต้า มาสร้างดัชนีน้ำหนักความถี่ เพื่อใช้ในการจำแนกระดับความง่วง โดยจะทำการหาค่าดัชนีขณะหลับตาสำหรับการเปรียบเทียบสถานะ ซึ่งจะเก็บค่าขณะหลับตาทั้งหมด 10 วินาที เพื่อกำหนดค่า $I_{eyeclosing}$ โดยสามารถหาขนาดสเปกตรัมของสัญญาณสมองในแต่ละช่วงความถี่ได้ดังสมการที่ 1–3

$$\theta = \sum_{f=4}^{7} PS(f) \quad (1)$$

$$\alpha = \sum_{f=8}^{13} PS(f) \quad (2)$$

$$\beta = \sum_{f=14}^{30} PS(f) \quad (3)$$

จากสมการกำหนดให้ PS(f) คือ ขนาดของความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ f เฮิรตซ์ ในช่วงอัลฟา (8–13 เฮิรตซ์) ช่วงเบต้า (14–26 เฮิรตซ์) และช่วงธีต้า (4–7.5 เฮิรตซ์) และกำหนดให้ α เป็นขนาดความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความถี่ช่วงอัลฟา β เป็นขนาดความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความถี่ช่วงเบต้า และ θ เป็นขนาดความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของความถี่ช่วงธีต้า

การกำหนดพารามิเตอร์

ในการกำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการตรวจสอบ จะใช้ค่าดัชนีน้ำหนักความถี่ในการตรวจสอบเพื่อให้ได้ค่าความแม่นยำที่สูงที่สุด โดยสามารถคำนวณค่าดัชนีน้ำหนักความถี่ได้ตามสมการที่ 4

$$I(t) = \frac{W_1(t)\theta(t)+W_2(t)\alpha(t)}{W_3(t)\beta(t)} \rightarrow \frac{0.6\theta+0.4\alpha}{0.5\beta} \quad (4)$$

โดยที่ค่า $w_1(t)$, $w_2(t)$ และ $w_3(t)$ เป็นค่าน้ำหนักของคลื่นความถี่ธีต้า $\theta(t)$ อัลฟา $\alpha(t)$ และเบต้า $\beta(t)$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามกิจกรรมตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักได้อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Punsawad (Punsawad, 2011) และค่าน้ำหนักนี้เป็นค่าน้ำหนักที่ให้ความถูกต้องสูงสุด I(t) คือค่าดัชนีน้ำหนักความถี่ ณ ช่วงเวลานั้น ๆ โดยจะกำหนดค่าของแต่ละสถานะดังนี้

State 1: $T_1 = 0.5I_{eyeclosing}$

State 2: $T_2 = 0.7I_{eyeclosing}$

State 3: $T_3 = 0.9I_{eyeclosing}$

เมื่อให้ $I_{eyeclosing}$ เป็นค่าดัชนีน้ำหนักความถี่ในขณะหลับตาซึ่งจะคำนวณมาจากสมการที่ 4 โดยจะใช้ค่า $I_{eyeclosing}$ เป็นค่าพื้นฐานเมื่อนำมาใช้ในการคำนวณช่วงในการตัดสินใจ โดยจะนำค่าพื้นฐานมาคำนวณเป็นค่าเริ่มต้นของสถานะ คือ T1 แทนสถานะง่วงน้อย T2 แทนสถานะง่วงปานกลาง และ T3 แทนสถานะง่วงมาก

ระบบการตัดสินใจ

ในการตัดสินใจเพื่อระบุสถานะความง่วงจะทำการคำนวณหาค่าดัชนีน้ำหนักความถี่ ณ เวลานั้น ๆ แล้วนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของสถานะต่าง ๆ ที่ได้ทำการประมวลผลก่อนหน้า ดังที่แสดงต่อไปนี้

I(t) น้อยกว่าหรือเท่ากับ T_1 จะตัดสินใจว่าอยู่ในสถานะปกติ (ไม่ง่วง)

I(t) มากกว่า T_1 จะตัดสินใจว่าอยู่ในสถานะง่วงน้อย

I(t) มากกว่า T_2 จะตัดสินใจว่าอยู่ในสถานะง่วงปานกลาง

I(t) มากกว่า T_3 จะตัดสินใจว่าอยู่ในสถานะง่วงมาก

ระบบเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานและการแจ้งเตือน

จากที่ได้กล่าวไปว่าระบบที่ได้ออกแบบนั้นจะมีหน้าจอ LED I2C ในการแสดงผลและมี Buzzer ที่ใช้ในการส่งสัญญาณเตือนตามระดับความง่วงที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยระบบการแจ้งเตือนจะเป็นดังนี้

1. State 1: หน้าจอ LED แสดงเปอร์เซ็นต์ระดับความง่วงและมีเสียงแจ้งเตือน 1 ครั้ง ผู้ขับขี่ไม่ต้องกดปุ่มตอบสนองกับระบบ
2. State 2: หน้าจอ LED แสดงเปอร์เซ็นต์ระดับความง่วงและมีเสียงแจ้งเตือนที่ดังขึ้น และเสียงแจ้งเตือนจะไม่หยุดจนกว่าผู้ขับขี่จะกดปุ่มเพื่อตอบสนองกับระบบ
3. State 3: หน้าจอ LED แสดงเปอร์เซ็นต์ระดับความง่วงและมีเสียงแจ้งเตือนที่ดังที่สุด และเสียงแจ้งเตือนจะไม่หยุดจนกว่าผู้ขับขี่จะกดปุ่มเพื่อตอบสนองกับระบบ

(A) (B) (C)

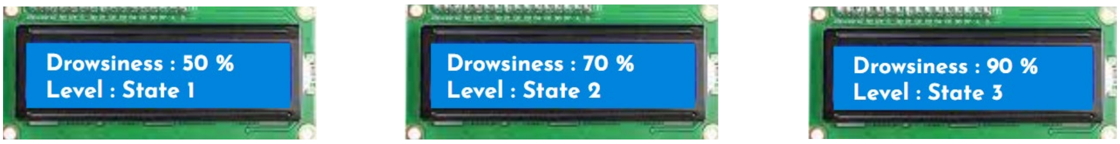


Fig. 2 Drowsiness state notification on LED screen (a) light drowsiness (b) moderate drowsiness (c) strong drowsiness

การทดลองและผลลัพธ์

กระบวนการทดสอบระบบนี้มีอาสาสมัครที่มีสุขภาพดีจำนวน 3 คน (ชาย 2 หญิง 1) อายุเฉลี่ย 22 ปี โดยอาสาสมัครแต่ละคนไม่มีประสบการณ์เกี่ยวของกับการเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณสมองและเครื่องจักร ก่อนทำการทดสอบอาสาสมัครทุกคนจำเป็นต้องผ่านการฝึกเป็นเวลา 5–10 นาที แต่ละคนจะต้องทำการควบคุมรถจำลอง โดยจะทดสอบในเกมที่มีชื่อว่า Euro truck simulator 2 โดยใช้เวลาในการทดสอบแต่ละรอบ 1 ชั่วโมง ซึ่งในการทดสอบเป็นการทดสอบแบบ Virtual ที่ได้ออกแบบจะใช้ชุดขับขี่ Virtual PXN V9 โดยประกอบด้วย พวงมาลัย เกียร์ แป้นเหยียบ (คันเร่ง เบรค คลัตช์) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงที่มีการเกิดอุบัติเหตุจากการง่วงนอนเยอะที่สุด 1 ช่วง 24:00–08:00 น. และ 2 ช่วง 13:00–15:00 น.

ขณะที่ทำการทดลองจะมีการบันทึกค่าและวิดีโอตลอดการทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการแจ้งเตือนที่จะแสดงผลเพื่อตอบสนองต่อผู้ทดลองว่าสามารถแจ้งเตือนได้ถูกต้องหรือไม่ ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลาตามที่เกิดอุบัติเหตุจากการง่วงนอนมากที่ สุด 2 ช่วงเวลา โดยในช่วงเวลา 24:00–08:00 น. มีการเตือนทั้งหมด 114 ครั้ง โดยมีการเตือนที่ถูกต้องทั้งหมด 84 ครั้ง เป็น state 1 27 ครั้ง state 2 50 ครั้ง และ state 3 7 ครั้ง และการเตือนที่ไม่ถูกต้อง 30 ครั้ง เป็น state 1 6 ครั้ง state 2 22 ครั้ง และ state 3 2 ครั้ง และในช่วงเวลา 13:00–15:00 น. มีการแจ้งเตือนทั้งหมด 95 ครั้ง เป็นการเตือนที่ถูกต้อง 71 ครั้ง เป็น state 1 29 ครั้ง state 2 36 ครั้ง และ state 3 6 ครั้ง และการเตือนที่ไม่ถูกต้อง 24 ครั้ง เป็น state 1 6 ครั้ง state 2 16 ครั้ง และ state 3 2 ครั้ง ดังที่แสดงใน Table 1 หลังจากทำการเปรียบเทียบความแม่นยำในแต่ละช่วงพบว่า ช่วง 24:00–08:00 น. มีความแม่นยำใกล้เคียงกับช่วง 13:00–15:00 น.

Fig. 4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแจ้งเตือนของระบบ ในช่วงเวลา 24:00–08:00 น. มีค่าความถูกต้องในการแจ้งเตือนที่ state 1 81.82% state 2 69.44% และ state 3 77.78% ทำให้ในช่วงเวลานี้มีค่าความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ 73.68% ส่วนในช่วงเวลา 13:00–15:00 น. มีค่าความถูกต้องในการแจ้งเตือนที่ state 1 82.86% state 2 69.24% และ state 3 75.00% ทำให้ในช่วงเวลานี้มีค่าความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ 74.74%

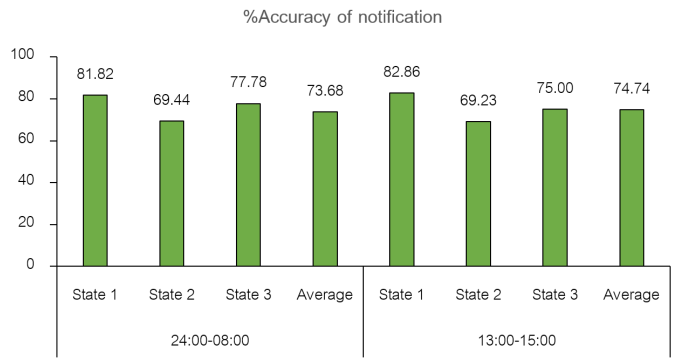


Fig. 3 Average accuracy of notification of drowsiness states in different periods from all subjects.

Table 1 Result of alarm of state of drowsiness at different periods.

ช่วงเวลา	สถานะการเตือน	การเตือนที่ถูกต้อง	การเตือนที่ไม่ถูกต้อง
24:00 - 08:00 น.	State 1	27	6
	State 2	50	22
	State 3	7	2
	Total	84	30
13:00 - 15:00 น.	State 1	29	6
	State 2	36	16
	State 3	6	2
	Total	71	24

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบเฝ้าระวังผู้ขับขี่โดยนำเสนอวิธีการใช้ระบบเชื่อมต่อระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสมองที่เกิดขึ้นเมื่อผู้ขับขี่มีอาการง่วงนอน โดยในระบบนี้ได้ใช้ Mindflex ซึ่งเป็น

อุปกรณ์รับสัญญาณสมองแบบคาดศีรษะในการรับสัญญาณ โดยได้แบ่งระดับความง่วงออกเป็น 3 ระดับ คือ ง่วงเล็กน้อย ง่วงปานกลาง และง่วงมาก หากผู้ขับขี่มีอาการง่วง ระบบจะแจ้งเตือนตามระดับความง่วงที่ได้กำหนดไว้เพื่อให้แน่ใจว่าผู้ขับขี่ยังคงมีสมาธิจดจ่ออยู่กับการขับรถ ซึ่งในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ของระบบที่นำเสนอ จากการทดลองกับการขับรถจำลองพบว่าระบบมีอัตราความแม่นยำประมาณ 75% ทำให้ทราบถึงแนวทางการนำอุปกรณ์วัดคลื่นไฟฟ้าสมองแบบสวมใส่มาประยุกต์ใช้ได้ อย่างไรก็ตามระบบควรได้รับการพัฒนาปรับปรุงในหลายส่วน ได้แก่ อัลกอริทึมในการจำแนกเพื่อให้ระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ทดสอบกับกลุ่มทดลองที่มีจำนวนมากขึ้นเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบก่อนจะนำไปใช้กับการทดสอบกับการขับขี่จริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. 2561. ง่วงไม่ขับ ลดเสี่ยงอุบัติเหตุ. กระทรวงมหาดไทย. https://www.thaihealth.or.th/ปภ-แนะผู้ขับขี่ง่วงไม่ข/, 16 ตุลาคม 2565.

ศูนย์ข้อมูลอุบัติเหตุ. 2564. สถิติการเกิดอุบัติเหตุทางถนนในประเทศไทย. ศูนย์ข้อมูลอุบัติเหตุ. https://www.thairsc.com/data-compare, 16 ธันวาคม 2565.

สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม. 2564. อุบัติเหตุทางถนน ปี 2564. กระทรวงคมนาคม. https://datagov.mot.go.th/dataset/roadaccident/resource/d0a8601a-3ee5-4ce8-8e9d-3dae3915dc30, 16 ตุลาคม 2565.

Audi MediaCenter. 2013. Driver assistance system. Audi MediaCenter. https://www.audi-mediacenter.com/en/foray-into-the-worlds-largest-market-segment-the-audi-a3-sedan-and-s3-sedan-3249/driver-assistance-systems-3350#:~:text=Rest%20recommendation%20technology%20analyzes%20the,(40.39%20and%20124.27%20mph), 10 December 2022.

BMW of Minnetonka. Driver attention camera. BMW of Minnetonka. 2019. https://www.bmwofminnetonka.com/bmw-active-cruise-control-with-driver-attention-camera/, 10 December 2022.

Devlaminck, D., Wyns, B., Boullart, L., Santens, P., Georges, O. 2009. Brain-Computer Interfaces: From theory to practice. In: Proceedings of 17th European Symposium on Artificial Neural Networks, 22–24 April 2009, Bruges, Belgium, pp. 415–424.

Honda Middle East. 2017. Driver attention monitor. 2018. Honda Middle East. https://www.honda-mideast.com/en/technology/Driver-Attention-Monitor, 10 December 2022.

Katona, J., Farkas, I., Ujbanyi, T., Dukan, P., Kovari, A. 2014. Evaluation of the Neurosky MindFlex EEG Headset Brain Waves Data. In: 2014 IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 29 May 2014, Herl'any, Slovakia, pp. 91–94. doi: 10.1109/SAMI.2014.6822382

Kondapaneni, A., Hemanth, C., Sangeetha, R.G., Vaishnavi Priyanka, R.S.J., Sanjay Saradhi, M. 2021. A smart drowsiness detection system for accident prevention. National Academy Science Letter 44: 317–320. doi: 10.1007/s40009-020-01000-3

LaRocco, J., Le, M.D., Paeng, D.G. 2020. A systemic review of available low-cost EEG headsets used for drowsiness detection. Frontiers in neuroinformatics 14: 553352. doi: 10.3389/fninf.2020.553352.

Mercedes-Benz of Easton. 2013. Mercedes-Benz Attention assist. https://www.mercedesbenzofeaston.com/mercedes-benz-attention-assist/, 10 December 2022.

Park, S., Han, C., Im, C. 2020. Design of wearable EEG devices specialized for passive brain–computer interface applications. Sensors (Basel) 20: 4572. doi: 10.3390/s20164572.

Punsawad, Y., Aempedchr, S., Wongsawat, Y., Panichkun, M. 2011. Weighted-Frequency Index for EEG-BASED Mental Fatigue Alarm System. IJABME 4: 36–41.

Stancin, I., Cifrek, M., Jovic, A. 2021. A review of EEG signal features and their application in driver drowsiness detection systems. Sensors 2: 3786. doi: 10.3390/s21113786.

Zhang, X., Li, J., Liu, Y., et al. 2017. Design of a fatigue detection system for high-speed trains based on driver vigilance using a wireless wearable EEG. Sensors 17: 486. doi: 10.3390/s17030486.

การศึกษาอิทธิพลเทคนิคแสงธรรมชาติต่อปริมาณแสงธรรมชาติในห้องพักผู้ป่วยสูงอายุชาวไทย

The study of the effect of daylighting technique on amount of daylight in Thai elderly patient’s room

วีรินทร์ อุดมโสภกิจ[a,*], **นวลวรรณ ทวยเจริญ**[b]

Veerin Udomsopakit[a,*], Nuanwan Tuaycharoen[b]

[a]นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900

[b]อาจารย์ประจำ หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900

[a]Graduate Student in Master of Architecture (Building Innovation Technology) of Architecture Faculty, Kasetsart University, Ngam Wong Wan Rd., Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

[b]Lecturer in Master of Architecture (Building Innovation Technology) of Architecture Faculty, Kasetsart University, Ngam Wong Wan Rd., Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. Email address: veerin.ud@ku.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคแสงธรรมชาติต่อปริมาณแสงธรรมชาติในห้องพักผู้ป่วยสูงอายุชาวไทย โดยได้ทำการศึกษาห้องพักผู้ป่วย ที่มีช่องเปิดในทิศเหนือ ตะวันออก ใต้ และตะวันตก ร่วมกับการทดสอบรูปแบบแผงกันแดด 7 รูปแบบ เพื่อทดสอบปริมาณแสงธรรมชาติที่เกิดขึ้นในห้องพักผู้ป่วยสูงอายุ ซึ่งประกอบด้วยปัจจัย 2 ปัจจัย ได้แก่ 1) ปริมาณความส่องสว่าง (Illuminance) (ในช่วงท้องฟ้าแบบโปร่ง) จำลองโดยใช้โปรแกรม DIALux Evo โดยทดสอบในช่วงเวลา 8.00–18.00 น. และ 2) ปริมาณพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) จำลองผลโดยใช้โปรแกรม Autodesk Insight 360 (ตลอดทั้งปี) ผลการศึกษาสรุปได้ว่ารูปแบบแผงกันแดดที่เหมาะสมสำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุ คือ รูปแบบแผงกันแดดที่ 1 (แผงกันแดดแนวนอนยื่น 1.5 เมตร) สำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุที่หันไปในทิศเหนือและทิศใต้ และรูปแบบแผงกันแดดที่ 6 (แผงกันแดดแนวนอนและแนวตั้งยื่น 2 เมตร) เหมาะสมสำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุที่หันไปในทิศตะวันออกและทิศตะวันตก

คำสำคัญ: แผงกันแดด, โรงพยาบาล, แสงธรรมชาติ

Abstract

The purpose of this research is to investigate the effect of characteristics of daylighting technique on amount of daylight in a patient room of Thai elderly. The study explored a patient room with an opening facing the North, East, South, and West. There were seven types of shading façades to be explored. The amount of daylight in the patient room were collected with two dependent factors, which are 1) illuminance level (using DIALux Evo program) and 2) spatial Daylight Autonomy (using Autodesk Insight 360 program). The results of the study concluded that a suitable facade for Thai elderly patient room was the first shading option (horizontal overhang 1.5 m above the opening) for elderly patient rooms facing North and South and the 6th shading option (sun shade vertically and horizontally with 2 meters long for each member) is suitable for elderly patient rooms facing East and West.

Keywords: Daylighting, Hospital, Shading facades

คำนำ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยได้เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุหรือ Aging Societyโดยสมบูรณ์ เมื่อประชากรมีอายุมากขึ้น การเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลก็จะมากขึ้นตามไปด้วยจากโรคตามวัยต่างๆ ทั้ง โรคติดต่อและไม่ติดต่อ อัตราการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลของคนไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมากและ กลุ่มผู้สูงอายุ 60 ปีขึ้นไปอัตราการป่วยสูงที่สุด นอกจากนี้จำนวนวันที่นอนในโรงพยาบาลยังมีอัตราเฉลี่ยสูงกว่าประชากรวัยอื่น ทำให้ในระหว่างพักรักษาในโรงพยาบาล ผู้ป่วยสูงอายุจึงมีแนวโน้มที่จะมีความวิตกกังวลและเครียดมากกว่าวัยอื่นๆ นอกจากนั้นด้วยอายุและข้อจำกัดในการขยับร่างกาย ผู้ป่วยสูงอายุจึงมีโอกาสน้อยลงในการลดความเครียดผ่านการเปลี่ยนพื้นที่หรือพักผ่อนนอกห้องพักผู้ป่วย การออกแบบพื้นที่ห้องพักและบริเวณโดยรอบจึงมีส่วนช่วยในการลดความเครียดและวิตกกังวลสำหรับผู้ป่วยสูงอายุ จากการรวบรวมเอกสารพบว่า แสงธรรมชาติมีส่วนสำคัญในการช่วยลดความเครียดและวิตกกังวลของผู้ป่วย แสงธรรมชาติภายในห้องพักผู้ป่วยจะส่งผลโดยตรงต่อนาฬิกาชีวภาพ และ จังหวะรอบวันของผู้ป่วย ที่จะส่งผลถึงการพักผ่อนและกิจวัตรประจำวันของผู้ป่วย (กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ, 2560) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ป่วยสูงอายุซึ่งมีข้อจำกัดมากขึ้น ทำให้การใช้เทคนิคแสงธรรมชาติที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ

การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคแสงธรรมชาติที่เหมาะสมต่อปริมาณแสงธรรมชาติในห้องพักผู้ป่วยสูงอายุชาวไทยตามค่ามาตรฐานความส่องสว่างและพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นต้นแบบห้องพักผู้ป่วยสูงอายุที่มีรูปแบบเทคนิคแสงธรรมชาติที่เหมาะสมในแง่การใช้แสงธรรมชาติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดต่อการปรับใช้ในห้องพักผู้ป่วยในโรงพยาบาลหรือพื้นที่ลักษณะใกล้เคียง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบเทคนิคแสงธรรมชาติต่อปริมาณแสงธรรมชาติภายในห้องพักผู้ป่วยสูงอายุ จะมีการทดสอบ2ส่วนได้แก่ ได้แก่ การทดสอบค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) และ ทดสอบค่าปริมาณการส่องสว่าง (Illuminance) เพื่อนำมาวิเคราะห์ จะมีการใช้โปรแกรม Revit 2020 เพื่อทำห้องจำลองและ นำห้องจำลองดังกล่าวมาวิเคราะห์ในโปรแกรม Autodesk Insight 360 เพื่อทดสอบค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) และ DIALux Evo เพื่อทดสอบค่าปริมาณความส่องสว่าง (Illuminance)

วิธีการ

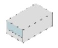
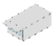
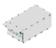
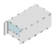
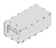
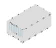
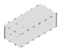
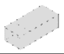
ขั้นตอนที่1 : ทบทวนวรรณกรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ใน7 หัวข้อ ได้แก่ 1. ผู้ป่วยสูงอายุในโรงพยาบาล 2. พื้นฐานการออกแบบห้องพักผู้ป่วยและห้องพักผู้ป่วยสูงอายุ 3. ทฤษฎีแสงธรรมชาติและผลกระทบต่อมนุษย์ 4. มาตรฐานความส่องสว่างและเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับผู้สูงอายุ 5. พืชพรรณและผลกระทบต่อมนุษย์ 6. ความวิตกกังวลในผู้ป่วยสูงอายุ 7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 2: ศึกษา พิจรณา รูปแบบเทคนิคแสงธรรมชาติที่เป็นไปได้ จากตัวอย่างอาคารสถานพยาบาลที่มีการใช้เทคนิคแสงธรรมชาติในรูปแบบต่างๆทั้งในประเทศและต่างประเทศ สำหรับการนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) และ ค่าปริมาณความส่องสว่าง (Illuminance) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรดังนี้

ตัวแปรต้น

ตัวแปรต้นในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 1 ปัจจัย ได้แก่ รูปแบบของเทคนิคแสงธรรมชาติที่ใช้กับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุ 7 รูปแบบ ดังนี้ โดยแบ่งเป็นรูปแบบที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย 4 รูปแบบ (รูปแบบที่ 1, รูปแบบที่ 3, รูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่ 6) รูปแบบที่เกิดจากสมมุติฐาน 3 รูปแบบ (รูปแบบที่ 2, รูปแบบที่ 5 และรูปแบบที่ 7) และมีการเปรียบเทียบกับไม่มีการใช้เทคนิคแสงธรรมชาติ 1 รูปแบบ รวมทั้งหมดเป็น 8 รูปแบบที่แสดงดัง Table 1

Table 1 Selected Daylighting Techniques

Option	Daylighting Techniques	*Model*
Option 0	Without sunshade	
Option 1	Horizontal overhang 1.5 meters above the opening	
Option 2	Horizontal overhang 1.5 meters above the opening with 0.3x0.02 meters of facades	
Option 3	1.0 meters of vertical sunshade	
Option 4	Sunshade vertically and horizontally with 1 meter long for each member	
Option 5	0.25x0.025 meters of vertical facades	
Option 6	Sunshade vertically and horizontally with 2 meters long for each member	
Option 7	Sunshade vertically and horizontally with 2.5 meters long for each member	

ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่ 1) ค่าปริมาณความส่องสว่าง (Illuminance) โดยใช้เกณฑ์ WELL V.2 ที่กำหนดค่าที่ 300 ลักซ์ขึ้นไป และ 2) ค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้เกณฑ์ WELL V.2 โดยกำหนดค่าที่เป็นเกณฑ์โดยใช้ (spatial Daylight Autonomy, sDA) ค่าที่ 300 ลักซ์มีระยะเวลาที่ 50% ของชั่วโมงทำงาน ได้มีพื้นที่เกิน 55% (Protzman, 2013)

ขั้นตอนที่3 : ทำการจำลองแสงธรรมชาติในในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากรูปแบบเทคนิคแสงธรรมชาติที่กำหนดกรณีศึกษาเป็นห้องพักผู้ป่วยขนาด 4.5 × 8 เมตร (ห้องพักผู้ป่วยเดี่ยว) ความสูง 3 เมตร และ กำหนดให้ห้องพักผู้ป่วยมีช่องเปิดเป็นระบบโครงสร้างผนังกระจกเปิดโล่ง ขนาด หันไปทางด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตกของอาคาร โดยกำหนดระดับการการใช้งานที่ทำการศึกษา (Working Plane) 0.75 เมตรจากระดับพื้น โดยในการทดสอบค่าปริมาณการส่องสว่าง (Illuminance) จะทดสอบด้วย DIALux Evo (Nurrohman et al., 2021) โดยจำลอง ณ วันที่ 21 มีนาคม (Vernal Equinox) 21 มิถุนายน (Summer Solstice) วันที่ 21 กันยายน (Autumnal Equinox) และ 21 ธันวาคม (Winter Solstice) โดยจำลองตั้งแต่ 8.00–18.00 น. และการทดสอบค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) จะทดสอบด้วยโปรแกรม Autodesk Insight 360 (Francisco Javier et al., 2020)

ในการสรุปการศึกษาครั้งนี้จะเลือกเทคนิคแสงธรรมชาติที่ก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีอยู่ในช่วงเกณฑ์ค่าความส่องสว่างในช่วง 300 lux แต่ไม่เกิน 1300 lux (เนื่องจากเป็นช่วงที่ก่อให้เกิดความรู้สึกกับผู้ป่วยที่ไม่แตกต่างกัน) และเทคนิคแสงธรรมชาติที่ดีที่สุดคือรูปแบบที่มีค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอสูงที่สุด

ผลการศึกษา

ผลการวิจัยแบ่งเป็น2ส่วนได้แก่ ค่าปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยตลอดปี (Illuminance) และค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) โดยแบ่งตามทิศทั้งหมด4ทิศ ได้แก่ ทิศเหนือ(North) ทิศตะวันออก (East) ทิศใต้(South) และทิศตะวันตก (West) ดังนี้

ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยตลอดปี (Illuminance)

ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยตลอดปี (Illuminance) จากเทคนิคแสงธรรมชาติแต่ละรูปแบบ ชี้ให้เห็นว่า สำหรับห้องพักผู้ป่วยในทิศเหนือ ทิศตะวันออก ทิศใต้ และทิศตะวันตก เมื่อห้องพักผู้ป่วยติดตั้งแผงกันแดดในรูปแบบที่3 (แผงกันแดดแนวตั้งยื่น1เมตร) ก่อให้เกิดค่าปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยตลอดปี (Illuminance) สูงที่สุด ที่ 998 lux, 4,398 lux, 2,738 lux และ 4,041 lux ตามลำดับ และ การติดตั้งแผงกันแดดในรูปแบบที่7 (แผงกันแดดแนวนอนและแนวตั้งยื่น2.5 เมตร) ก่อให้เกิดค่าปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยตลอดปี (Illuminance) ต่ำที่สุดที่ 198 lux, 1,030 lux, 243 lux และ 772 lux ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยต่อปีของรูปแบบอื่นๆ และ รูปแบบเทคนิคแสงธรรมชาติที่ผ่านเกณฑ์ปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยที่ 300–1300 lux สำหรับทิศเหนือได้แก่ รูปแบบที่ 1–5 ทิศตะวันออก ได้แก่ รูปแบบที่ 6 และรูปแบบที่ 7 ทิศใต้ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 6 และทิศตะวันตก ได้แก่ รูปแบบที่ 6 และรูปแบบที่ 7

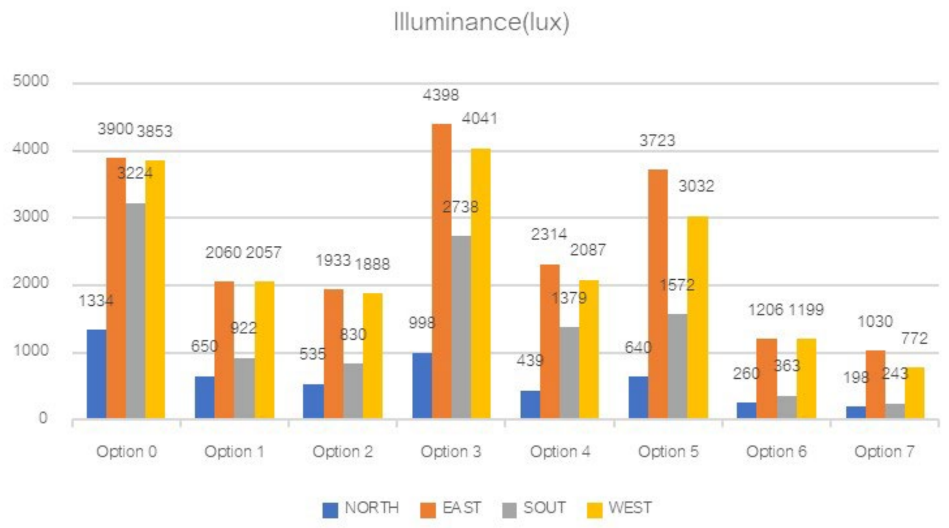


Fig.1 Annual Average Illuminance Simulation Results

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy)

ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial daylight autonomy) จากเทคนิคแสงธรรมชาติแต่ละรูปแบบ ชี้ให้เห็นว่าเมื่อห้องพักผู้ป่วยติดตั้งแผงกันแดดในแต่ละทิศจะมีค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอแตกต่างกัน โดยในทิศเหนือและทิศตะวันตก การติดตั้งแผงกันแดดในรูปแบบที่ 3 (แผงกันแดดแนวตั้งยื่น 1 เมตร) ในทิศตะวันออกและใต้ ก่อให้เกิดค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอสูงที่สุดที่ 92% และ 82% ตามลำดับ สำหรับทิศเหนือ และทิศตะวันตก การติดตั้งแผงกันแดดในรูปแบบที่ 7 (แผงกันแดดแนวนอนและแนวตั้งยื่น 2.5 เมตร) ก่อให้เกิดมีค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติ

เพียงพอต่ำที่สุดที่ 59% และ 74% ตามลำดับ สำหรับทิศตะวันออก การติดตั้งแผงกันแดดในรูปแบบที่ 2 (แผงกันแดดแนวนอนยื่น 1.5 เมตร + ระแนงขนาด 0.3×0.02 เมตร ยาวตลอดแนว) แผงกันแดดในรูปแบบที่ 5 (ระแนงกันแดดแนวตั้งขนาด 0.25×0.025 เมตรทุก 0.5 เมตร) และ แผงกันแดดในรูปแบบที่ 7 (แผงกันแดดแนวนอนและแนวตั้งยื่น 2.5 เมตร) ก่อให้เกิดมีค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอต่ำที่สุดที่ 74% และในทิศใต้การติดตั้งแผงกันแดดในรูปแบบที่ 6 (แผงกันแดดแนวนอนและแนวตั้งยื่น 2 เมตร) ก่อให้เกิดค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอ (Spatial Daylight Autonomy) ต่ำที่สุดที่ 56%

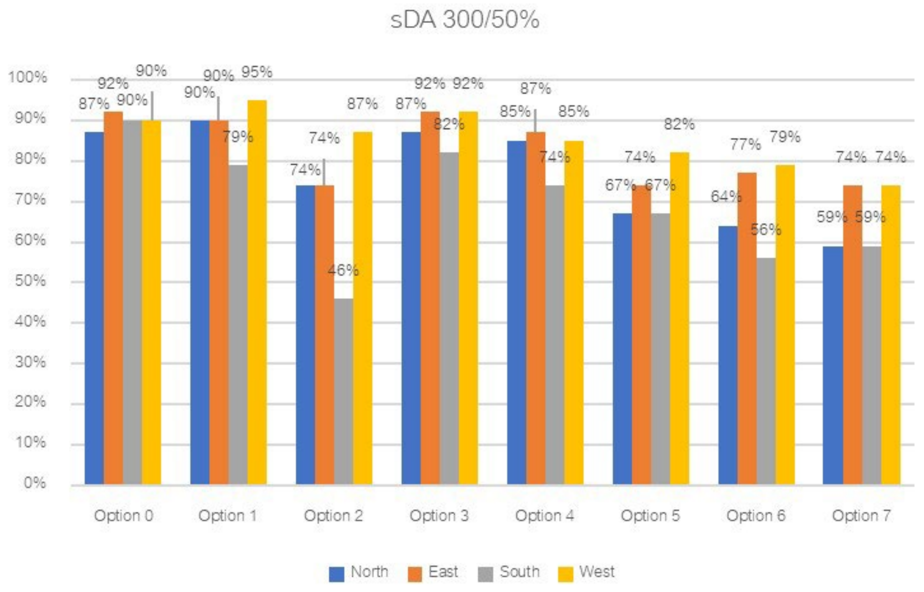


Fig. 2 Spatial daylight autonomy simulation results

สรุปและอภิปรายผล

ในการสรุปการศึกษาครั้งนี้จะเลือกเทคนิคแสงธรรมชาติที่ก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีอยู่ในช่วงเกณฑ์ค่าความส่องสว่างในช่วง 300 lux แต่ไม่เกิน 1300 lux (เนื่องจากเป็นช่วงที่ก่อให้เกิดความรู้สึกกับผู้ป่วยที่ไม่แตกต่างกัน) และเทคนิคแสงธรรมชาติที่ดีที่สุดคือรูปแบบที่มีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีอยู่ในช่วงดังกล่าว และมีค่าพื้นที่ที่แสงธรรมชาติเพียงพอที่สูงที่สุด ซึ่งรูปแบบที่ดีที่สุดจะสรุปในแต่ละทิศ โดยสามารถสรุปได้ดังแสดง Table 2

Table 2 Passed Daylighting Techniques Option

Window Facing	Passed Illuminance (300-1300 lux)					Best Option (Highest sDA)
North	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Option 1 (90%)
East	Option 6	Option 7				Option 6 (77%)
South	Option 1	Option 2	Option 6			Option 1 (79%)
West	Option 6	Option 7				Option 6 (79%)

จากตารางดังกล่าวสามารถสรุปรูปแบบเทคนิคแสงธรรมชาติที่เหมาะสมในแต่ละทิศได้ดังนี้

• รูปแบบแผงกันแดดที่ 1 (แผงกันแดดแนวนอนยื่น 1.5 เมตร) สำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุที่หันไปในทิศเหนือและทิศใต้

• รูปแบบแผงกันแดดที่ 6 (แผงกันแดดแนวนอนและแนวตั้งยื่น 2 เมตร) เหมาะสมสำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุที่หันไปในทิศตะวันออกและทิศตะวันตก

รูปแบบเทคนิคแสงธรรมชาติทั้ง 7 รูปแบบก่อให้เกิดการเข้าถึงของแสงธรรมชาติที่แตกต่างกัน โดยเฉลี่ยทั้งปีสูงกว่ามาตรฐาน 300 lux ทั้งหมด โดยที่รูปแบบแผงกันแดดยื่นแนวนอนด้านบนของช่องเปิดจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันแดดมากกว่าแผงกันแดดแนวตั้ง และค่าปริมาณการส่องสว่างเฉลี่ยตลอดปี (illuminance) จะสูงที่สุดในทิศตะวันออก จากการศึกษาวิเคราะห์ผลพบว่าแผงกันแดดที่เหมาะสมสำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุ คือ รูปแบบแผงกันแดดที่1 (แผงกันแดดแนวนอนยื่น 1.5 เมตร) สำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุที่ที่มีช่องเปิดทางทิศเหนือและทิศใต้ และรูปแบบแผงกันแดดที่ 6 (แผงกันแดดแนวนอนและแนวตั้งยื่น 2 เมตร) เหมาะสมสำหรับห้องพักผู้ป่วยสูงอายุที่มีช่องเปิดทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. นวลวรรณ ทวยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้สนับสนุนงานวิจัย และ ชี้แนะ แบ่งปันประสบการณ์และความรู้เพื่อให้งานวิจัยครั้งนี้สมบูรณ์ และขอขอบคุณทุกท่านที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ, ก. 2560. คู่มือการออกแบบอาคารและสภาพแวดล้อมสถานบริการสุขภาพระดับทุติยภูมิ-ตติยภูมิ ปีงบประมาณ 2560. https://dcd.hss.moph.go.th/web/index.php/works/academic/250-hosp-design-guideline60

คชศิลา, น. 2548. ผลของการใช้โปรแกรมสนับสนุนด้านข้อมูลและอารมณ์ร่วมกับการฝึกผ่อนคลายกล้ามเนื้อและอารมณ์ต่อความวิตกกังวลของผู้ดูแลในครอบครัวของผู้ติดเชื้อเอ็ชไอวีที่มีอาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/8854

คุณากร เอี้ยวสุวรรณ, ก.ต., สุพล ลิมวัฒนานนท์, ธนนรรจ์ รัตนโชติพานิช, วลัยพร พัชรนฤมล, จุฬาภรณ์ ลิมวัฒนานนท์. 2560. สถานการณ์การเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลและการมีผู้ดูแลในขณะพักฟื้นของผู้สูงอายุในประเทศไทย. วารสารวิจัยระบบสาธารณสุข 11.

สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. 2559. คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร (Guidelines for Indoor Lighting Design)

Illuminating Engineering Society of North America. 2016. IESNA Lighting Handbook 9th Edition, Rea, M.S. (Ed.), pp. 1000.

Association, A.P. 2011. The state-trait anxiety inventory (STAI). https://www.apa.org/pi/about/publications/caregivers/practice-settings/assessment/tools/trait-state

Foundation, G.M.H. Anxiety and Older Adults: Overcoming Worry and Fear, https://www.aagponline.org/index.php?src=gendocs&ref=anxiety, 25 February 2023.

Francisco Javier, M.-S., Manuel Jesús, H.-O., Terrados, J. 2020. Sustainability and energy efficiency: BIM 6D.

Study of the BIM Methodology Applied to Hospital Buildings. Value of interior lighting and daylight in energy simulation. Sustainability 12: 5731. doi.org/10.3390/su12145731

Nurrohman, M., Feros, P., Wahyuning, Madina, R., Novianthi Pratiwi, S. 2021. Efficient lighting design for multiuse architecture studio classroom using dialux evo 9. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 738: 012034. doi.org/10.1088/1755-1315/738/1/012034

Persons, D.o.O. 2565. สถิติผู้สูงอายุ สัญชาติไทย และมีชื่ออยู่ในทะเบียนบ้าน มกราคม 2565.

แนวทางการออกแบบด้วยวัสดุและการตกแต่งทางรถไฟยกระดับบริเวณจุดตัดทางรถไฟเหมืองง่า จังหวัดลำพูน

The material and finishing design guidelines of the mueang nga elevated railway, Lamphun Province

กัญญาวีร์ บุญปัญญา[a], กรุณา รักษวิณ[b,*]

Kanyawee Boonpanya[a], Karuna Raksawin[b,*]

[a]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

[b]คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

[a]Graduate School, Chiang Mai University 50200, Thailand

[b]Faculty of Architecture, Chiang Mai University 50200, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: karuna.r@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

การก่อสร้างทางรถไฟยกระดับเพื่อช่วยลดอุบัติเหตุการจราจร ปัจจุบันก่อสร้างด้วยแบบมาตรฐานที่สามารถปรับการใช้งานพื้นที่ใต้ระดับรางรถไฟได้ จากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ดีของประเทศออสเตรเลียเพื่อนำมาปรับใช้กับทางรถไฟยกระดับเหมืองง่า สามารถเสนอเป็นแนวทางการออกแบบ โดยการเพิ่มเส้นทางจักรยานและลู่ทางเดินออกกำลังเพื่อให้คนในชุมชนได้เข้ามาใช้งาน และปรับแต่งภูมิทัศน์ด้วยการปลูกต้นขี้เหล็กซึ่งเป็นต้นไม้หมายเมือง และต้นทองกวาวซึ่งเป็นดอกไม้ประจำจังหวัดลำพูน เพื่อส่งเสริมสภาพแวดล้อมให้ร่มรื่น สวยงาม และลดแสงสะท้อนจากพื้นผิวคอนกรีตของโครงสร้างรางรถไฟ

คำสำคัญ: การตกแต่ง, ทางรถไฟยกระดับ, แนวทางการออกแบบ, วัสดุ

Abstract

Elevated railway construction to help reduce traffic accidents is currently constructed with a standard design that can adjust the space under the railway track. The design guidelines can be proposed from the analysis of the good examples of Australia. The bike lanes and the jogging tracks are provided for the community. The landscape can be customized by planting Cassia, a symbolic tree, and the Thong Kwao tree, Lamphun provincial flower, to promote a shady and beautiful environment. Moreover, the plantings can reduce glare from the concrete surface of the railway structure.

Keywords: Design guidelines, Elevated railway, Finishing, Material

ที่มาและความสำคัญ

การเกิดอุบัติเหตุในบริเวณพื้นที่จุดตัดถนนและทางรถไฟ เกิดจาก 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยกรณีที่เกิดจากพฤติกรรมของคน และปัจจัยกรณีที่เกิดจากอุปกรณ์และเครื่องควบคุม (ไผทชิต เอกจริยกร, 2555; สำนักงานคณะกรรมการสิทธิมนุษยชนแห่งชาติ, 2564; Gilreath and Associates, 2022) การสร้างทางต่างระดับหรือการขุดเจาะอุโมงค์ทางลอดรถไฟ (VicRoads, 1998; เอกจริยกร, 2555; Secretary of Department of Transport, 2020; Metrolink, 2021) เป็นวิธีการจัดการควบคุมทางแยกและจุดตัดถนนกับทางรถไฟที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด (บุญเหาะ และคณะฯ, 2555) จุดตัดรถไฟแยกเหมืองง่า จังหวัดลำพูน เป็นหนึ่งในจุดตัดรถไฟที่มีค่า Traffic Movement (T.M.) มากกว่า 100,000 ที่ต้องสร้างทางต่างระดับ (โสมสุดา และ ณัฐรดา, 2565) จากการศึกษาที่ผ่านมาได้เสนอให้มีการยกระดับรางรถไฟที่แยกเหมืองง่า (Daoreuk, 2559) อนึ่ง การก่อสร้างรางรถไฟยกระดับในประเทศไทยใช้แบบมาตรฐานเหมือนกันทั่วประเทศ ผู้วิจัยได้ค้นหาตัวอย่างที่ดีของการออกแบบรางรถไฟของประเทศออสเตรเลีย (The Victorian Government, 2020) ที่มีคู่มือมาตรฐานการออกแบบที่เป็นการผสมผสานหลักการและแนวปฏิบัติของการออกแบบเมืองและการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผู้คนกับองค์ประกอบต่างๆ ที่ปรากฏอยู่บนพื้นที่เมือง เช่น การเปลี่ยนจุดตัดข้ามรถไฟเป็นทางข้ามยกระดับเป็นโครงการขนาดใหญ่ที่มีโครงข่ายแผ่ทั่วทั้งเมือง หนึ่งในหลักการ คือ การเลือกวัสดุและการตกแต่งที่เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่ ซึ่งมีมาตรฐานได้แก่ การเปิดมุมองพื้นที่ใต้รางรถไฟให้เป็นพื้นที่สาธารณะของชุมชน สนับสนุนโครงข่ายการเดินและการปั่นจักรยาน เอื้อให้ใช้แสงแดดธรรมชาติ และสร้างสรรค์ทัศนียภาพที่ลดความใหญ่และความแข็งของโครงสร้างรางยกระดับ ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดหลักของบทความนี้

Fig. 1 Caulfield to Dandenong Level Crossing Removal Project Melbourne, Australia. (Aspect studios, 2019)

การวิเคราะห์พื้นที่ศึกษา

บริเวณพื้นที่ศึกษาอยู่ในการดูแลของการรถไฟแห่งประเทศไทยซึ่งเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ อยู่ท่ามกลางชุมชนพักอาศัยที่เรียงรายอยู่ริมถนน ดังนั้น หากจะพัฒนาพื้นที่จึงควรคำนึงถึงกิจกรรมและการใช้งานของชุมชน

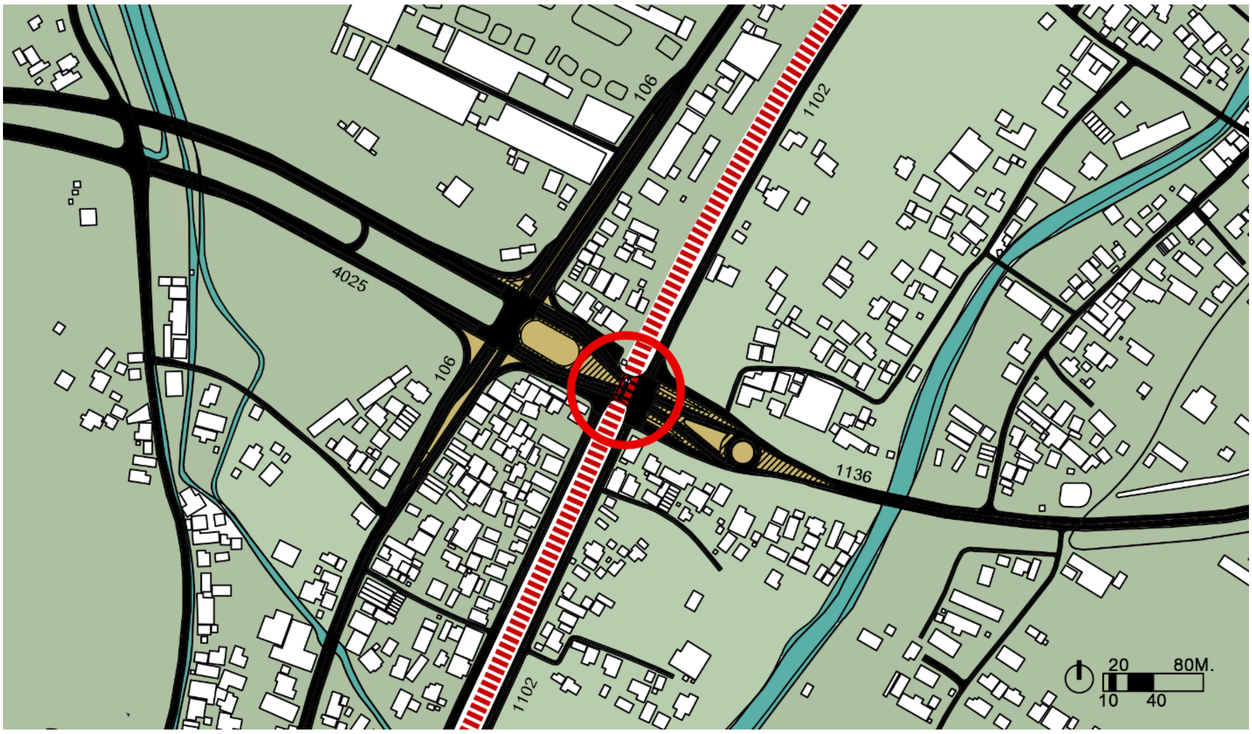


Fig. 2 Built-up area map. The circle display Mueang Nga junction (the intersection of railway and road)

การวิเคราะห์วัสดุและแนวทางการตกแต่งที่เหมาะสมในการออกแบบทางรถไฟต่างระดับ

จากเกณฑ์การเลือกวัสดุและแนวทางการตกแต่งที่เหมาะสมในการออกแบบทางรถไฟต่างระดับของ The Victorian Government (2020) สามารถแบ่งองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ 1) พื้นผิวถนน พื้นผิวทาง 2) รูปแบบสะพานหรือโครงสร้างทางต่างระดับ กำแพงกันเสียง กำแพงกันดิน ฐานราก รั้วระแนง และเครื่องกั้น 3) การจัดรูปที่ดิน การปรับภูมิทัศน์ และการจัดการพื้นที่เปิดโล่ง และ 4) องค์ประกอบอื่นๆ เช่น ป้าย และมีแนวทางการเลือกวัสดุและการตกแต่งได้แก่ 1)สีวัสดุควรส่งเสริมเอกลักษณ์ของท้องถิ่น ดูแลรักษาง่าย และเป็นส่วนหนึ่งของชุมชน 2) วัสดุมีคุณภาพสูง ทนทานคงไว้ซึ่งความงามในทุกยุคทุกสมัย มีวิธีการก่อสร้างที่คงรายละเอียดของพื้นผิว และเป็นวัสดุที่มาจากท้องถิ่น 3) องค์ประกอบภูมิทัศน์มีความเกี่ยวข้องกับท้องถิ่น

แนวทางการออกแบบ

ในการทดลองออกแบบพื้นที่ทางยกระดับรถไฟ ทำให้เกิดพื้นที่โล่งด้านล่าง จึงควรปรับปรุงพื้นที่ให้เป็นประโยชน์ต่อผู้คนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียง เช่น การสร้างทางจักรยาน ทางเดินเท้าออกกำลังกาย สวนสาธารณะแนวยาว พื้นที่พักคอย แม้กระทั่งการปลูกต้นไม้หรือพืชสมุนไพรในชุมชน

วัสดุพื้นผิวทางจักรยานและทางเดินออกกำลัง ควรเป็นวัสดุในท้องที่ที่หาได้ง่าย จากการศึกษาพบว่า ศิลาแลงเป็นหนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่พบมากในจังหวัดลำพูน ซึ่งใช้ในการก่อสร้างกำแพงเมืองและโบราณสถานในอดีตหลายแห่ง (สำนักงานวัฒนธรรมจังหวัดลำพูน, 2556) รวมถึงเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทาน ระบายน้ำได้เร็ว ช่วยลดการขังของน้ำ

บริเวณดังกล่าวได้ พร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ อุปกรณ์เสริมสร้างความปลอดภัยในการใช้พื้นที่ การเพิ่มแสงสว่างในช่วงเวลากลางคืน

สีวัสดุที่เหมาะสมกับบริบทควรเป็นสัจจะวัสดุซึ่งเป็นพื้นผิวพื้นฐานของโครงสร้าง สีของสัจจะวัสดุในท้องถิ่นจะช่วยให้เห็นถึงอัตลักษณ์ของบริบทเมือง ได้แก่ สีเทาของโครงสร้างคอนกรีต สีน้ำตาลจากศิลาแลง สีเขียวจากพืชพรรณธรรมชาติโดยรอบ

หลักเกณฑ์การออกแบบองค์ประกอบภูมิทัศน์ที่มีความเกี่ยวข้องกับพื้นที่และยุทธศาสตร์ของเมือง เช่น การนำต้นไม้มาใช้เป็นการบังสายตา จากประวัติศาสตร์ถนนเชียงใหม่-ลำพูน ต้นขี้เหล็กเป็นต้นไม้ที่ปลูกริมสองข้างทางของจังหวัดลำพูนต่อเนื่องกับแนวต้นยางนาของจังหวัดเชียงใหม่ ต้นขี้เหล็กกลายเป็นไม้หมายเมืองว่าเข้าสู่จังหวัดลำพูน หมายเมืองในที่นี้หมายถึงการระบุเขตแดน ต้นขี้เหล็กมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Senna siamea เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ผลัดใบ สูงประมาณ 8–15 เมตร ออกดอกเป็นช่อสีเหลืองอยู่บริเวณปลายกิ่ง ยอดอ่อน และดอกของต้นขี้เหล็ก สามารถนำมาประกอบอาหารได้ (ระบบจัดการข้อมูลพรรณไม้ในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2563) ต้นขี้เหล็กจะนำมาปลูกเป็นแนวสองข้างถนน (Fig. 4)

ต้นทองกวาวเป็นดอกไม้ประจำจังหวัดลำพูนเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ความสูงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12–18 เมตร มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Butea monosperma (ข้อมูลพันธุ์ไม้, 2560) นำมาปลูกริมรางรถไฟ เพราะต้นทองกวาวมีความสูงพอเหมาะกับการบดบังแสงสะท้อนจากจากโครงสร้างคอนกรีตของทางรถไฟยกระดับ เพื่อไม่ให้รบกวนผู้คนที่อยู่อาศัยโดยรอบรวมถึงให้ร่มเงาแก่ผู้สัญจรและผู้คนที่เข้ามาใช้พื้นที่ด้วย

การป้องกันการทำลายผนังโครงสร้างของฐานรากทางยกระดับ สามารถป้องกันได้โดยปรับแต่งพื้นผิวผนังไม่ให้เรียบเกินไป รวมถึงเพิ่มเติมความสวยงามได้โดยการปลูกต้นไม้เลื้อยเพื่อลดความแข็งกระด้างของเสาหรือฐานรากของโครงสร้างได้

การสร้างรั้วหรือราวกั้นบริบทนี้อาจจะไม่มีความจำเป็นเนื่องจาก พื้นที่ถูกจำกัดและบริเวณศึกษาเป็นเพียงแค่เส้นทางสัญจร ไม่ได้เป็นพื้นที่ตั้งของสถานีรถไฟขนาดใหญ่ การสร้างรั้วหรือราวกั้นเป็นการสร้างมุมอับทางสายตา ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้พื้นที่ได้

ผลการวิจัยและการอภิปราย

ผลการวิจัยสามารถอธิบายตามภาพประกอบ ดังนี้

Existing

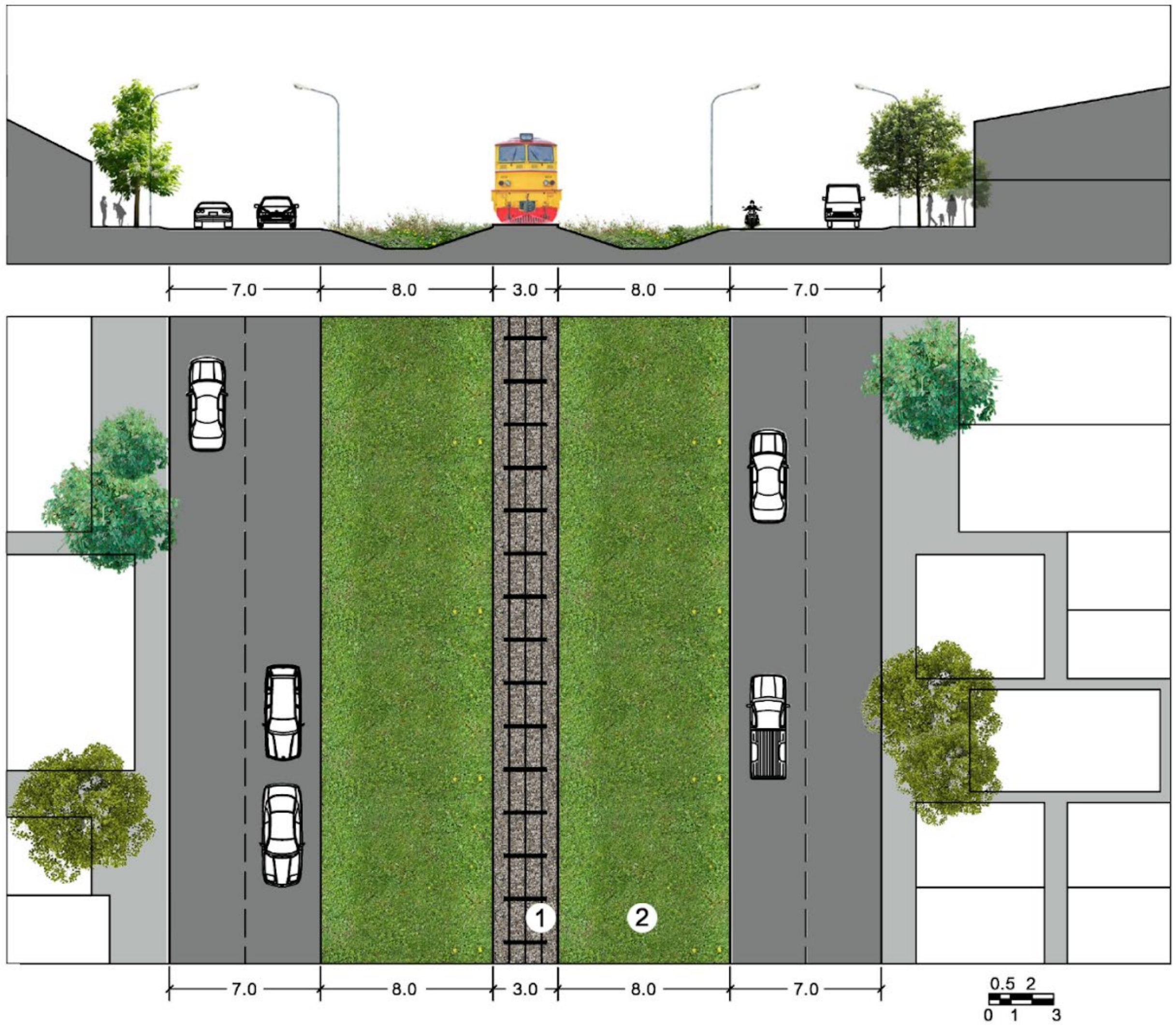


Fig.3 Section and plan of the existing

Fig.3 เป็นภาพจำลองสถานการณ์ปัจจุบัน แสดงเส้นทางรถไฟยังคงใช้งานตามปกติ บริเวณรางรถไฟมีการใช้หินโรยทาง (1) เพื่อกระจายน้ำหนักและช่วยในการระบายน้ำ พื้นที่ด้านข้างรางรถไฟ (2) มีระดับต่ำกว่ารางรถไฟและถนน มีลักษณะเป็นร่องน้ำแบบตื้นและปกคลุมไปด้วยพืชพรรณที่ขึ้นเองตามธรรมชาติ ยังขาดการใช้ประโยชน์สำหรับชุมชน

Proposed Design

Fig. 4 Section and plan of proposed design

Fig. 4 เป็นภาพจำลองแสดงแนวทางการปรับปรุงพื้นที่ที่เกิดขึ้นหลังจากการยกระดับทางรถไฟ โดยสามารถใช้ประโยชน์เพื่อชุมชนและเพิ่มความสวยงามทางด้านทัศนียภาพได้ การปรับเปลี่ยนให้เป็นพื้นที่สาธารณะช่วยเกิดประโยชน์ใช้สอยต่อคนในพื้นที่และบริเวณใกล้เคียง การสร้างกิจกรรม เช่น (1) การเว้นระยะโดยการใช้เส้นทางธรรมชาติหรือเกาะกลางถนนแบบที่มีต้นไม้ที่มีความกว้าง 1 เมตร กั้นระหว่างถนนกับทางจักรยานและทางเดินออกกำลังกาย ซึ่งช่วยลดการเกิดอุบัติเหตุระหว่างคนเดินถนนและรถยนต์ ได้ 50% เมื่อเทียบกับเกาะกลางถนนคอนกรีต (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2562) (2) เส้นทางจักรยานสามารถขี่สวนกันได้ มีขนาดช่องจราจรช่องทางละ 1.8 เมตร (3) ทางเดินออกกำลังกาย เป็นทางตรง ระยะยาว เพื่อสร้างความสม่ำเสมอให้กับอัตราการเต้นของหัวใจ มีความกว้าง 3.4 เมตร (4) ปลูกต้นขี้เหล็กที่เป็นต้นไม้หมายเมือง ริมสองข้างถนน และ (5) ปลูกต้นทองกวาวที่มีความสูงพอเหมาะกับการกันแสงสะท้อนของโครงสร้างคอนกรีตของรางรถไฟและเป็นดอกไม้สัญลักษณ์ประจำจังหวัดลำพูน

สรุปผลงานวิจัย

การยกระดับทางรถไฟเป็นแนวทางการแก้ปัญหาที่ลดอุบัติเหตุบริเวณทางร่วม-ทางแยกที่ตัดระหว่างถนนกับทางรถไฟได้ดีที่สุด และเมื่อทางยกระดับได้รับการออกแบบวัสดุ เพิ่มกิจกรรมสำหรับชุมชน และการตกแต่งด้วยต้นไม้ จะช่วยเพิ่มคุณภาพสิ่งแวดล้อมให้กับชุมชนโดยรอบ ดังกรณีศึกษาของงานวิจัยที่ได้ค้นคว้าแนวทางการออกแบบทางรถไฟยกระดับของประเทศออสเตรเลีย ผู้วิจัยได้วิเคราะห์และปรับใช้หลักเกณฑ์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับพื้นที่ อันได้แก่ 1) ผู้วิจัยได้เสนอให้เพิ่มกิจกรรมเส้นทางจักรยานและเส้นทางเดินออกกำลังกายบริเวณใต้ทางรถไฟเพื่อเพิ่มความมีชีวิตชีวาให้กับชุมชน 2) ผู้วิจัยเลือกศิลาแลงเป็นวัสดุที่ผลิตได้ในจังหวัดลำพูนเป็นพื้นผิวสัญจรหลักที่มีรูพรุนซึ่งช่วยเรื่องการระบายน้ำและมีความแข็งแรงคงทนต่อการใช้งาน 3) ด้านการจัดภูมิทัศน์ ผู้วิจัยได้เลือกต้นขี้เหล็กซึ่งเป็นต้นไม้หมายเมืองปลูกเพื่อให้ร่มเงากับเส้นทางเดินจักรยานและเส้นทางเดินออกกำลังกาย และต้นทองกวาวซึ่งเป็นดอกไม้สัญลักษณ์ประจำจังหวัดลำพูนปลูกเพื่อลดแสงสะท้อนของโครงสร้างคนกรีตของรางรถไฟ สำหรับการวิจัยในอนาคต จะเพิ่มเติมการสอบถามความเห็นของประชาชน ซึ่งเป็นกระบวนการต่อไปหลังจากได้แนวทางการออกแบบที่เหมาะสมกันพื้นที่แล้ว

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2562. คลังความรู้ บทความสิ่งแวดล้อม: ต้นไม้ริมทางมีคุณค่ามากกว่าที่คิด. https://datacenter.deqp.go.th/knowledge/environmentdoc/02th/. 1 ตุลาคม 2565

จริทีปต์ บุญเหาะ, ทัศพร รั่นอรัญ และอธิน ปุณมะลัง. 2555. การศึกษาประเมินประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยกประตู 1 เข้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยสุรนารี.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/5481/5/Fulltext.pdf, 1 ตุลาคม 2565

เพ็ญสุภา สุขคตะ. ปริศนา “ต้นยางนา”จาก“ไม้หมายเมือง”สู่ “ถนนเชียงใหม่-ลำพูน” (ตอนที่ 2). https://www.m-culture.go.th/lamphun/ewt_news.php?nid=246&filename=index. 1 ตุลาคม 2565

ไผทชิต เอกจริยกร. 2555. จุดตัดทางรถไฟ. วารสารราชบัณฑิตยสถาน. http://legacy.orst.go.th/royin2014/upload/246/FileUpload/2900_1668.pdf, 20 กันยายน 2565.

สำนักงานคณะกรรมการสิทธิมนุษยชนแห่งชาติ. 2564. รายงานผลการศึกษากรณีป้องกันและแก้ปัญหาอุบัติเหตุทางรถไฟ. https://www.nhrc.or.th/getattachment/e7983d2e-5300-451a-aa4b-b092d5c297ba/.aspx, 20 กันยายน 2565.

สำนักงานวัฒนธรรมจังหวัดลำพูน. 2556. แหล่งท่องเที่ยวจังหวัดลำพูน. https://www.mculture.go.th/lamphun ewt _news.php?nid=246&filename=index, 30 พฤศจิกายน 2565

โสมสุดา ไกรสิงห์สม, ณัฐรดา ภาวีอัครกุล. 2565. บริเวณทางรถไฟตัดผ่านทางหลวง ที่มีค่า T.M. มากกว่า 100,000. ใน: รายงานสรุปบริเวณ ทางรถไฟตัดผ่านทางหลวง ประจำปี 2564. สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ, หน้า 49

ระบบจัดการข้อมูลพรรณไม้ในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2563. ข้อมูลต้นไม้: ขี้เหล็ก. https://buildings.oop.cmu.ac.th/plant/index.php?op=plants&do=treedetail&treeid=360, 5 ธันวาคม 2565

Aspect studios. 2019. Caulfield to dandenong railway & linear park. https://www.aspect-studios.com/projects/caulfield-to-dandenong-railway-linear-park, 23 January 2023.

Daoreuk Channel. 2559. วิดีทัศน์โครงการศึกษา ออกแบบ รถไฟทางคู่ ช่วงเด่นชัย - เชียงใหม่ ประกอบสัมมนาครั้งที่ 3. https://www.youtube.com/watch?v=dY-YxSnuYIc, 5 ธันวาคม 2565

Gilreath & Associates. 2022. Railroad accidents: common causes, statistics and prevention. https://www.sidgilreath.com/learn/railroad-accidents-causes.html, 1 October 2022.

The Victorian Government. 2020. Urban design framework: Principles & objectives, measures & qualitative benchmarks. https://bigbuild.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0011/635771/LXRP-Urban-Design-Framework-v5-October-2020.pdf, 10 October 2022.

การประเมินตรอกทางเดินเชื่อมซอยมะยมสู่ถนนข้าวสารด้วยแบบสำรวจการออกแบบสภาพแวดล้อมเพื่อการป้องกันอาชญากรรม

The assessment of pedestrian way from mayom alley to khaosan road by the evaluation forms of crime prevention through environmental design

ธญา วุฒิมานพ[a], **กรุณา รักษวิณ**[b,*]

Thaya Wuttimanop[a], Karuna Raksawin[b,*]

[a]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

[b]คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

[a]Graduate School, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

[b]Faculty of Architecture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: karuna.r@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบแบบประเมินการออกแบบสภาพแวดล้อมเพื่อการป้องกันอาชญากรรมที่ปรับมาจากต้นฉบับที่จัดทำโดยหน่วยงาน National Crime Prevention Council (NCPC) ประเทศสิงคโปร์ ผู้เขียนได้เลือกกรณีศึกษาเป็นทางเดินเชื่อมซอยมะยมสู่ถนนข้าวสาร ผลของการทดสอบพบว่าแบบทดสอบสามารถเสนอแนวทางการออกแบบสภาพแวดล้อมเพื่อการป้องการอาชญากรรมได้ ด้วยการนำเสนอเป็นภาพจำลองการปรับปรุงสภาพแวดล้อมที่เปรียบเทียบกับสภาพปัจจุบันร่วมกับการอธิบายการประเมิน

คำสำคัญ: การออกแบบสภาพแวดล้อมเพื่อการป้องกันอาชญากรรม, ถนนข้าวสาร, ทางเดิน

Abstract

This article is aimed to test the checklists of design of a crime prevention through environmental design that adapted from the checklists of the National Crime Prevention Council (NCPC), Singapore. The author has chosen the pedestrian way from Soi Mayom to Khaosan Road. The results of the test showed that the results from the adapted evaluation form can offer guidelines for designing an environment for crime prevention by presenting the simulated pictures of the improvement of the environment compared to the current condition along with the explanation of the assessment.

Keywords: CPTED, Khaosan Road, Pedestrian

ที่มาและความสำคัญ

ถนนข้าวสารเป็นสถานที่ท่องเที่ยวที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ (มติชน, 2561; PPTV, 2565) และทางรัฐยังเล็งเห็นถึงความสำคัญของถนนข้าวสาร จึงได้มีโครงการพัฒนาปรับปรุงพื้นที่ถนนข้าวสารครั้งใหญ่ในปี พ.ศ. 2561 (ฝ่ายโยธาธิการ สำนักงานเขตพระนคร, 2561) แต่หนึ่งในปัญหาสำคัญของถนนข้าวสารคือ ปัญหาด้านความปลอดภัย จากงานศึกษาคดีอาชญากรรมในเขตพระนคร พบว่าถนนข้าวสารเป็นหนึ่งในบริเวณที่มีอัตราการเกิดคดีอาชญากรรมหนาแน่นโดยเฉพาะในช่วงเวลากลางคืน (มณฑล เยี่ยมไพศาล และมานัส ศรีวณิช, 2553; ธงไทย ไพเราะ และจอมเดช ตรีเมฆ, 2562) จากข้อมูลข้างต้นสามารถแก้ไขและป้องกันได้ด้วยการออกแบบสภาพแวดล้อมทางกายภาพ (CPTED) ซึ่งเป็นหลักคิดที่นำมาใช้ออกแบบสภาพแวดล้อมเพื่อลดปริมาณอาชญากรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก (Cozens and Love, 2015) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในชุมชน ตามท้องถนน และในบ้านแต่ละหลังได้ เช่น การจัดตำแหน่งทรัพย์สินที่ผู้อื่นสามารถสังเกตได้ง่าย การแยกพื้นที่สาธารณะและพื้นที่ส่วนตัว และการจำกัดการเข้าถึง

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ทดสอบแบบประเมินการออกแบบสภาพแวดล้อมเพื่อการป้องกันอาชญากรรมที่ปรับมาจากต้นฉบับที่จัดทำโดยหน่วยงาน National Crime Prevention Council (NCPC) ประเทศสิงคโปร์ เพราะประเทศสิงคโปร์มีสภาพภูมิอากาศคล้ายคลึงกับประเทศไทยและมีแนวคิดการพัฒนาโครงข่ายเส้นทางเดินเท้าซึ่งเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของถนนข้าวสาร จากการสำรวจพื้นที่ถนนข้าวสาร ในช่วงเวลากลางคืนถนนข้าวสารทั้งเส้นจะถูกปิดการจราจรห้ามไม่ให้รถยนต์ผ่าน การเข้าถึงพื้นที่จึงถูกจำกัดด้วยการเดินเท้าเป็นหลัก ผ่านเส้นทางที่มีลักษณะเป็นซอยเล็กแคบ Fig. 1 เป็นภาพแสดงเส้นทางที่ประชาชนใช้เดินสัญจรจากป้ายรถประจำทางเพื่อลัดเลาะเข้าสู่ถนนข้าวสาร ซึ่งสภาพแวดล้อมของเส้นทางเหล่านี้ มีความเสี่ยงต่อการเกิดอาชญากรรม เช่น ไฟส่องสว่างไม่เพียงพอเท่าที่ควร และผนังเต็มไปด้วยร่องรอยการขูดขีดเขียน (Fig. 2) บทความนี้ได้เลือกเส้นทางเดินที่สั้นที่สุด ดังแสดงใน Fig. 3 เพื่อเป็นกรณีศึกษา

Fig. 1 General orientation of the studied area (Khaosan Road).

Fig. 2 The location and scenery of routes to Khaosan Road.

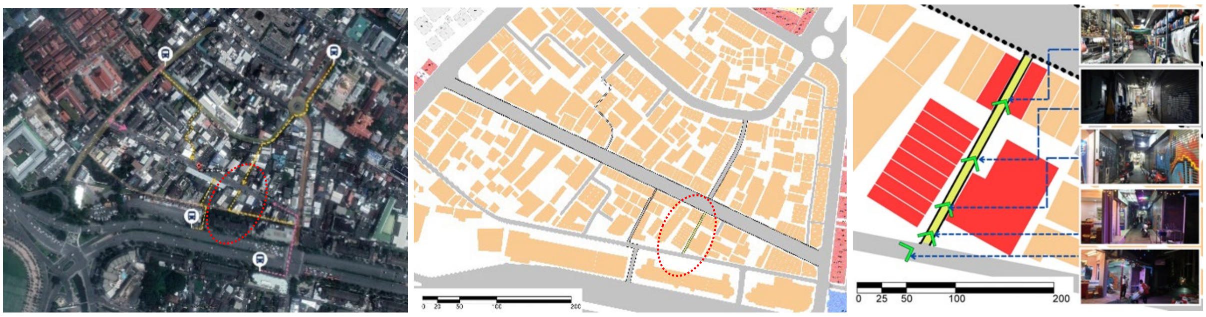


Fig. 3 Built-up area and the existing scenes

แบบสำรวจการป้องกันอาชญากรรม

ประเทศสิงคโปร์มีคณะกรรมการเพื่อป้องกันการเกิดอาชญากรรม หรือ The National Crime Prevention Council (NCPC) ตั้งขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 หน่วยงานข้างต้นได้จัดทำ The Crime Prevention Through Environmental Design (CPTED) Guidebook ในปี ค.ศ. 2003 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบให้กับผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง โดยเน้นให้บุคคลทั่วไปสามารถใช้ได้ ใน Guidebook ดังกล่าว มีการอธิบายหลักการออกแบบเพื่อความปลอดภัยเบื้องต้น และมีแบบสำรวจพร้อมใช้ ซึ่งผู้วิจัยได้ปรับหัวข้อการประเมินให้เข้ากับบริบทของพื้นที่ศึกษา แบ่งออกเป็น 6 หัวข้อ ได้แก่ (1) ทัศนวิสัยและไฟส่องสว่าง (2) ความเป็นเจ้าของและการบำรุงรักษา (3) พื้นที่กิจกรรม (4) จุดอับสายตาและจุดเชื่อมต่อ (5) ป้ายบอกทาง ข้อมูล และศูนย์ให้ความช่วยเหลือ และ (6) การออกแบบสภาพแวดล้อม ก่อนนำไปใช้สำรวจพื้นที่

การสำรวจและเก็บข้อมูลในพื้นที่ศึกษา

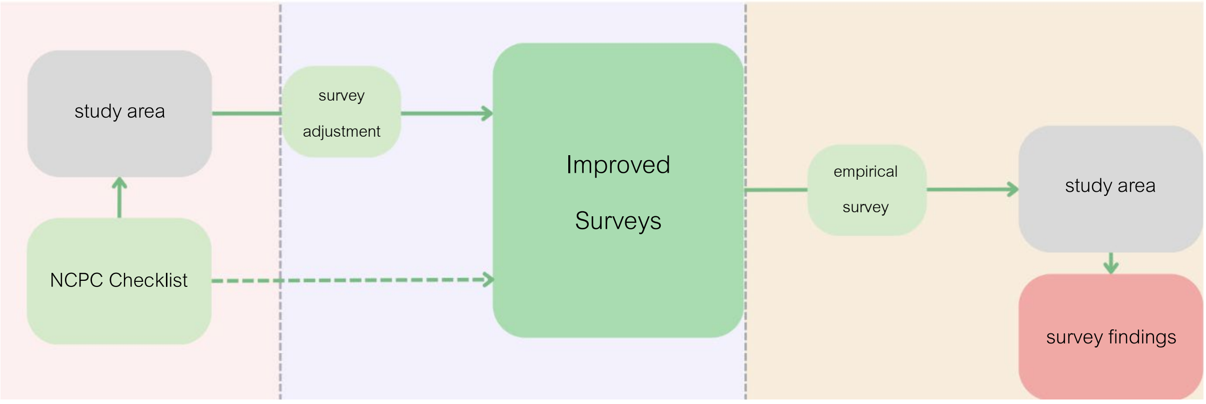


Fig. 4 Procedures for investigating problems in the study area

หลังจากการเลือกพื้นที่ศึกษาและการพัฒนาแบบสอบถามด้วยการนำแบบ Checklist ของ NCPC เข้าไปประเมินพื้นที่ศึกษาด้วยตัวเอง จากนั้นจึงปรับแบบ Checklist ให้เข้ากับบริบทของถนนข้าวสาร จากนั้นผู้วิจัยจึงทดสอบ

แบบสอบถาม โดยผลของแบบสอบถามที่ได้ต้องสามารถเป็นข้อมูลสำหรับการทำแนวทางการออกแบบ (Design Guidelines) ได้ (Fig. 4)

การเลือกช่วงเวลาเพื่อการสำรวจและเก็บข้อมูล

พื้นที่ถนนข้าวสารมีปัญหาด้านความปลอดภัยมากขึ้นในช่วงเวลากลางคืน การเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาจึงเลือกช่วงเวลาตั้งแต่ 19:00 น.–02:00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาทำการของสถานบันเทิง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดอาชญากรรม (ธงไทย ไพเราะ และ จอมเดช ตรีเมฆ, 2562) และหลีกเลี่ยงวันหยุดสุดสัปดาห์ เพราะอาจเกิดกิจกรรมในพื้นที่มากกว่าตามปกติ อาจส่งผลให้การวิเคราะห์พื้นที่ศึกษาคลาดเคลื่อนได้ จึงได้ข้อสรุปว่าจะทำการสำรวจพื้นที่ศึกษาตั้งแต่คืนวันจันทร์ ถึงคืนวันพฤหัส เวลา 19:00 น.–02:00 น.

การออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหา

เมื่อได้ผลลัพธ์จากการสำรวจเชิงประจักษ์แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการออกแบบโดยการเพิ่มเติมสิ่งที่ขาดหายไป ยกตัวอย่างเช่น หากในพื้นที่ศึกษามีแสงสว่างไม่เพียงพอต่อการจดจำใบหน้าบุคคลอื่นได้ในระยะ 10 เมตร การแก้ไขปัญหาคือการเพิ่มแสงสว่างในพื้นที่ศึกษา จากนั้นจึงนำเสนอแนวทางการออกแบบในรูปแบบของการจำลองทัศนียภาพของพื้นที่ศึกษา (Fig. 5)

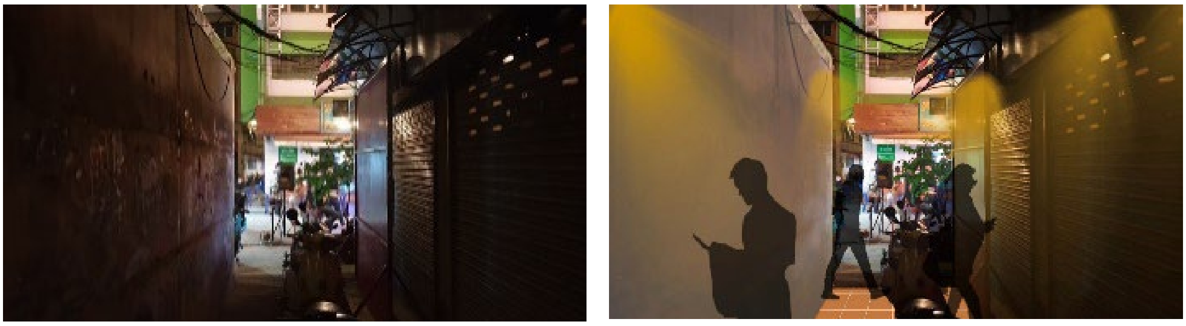
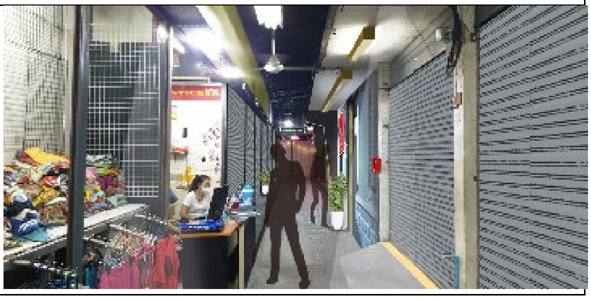


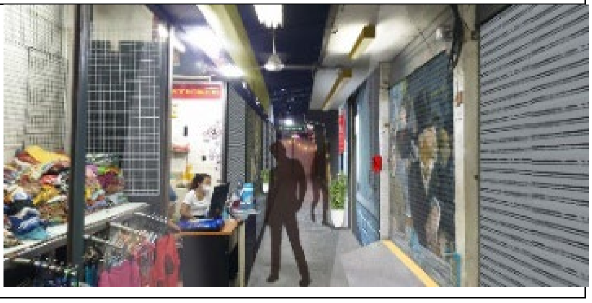
Fig. 5 Before and after design examples

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัย

แบบสำรวจที่ปรับปรุงแล้ว นำมาใช้เพื่อการสำรวจเชิงประจักษ์ในพื้นที่ มีทั้งหมด 6 หัวข้อ ได้แก่ (1) ทัศนวิสัยและไฟส่องสว่าง (2) ความเป็นเจ้าของ และการบำรุงรักษา (3) พื้นที่กิจกรรม (4) จุดอับสายตา จุดเชื่อมต่อ (5) ป้ายบอกทางข้อมูล และศูนย์ให้ความช่วยเหลือ (6) การออกแบบสภาพแวดล้อม โดยผลลัพธ์จากการสำรวจมีดังต่อไปนี้

1. ทัศนวิสัยและไฟส่องสว่าง
1.1 ทางเดินเชื่อมต้องการทัศนวิสัยอย่างชัดเจน สามารถแก้ปัญหาทัศนวิสัย ได้โดยการติดตั้ง กล้องวงจรปิด กระจก การเพิ่มไฟส่องสว่าง หรือองค์ประกอบอื่น ๆ ในหัวข้อการเฝ้าระวังได้ 1.2 การออกแบบอนุญาตให้มีสิ่งขวางกันทัศนวิสัยในอนาคตได้ เช่น การเพิ่มต้นไม้เพื่อความสวยงาม
1.3 ภายในทางเดินเชื่อมมีแสงสว่างไม่เพียงพอต่อการจดจำใบหน้าบุคคลอื่นได้ในระยะ 10 เมตร
1.4 จุดเชื่อมต่อระหว่างทางเดินเชื่อมกับถนนมีแสงสว่างไม่เพียงพอ
1.5 โคมไฟส่องสว่างในทางเดินเชื่อมไม่ได้รับการป้องกันจากการก่อกวน

2. ความเป็นเจ้าของ การบำรุงรักษา การจัดการ	
2.1 กรรมสิทธิ์ที่ดินของพื้นที่เป็นของสำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ 2.2 ทางเดินเชื่อมมีองค์ประกอบการเสริมกำลังอาณาเขต 2.3 ทางเดินเชื่อมไม่ได้รับการบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพดี	
	

3. พื้นที่กิจกรรม	
3.1 ไม่สามารถจัดสรรพื้นที่เพื่อส่งเสริมให้เกิดกิจกรรมภายในทางเดินเชื่อมได้ แต่สามารถเพิ่มองค์ประกอบบางอย่างเพื่อส่งเสริมกิจกรรมภายในทางเดินเชื่อมได้ เช่น ภาพจิตรกรรม	
	

4. จุดอับสายตา จุดเชื่อมต่อ	
4.1 ทางเดินเชื่อมสามารถมองเห็นจุดสิ้นสุดได้ 4.2 ทางเดินเชื่อมมีองค์ประกอบของการเฝ้าระวังไม่ชัดเจน 4.4 จุดเชื่อมต่อระหว่างทางเดินเชื่อมกับถนนมีองค์ประกอบของการเฝ้าระวังไม่ชัดเจน แต่สามารถเพิ่มจุดให้ความช่วยเหลือ เช่น โทรศัพท์ฉุกเฉิน หรือเจ้าหน้าที่ให้บริการได้	

4. จุดอับสายตา จุดเชื่อมต่อ

5. ป้ายบอกทาง ข้อมูล และศูนย์ให้ความช่วยเหลือ

5.1 ภายในทางเดินเชื่อมไม่มีการติดตั้งจุดให้ความช่วยเหลือ เช่น การติดตั้งโทรศัพท์ฉุกเฉิน การติดตั้งสัญญาณเตือน หรือป้ายแสดงข้อมูลและเส้นทาง

6. การออกแบบสภาพแวดล้อม

6.1 สภาพแวดล้อมโดยรวม ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัย

6.2 มีพื้นที่สองฝั่งทางเดินเชื่อมที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์

6.3 สภาพแวดล้อมตอนกลางคืนไม่มีความปลอดภัย

6.4 วัสดุที่เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบทางสภาพแวดล้อม ไม่มีส่วนช่วยเพิ่มความปลอดภัย

สรุป

หลังจากที่ได้ทดสอบแบบสำรวจที่ปรับมาจากหน่วยงาน NCPC พบว่า ได้ผลการสำรวจที่สามารถเป็นข้อมูลเพื่อเสนอแนวทางการออกแบบ ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะนำแบบสำรวจนี้ไปใช้กับตรอกซอกซอยอื่น ๆ ที่เป็นทางเดินเชื่อมสู่ถนนข้าวสารเพื่อเสนอเป็นแนวทางการออกแบบให้กับผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องได้นำไปใช้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ธงไทย ไพเราะ, จอมเดช ตรีเมฆ. 2562. การแก้ไขปัญหาการทะเลาะวิวาทด้วยทฤษฎีอาชญาวิทยา: กรณีศึกษาสถานประกอบการบนถนนข้าวสาร. ใน: งานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2562, มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ. หน้า 1357–1366.

ฝ่ายโยธาธิการ สำนักงานเขตพระนคร. 2561. การปรับปรุงพื้นที่ย่านถนนข้าวสาร เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว ตามนโยบายของรัฐบาลและกรุงเทพมหานคร. สำนักงานคณะกรรมการข้อมูลข่าวสารของราชการ http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER3/DRAWER074/GENERAL/DATA0001/00001976.PDF, 5 เมษายน 2565.

มณฑล เยี่ยมไพศาล, มานัส ศรีวณิช. 2552. ความหนาแน่นเชิงพื้นที่อาชญากรรม กรณีศึกษาเขตพระนคร กรุงเทพมหานคร ศึกษาตามแบบเคอร์เนล. JARS. 2553: 87–102. doi.org/10.56261/jars.v7i1.168915

มติชนออนไลน์. 2561. ข้าวสารคืออัตลักษณ์ท่องเที่ยว กทม.ยอมถอย ผ่อนผัน ขายของบนทางเท้าได้. https://www.matichon.co.th/local/quality-life/news_1080248, 5 เมษายน 2565.

Cozens, P., Love, T. 2015. A review and current status of crimeprevention through environmental design (CPTED). J Plan. Lit. 2015: 1–20.

National Crime Prevention Council (NCPC). 2003. Examples of CPTED strategies applicable to public spaces. The Crime Prevention Through Environmental Design (CPTED) Guidebook, CISCO. Singapore, pp. 20–22.

PPTV Online. 2565. 13 เม.ย. วันเดียว “ถนนข้าวสาร” เงินสะพัด 10 ล้าน. https://www.pptvhd36.com/news/เศรษฐกิจ/170149, 19 เมษายน 2565.

การวิเคราะห์จำนวนอาคารในเขตพื้นที่การอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัยของผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ - สบบง - บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ. 2562

The analysis of the number of buildings in the residential conservation area of the chiang Kham - Sob Bong - Ban Sai community plan, Phayao Province, 2019

อังค์วรา พัวพันธ์รักษกุล[a], **กรุณา รักษวิณ**[b,*]

Aungwara Poupuntarugsagul[a], Karuna Raksawin[b,*]

[a]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

[b]คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

[a]Graduate School, Chiang Mai University 50200, Thailand

[b]Faculty of Architecture, Chiang Mai University 50200, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: karuna.r@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัยของผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ-สบบง-บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ. 2562 กำหนดให้มีการควบคุมกายภาพ ได้แก่ ความสูง รูปแบบสถาปัตยกรรม ความชันหลังคา และสีภายนอกของอาคาร เพื่อการวางแผนของหน่วยงานราชการท้องถิ่น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์จำนวนอาคารปัจจุบันในพื้นที่อนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัย ผลปรากฏว่า มีอาคารทั้งหมดจำนวน 176 หลัง แบ่งเป็นอาคารที่สอดคล้องกับการควบคุมกายภาพจำนวน 4 หลัง และไม่สอดคล้องกับการควบคุมทางกายภาพจำนวน 172 หลัง ในจำนวนนี้มีรูปแบบสถาปัตยกรรมที่ไม่สอดคล้องกับการควบคุมมากถึง 161 หลัง ซึ่งควรเป็นประเด็นเพื่อการวิจัยต่อไป

คำสำคัญ: การอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัย, เชียงคำ, ผังเมืองรวมชุมชน

Abstract

The residential conservation area of the Chiang Kham - Sob Bong - Ban Sai community plan, Phayao Province, 2019, restricts the physical controls, including the height, architectural style, roof slope, and exterior color of the building. For the local government plan, this article aims to analyze the number of current buildings that correspond to the physical control in the residential conservation area. The results reveal a total of 176 buildings divided into four buildings corresponding to physical control and 172 non-compliant buildings. Of these, 161 buildings need to be consistent with the architectural style control. Therefore, it should be an issue for further research.

Keywords: Community Plan, Chiang Kham, Residential Conservation Area

ที่มาและความสำคัญ

กฎกระทรวงให้ใช้บังคับผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ-สบบง-บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ.2562 (ราชกิจจานุเบกษา, 2562) ได้กำหนดพื้นที่สีเหลืองทแยงขาวเป็นการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัย (Fig. 1) โดยกำหนดการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีการควบคุมกายภาพ ได้แก่ 1) การกำหนดการควบคุมความสูงของอาคารไม่เกิน 7 เมตร 2) รูปแบบสถาปัตยกรรมให้เป็นสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมไทย 3) ความลาดชันของหลังคาไม่น้อยกว่า 30 องศา และ 4) สีของอาคารภายนอกให้เป็นสีกลมกลืนธรรมชาติ และกำหนดให้ผู้มีหน้าที่และอำนาจในการควบคุมการก่อสร้างในเขตผังเมืองรวมเป็นผู้พิจารณาปฏิบัติ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับหน่วยงานราชการท้องถิ่นสามารถนำไปใช้เพื่อสนับสนุนกฎกระทรวง การประเมินสถานการณ์ปัจจุบันจึงมีความจำเป็น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์จำนวนอาคารปัจจุบันที่มีความสอดคล้องกับการกำหนดลักษณะอาคารในเขตที่ดินประเภทอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัยเพื่อใช้เป็นประโยชน์ให้กับหน่วยงานราชการท้องถิ่นต่อไป

Fig. 1 The Residential Conservation Area of the Chiang Kham - Sob Bong - Ban Sai Community Plan, Phayao Province, 2019

การกำหนดขอบเขตพื้นที่ดินประเภทอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัย

จากกฎกระทรวงให้ใช้บังคับผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ - สบบง - บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ.2562 กำหนดพื้นที่สีเหลืองมีเส้นทแยงสีขาว ให้เป็นที่ดินประเภทอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัย (Fig. 1) ที่มีขอบเขต ได้แก่ 1) ด้านเหนือ จดทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 1021 ฟากใต้ 2) ด้านตะวันออก จดทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 1148 ฟากตะวันตก 3) ด้านใต้ จดถนนไม่ปรากฏชื่อ ฟากเหนือ และถนนสาย ก 2 ฟากเหนือ และ 4) ด้านตะวันตก จดถนนสิทธิประชาราษฎร์ 3 ฟากตะวันออก พบว่า มีจำนวนอาคารทั้งหมด 176 หลัง

การวิเคราะห์รูปแบบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมไทย

เนื่องจากรูปแบบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมไทยในเมืองเชียงคำยังไม่สามารถสรุปคุณลักษณะหรือส่วนประกอบได้ บทความนี้จึงขออ้างอิงรูปแบบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นจากเทศบัญญัติเทศบาลนครเชียงใหม่ (พ.ศ.2557) ที่ให้ความหมายของอาคารแบบพื้นเมืองภาคเหนือซึ่งมีความใกล้เคียงกับสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ว่าเป็นอาคารที่ได้นำเอาคุณค่าและลักษณะเฉพาะทางสถาปัตยกรรมล้านนาในแต่ละยุคสมัย ดังอาคารต้นแบบ ประเภทคุ้ม สถานที่ราชการ วัด ตลาด เรือนร้านค้า และบ้านในเขตเมืองเก่าเชียงใหม่ มาใช้ในการออกแบบ ก่อสร้างหรือดัดแปลงอาคาร ทั้งในด้านรูปทรงหลังคา สีอาคาร ส่วนประดับตกแต่ง รั้ว กำแพง หรืออื่น ๆ งานวิจัยเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นเชียงคำ สามารถสรุปได้ว่า สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นเชียงคำมีพัฒนาการมาจากสถาปัตยกรรมของชาวไทลื้อ ซึ่งเป็นชาติพันธุ์เดิมของเมืองเชียงคำ

และในเมืองเชียงคำยังคงมีบ้านแม่แสงดา (Fig. 2) ซึ่งเป็นบ้านไทลื้อดั้งเดิมที่ได้รับการอนุรักษ์ บทความนี้จะนำบ้านแม่แสงดาเพื่อเป็นรูปแบบตั้งต้นของวัสดุของอาคาร รูปแบบของหลังคา และ องค์ประกอบของอาคาร ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบต่อไป

Fig. 2 Ruen Tai Lue, Mae Saengda, Chiang Kham District, Phayao Province

ความหมายและลักษณะของสีกลมกลืนธรรมชาติ

สีจากธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น สีที่เกิดจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ปูน ไม้ ดินเผา และ สีที่แต่งเติมไม่ฉูดฉาดสะดุดตา หรือขัดกับบริบท จากกรณีศึกษาการใช้สีธรรมชาติเพื่อกำหนดใช้ในพื้นที่อนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัยของเมืองเกียวโต ใช้ค่าสีตามมาตรฐาน Munsell ซึ่งได้จากการวัดค่าสีจากวัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารในพื้นที่ เช่น ผนังที่ทำจากไม้ที่ปลูกในเมืองเกียวโต หลังคาที่ทำจากกระเบื้องดินเผา และเมืองเชียงใหม่เป็นอีกหนึ่งกรณีศึกษาในภาคเหนือที่กำหนดสีน้ำตาล ครีม ขาว และขาวนวล เป็นสีที่ใช้ได้ในพื้นที่อนุรักษ์ (กัณฉธิป ตันติสิริวัฒน์, 2562) บทความนี้จึงเลือกสีที่เกิดจากวัสดุธรรมชาติ และสีน้ำตาล ครีม ขาว และขาวนวล เป็นสีที่กลมกลืนธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นสีที่จะนำไปเปรียบเทียบกับอาคารปัจจุบันในพื้นที่ศึกษา

วิธีการวิจัย

กระบวนการที่ 1 เก็บข้อมูลจำนวนอาคารในพื้นที่ดินประเภทอนุรักษ์เพื่อการอยู่อาศัยตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงให้ใช้บังคับผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ - สบบง - บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ. 2562 ซึ่งในกระบวนการกำหนดรหัสของอาคารโดยไม่แยกประเภทของอาคาร ในงานวิจัยนี้กำหนดรหัสอาคารเป็นตัวเลขเริ่มจาก 1 ไปจนถึงหลังสุดท้าย ทั้งนี้ การเก็บข้อมูลได้ทำในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2565 ดังนั้น อาคารที่สร้างหลังจากนี้จะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ ทั้งนี้ผู้วิจัยจะบันทึกภาพอย่างน้อยหลังละ 1 ภาพ เพื่อเป็นหลักฐานประกอบการวิเคราะห์ (Table 1)

กระบวนการที่ 2 ประเมินอาคารด้วยการสำรวจในพื้นที่ โดยมีเกณฑ์การประเมินตามกฎกระทรวงให้ใช้บังคับผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ - สบบง - บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ.2562 ได้แก่ 1) ความสูงของอาคารไม่เกิน 7 เมตร 2) รูปแบบสถาปัตยกรรมให้เป็นสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมไทย 3) ความลาดชันของหลังคาไม่น้อยกว่า 30 องศา และ 4) สีของอาคารภายนอกให้เป็นสีกลมกลืนธรรมชาติ ซึ่งผู้วิจัยเป็นผู้ประเมินความสูงและความชันของหลังคาด้วยการเทียบสัดส่วน ประเมินรูปแบบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมไทยจากสถาปัตยกรรมต้นแบบ ได้แก่ บ้าน

แม่แสงดาและตึกแถวในเมืองเชียงใหม่ (กรุณา รักษวิณ, 2558) และประเมินสีภายนอกจากสีของวัสดุก่อสร้างธรรมชาติ (นติสิริวัฒน์, 2562)

ผลการประเมินจะนำเสนอเป็นตาราง ประกอบด้วยรหัสอาคาร รูปภาพอาคาร และตัวอักษร A, B, C, D เมื่ออาคารนั้นสอดคล้องกับเกณฑ์ โดยที่ A หมายถึง ความสูงอาคารไม่เกิน 7 เมตร B หมายถึงอาคารนั้นเป็นสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น/สถาปัตยกรรมไทย C หมายถึงอาคารนั้นมีความลาดชันของหลังคาไม่น้อยกว่า 30 องศา และ D หมายถึงอาคารนั้นมีสีภายนอกที่กลมกลืนกับธรรมชาติ

ผลการประเมิน

ผลการประเมินดังแสดงใน Table 1 มีอาคารทั้งหมด 176 หลัง แสดงผลการประเมินใต้รูปถ่ายของอาคารแต่ละหลัง เรียงลำดับตั้งแต่หลังที่ 1 จนถึงหลังที่ 176 พร้อมกับแสดงผลการประเมิน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ACD	2. AD	3. AD	4. AD	5. AD	6. AD	7. ACD	8. ACD

9. AD	10. AD	11. AD	12. ACD	13. ACD	14. A	15. AD	16. AD

17. ACD	18. AC	19. AD	20. AD	21. AC	22. ACD	23. ACD	24. ACD

25. ACD	26. ACD	27. AD	28. A	29. AC	30. A	31. A	32. ACD

33. ABCD	34. ABD	35. A	36. ACD	37. ABD	38. ACD	39. AD	40. AD

41. AD	42. AD	43. AD	44. ACD	45. AD	46. AD	47. AC	48. ABD

49. AB	50. A	51. AD	52. AD	53. ACD	54. ACD	55. ACD	56. ACD

57. AD	58. ACD	59. ACD	60. ACD	61. ACD	62. AC	63. AC	64. ACD

65. ACD	66. ABD	67. ACD	68. AC	69. AC	70. ACD	71. ACD	72. AD

73. AD	74. ACD	75. ACD	76. ACD	77. ABD	78. ABCD	79. ACD	80. AD

81. ACD	82. ACD	83. ACD	84. AD	85. ACD	86. ABD	87. ACD	88. ACD

89. ACD	90. AD	91. AD	92. AD	93. AC	94. A	95. AC	96. AD

97. AD	98. AD	99. ACD	100. ACD	101. AD	102. AD	103. ABD	104. ABD

105. ACD	106. AC	107. AD	108. ACD	109. ACD	110. ACD	111. AC	112. -

113. ACD	114. ACD	115. AC	116. ACD	117. ACD	118. ABCD	119. ABD	120. AD

121. AB	122. ACD	123. ACD	124. ACD	125. AD	126. ACD	127. AD	128. ACD

129. AD	130. ABCD	131. ACD	132. ACD	133. -	134. ACD	135. D	136. ACD

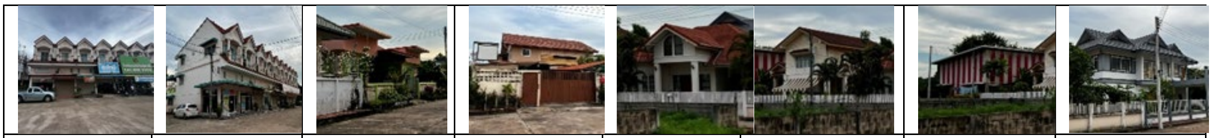
							
137. ACD	138. A	139. ACD	140. ACD	141. ACD	142. A	143. ACD	144. ACD
145. A	146. D	147. D	148. D	149. D	150. A	151. AD	152. ACD
153. ACD	154. ACD	155. ACD	156. AC	157. AC	158. ACD	159. ACD	160. AD
161. D	162. AD	163. D	164. ACD	165. D	166. ACD	167. ACD	168. AD
169. ACD	170. ACD	171. D	172. ACD	173. ACD	174. ACD	175. ACD	176. ACD

Table 1 Evaluation table of all 176 buildings.

จากตารางแสดงรหัสอาคาร รูปภาพอาคาร สามารถระบุได้ว่า A หมายถึง ความสูงอาคารไม่เกิน 7 เมตร มีจำนวน 165 หลัง คิดเป็น 39% B หมายถึงอาคารนั้นเป็นสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น/สถาปัตยกรรมไทย มีจำนวน 15 หลัง คิดเป็น 4% C หมายถึงอาคารนั้นมีความลาดชันของหลังคาไม่น้อยกว่า 30 องศา มีจำนวน 99 หลัง คิดเป็น 23% และ D หมายถึงอาคารนั้นมีสีภายนอกที่กลมกลืนกับธรรมชาติ มีจำนวน 145 หลัง คิดเป็น 34% (Fig. 3)

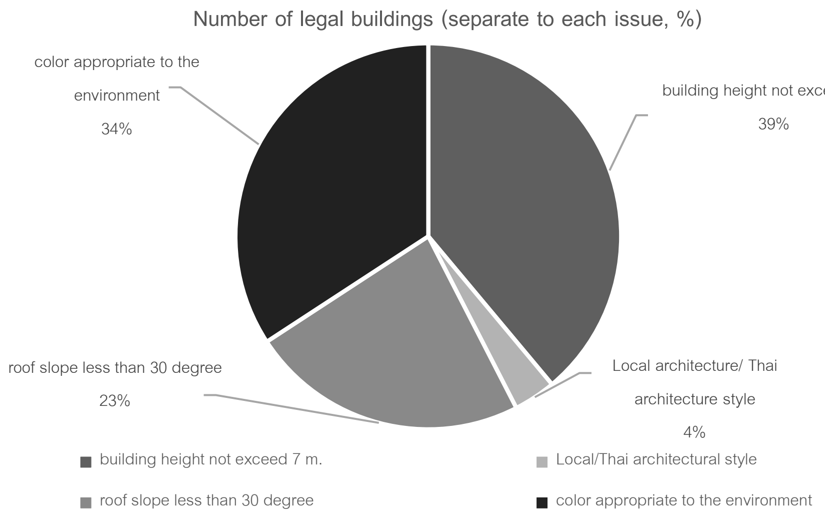


Fig. 3 Showing percentage of legal buildings.

สรุปผลการวิจัย

จากข้อมูลสำรวจอาคารทั้ง 176 หลัง ในขอบเขตพื้นที่ที่กำหนด สรุปได้ว่ามีจำนวนอาคารที่ตรงตามกฎหมายมีจำนวน 4 หลัง คิดเป็น 2% และมีจำนวนอาคารที่ไม่ตรงตามกฎหมายจำนวน 172 หลัง คิดเป็น 98% (Fig. 4) ในจำนวน 172 หลัง ที่ไม่ตรงตามกฎหมายนั้นแบ่งเป็น 1) ความสูงของอาคารเกิน 7 เมตร จำนวน 4% 2) รูปแบบสถาปัตยกรรมไม่เป็นสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมไทย จำนวน 58% 3) ความลาดชันของหลังคาน้อยกว่า 30 องศา จำนวน 27% และ 4) สีของอาคารภายนอกไม่เป็นสีกลมกลืนธรรมชาติ จำนวน 11% (Fig. 5)

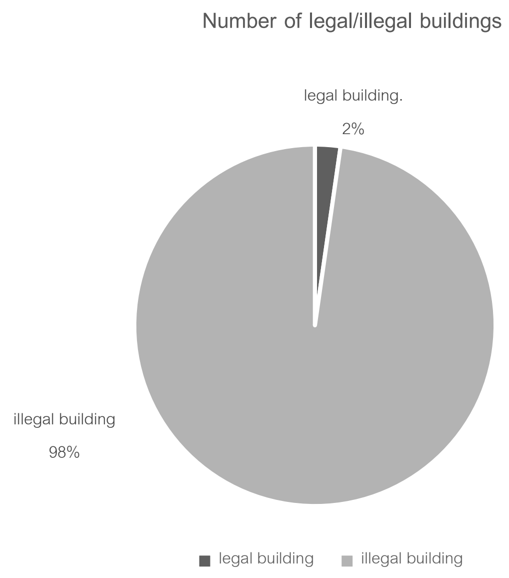


Fig. 4 Showing percentage of legal/illegal buildings.

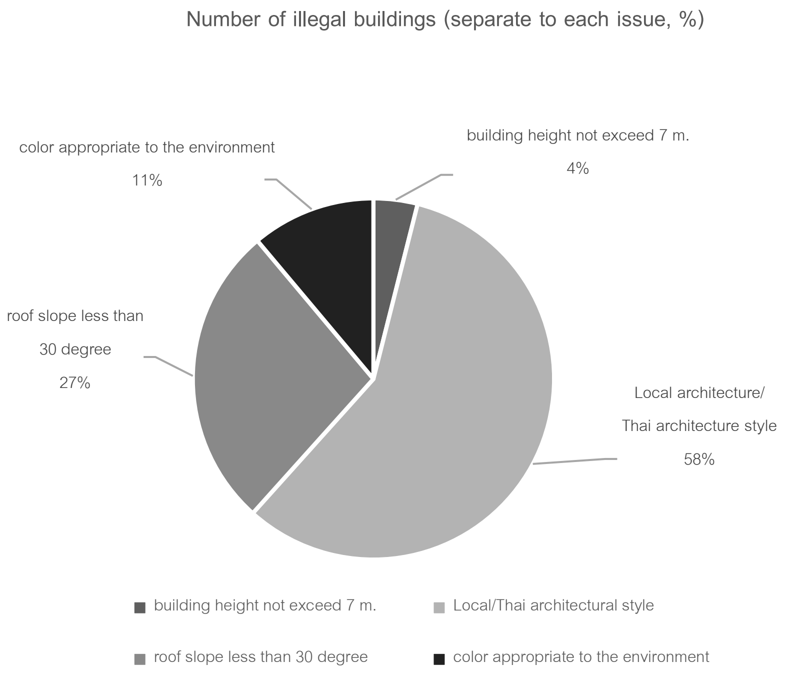


Fig. 5 Number of illegal buildings that separate to the issue of the control.

จากผลการศึกษาสามารถอภิปรายผลได้ว่า อาคารส่วนใหญ่ไม่สอดคล้องกับกฎกระทรวงให้ใช้บังคับผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ - สบบง - บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ.2562 เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาอาคารที่สร้างก่อนการประกาศบังคับใช้ ถึงแม้จะเห็นแนวโน้มของรูปแบบอาคารและประเภทอาคารที่ไม่สอดคล้องตามกฎหมาย หน่วยงานที่รับผิดชอบในการอนุญาตการก่อสร้างควรตระหนักและกำหนดรายละเอียดการออกแบบภายใต้การควบคุมกายภาพ โดยเฉพาะการควบคุมลักษณะสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นหรือสถาปัตยกรรมไทย เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนและส่งเสริมภาพลักษณ์ของพื้นที่ในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กัณณธิป ตันติสิริวัฒน์. 2562. แนวทางในการใช้ระบบสีมันเซลในการควบคุมสีของอาคารในย่านอนุรักษ์เมืองเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

กฎกระทรวง. 2562. ราชกิจจานุเบกษา “เรื่อง ให้ใช้บังคับผังเมืองรวมชุมชนเชียงคำ – สบบง - บ้านทราย จังหวัดพะเยา พ.ศ. 2562”. เล่ม 136 ตอนที่ 125 ก. หน้า 29–31.

กองผังเมืองเฉพาะ กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดพะเยา 2565. https://dpt-web-uat.jigsawgroups.work/th/central, 9 กรกฎาคม 2565

เทศบัญญัติเทศบาลนครเชียงใหม่. 2557. ราชกิจจานุเบกษา เรื่อง กำหนดบริเวณห้ามก่อสร้าง ดัดแปลง หรือเปลี่ยนการใช้อาคารบางชนิดหรือบางประเภทในท้องที่ตำบลศรีภูมิ ตำบลสุเทพ ตำบลช้างม่อย ตำบลพระสิงห์ ตำบลช้างคลานและตำบลหายยาในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ. 2557. 132: 25–33.

การพัฒนาต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขโดยใช้พลาสติกฐานพอลิแล็กติกแอซิด

Development of dog spay clamp prototype from polylactic acid based plastic

มนทัต ท้วมทอง[a], เจดีย์ เต็มวิจิตร[b], ชัยกร ฐิติญาณพร[b], ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ[c], อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล[c,*]

Montud Thoumthong[a], Jedee Temwichitr[b], Chaiyakorn Thitiyanaporn[b], Ratchatee Techapiesancharoenkij[c]
Amornrat Lertworasirikul[c,*]

[a]หลักสูตรเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาเวชศาสตร์คลินิกสัตว์เลี้ยง คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[c]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Industrial Production Technology Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Companion Animals Clinical Sciences, Faculty of Veterinary Medicine, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[c]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengarl@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขถูกพัฒนาขึ้นจากพลาสติกฐานพอลิแล็กติกแอซิด โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบหลอมเหลว (FDM) คอมพาวนด์พอลิแล็กติกแอซิด (PLA)/พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต อะดิเปต (PBSA) ถูกเตรียมโดยเครื่องอัดรีด อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ PBSA ถูกแปรค่าเป็น 10% 20% 30% และ 40% ผลกระทบของรูปแบบการเติม และความหนาแน่นของรูปแบบการเติม ต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานต้นแบบจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติถูกศึกษา แบบจำลองแคลมป์หนีบ 3 มิติได้รับการออกแบบและสร้างด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ (CAD) การกระจายความเค้นภายในต้นแบบถูกศึกษาเพื่อทำนายความล้มเหลวระหว่างใช้งาน

คำสำคัญ: การออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (แคด), เครื่องพิมพ์ 3 มิติ, แคลมป์ทำหมัน, พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต อะดิเปต, พอลิแล็กติกแอซิด

Abstract

Dog spay clamp prototype was developed from polylactic acid-based plastic using fused deposition modelling (FDM) 3D printing technique. Polylactic acid/poly(butylene succinate-*co*-adipate) (PLA/PBSA) compounds were prepared by extruder. Weight percentage of PBSA was varied as 10%, 20%, 30% and 40%. Effect of infill patterns and infill density on mechanical properties of 3D printed phototypes were investigated. The 3D clamp model was designed and created in computer-aided design (CAD) software. Stress distribution in the phototypes was investigated to predict the failure of the clamp during service.

Keywords: Computer-aided design (CAD), 3D Printing, Spay clamp, Poly(butylene succinate adipate), Polylactic acid

คำนำ

ปัญหาสุนัขจรจัดนับเป็นปัญหาสำคัญระดับต้นๆ ของประเทศ ตามทฤษฎีแล้วการทำหมันให้สุนัขเพศเมียเพียงตัวเดียว จะสามารถลดการเกิดของสุนัขจรจัดได้ถึง 45,000 ตัว (Kuaha, 2018) การผ่าตัดทำหมันสุนัขเพศเมียเป็นวิธีการทำหมันที่มีประสิทธิภาพแต่ใช้เวลานาน (มุสิกานนท์, 2012) เนื่องจากต้องตัดอวัยวะสืบพันธุ์ออกและเย็บด้วยไหม ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จำเป็นต้องทำอย่างพิถีพิถันเพื่อป้องกันการตกเลือด หากมีอุปกรณ์ที่สามารถช่วยในการห้ามเลือดและผูกเนื้อเยื่อหลอดเลือดให้เชื่อมติดกันได้ไปพร้อมกัน จะเอื้อให้การผ่าตัดทำหมันสามารถทำได้สะดวกรวดเร็วและปลอดภัยมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาแคลมป์ช่วยในการทำหมันสุนัข โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตต้องไม่เป็นพิษสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ และหากสามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพจะทำให้ไม่จำเป็นต้องผ่าตัดครั้งที่ 2 เพื่อนำออกและลดปัญหาที่อาจตามมาจากการมีสิ่งแปลกปลอมในร่างกาย พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่แตกสลายได้ทางชีวภาพที่มีการใช้งานด้านการแพทย์อย่างแพร่หลาย (Elsawy et al. 2017, Singhvi et al. 2019) แต่ด้วยสมบัติที่มีความแข็งเปราะจึงจำเป็นต้องผสมกับพลาสติกที่มีสภาพดึงยืดได้สูงเพื่อปรับสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน (Yokohara 2008) พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต อะดิเปตเป็นพลาสติกชีวภาพที่แตกสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูง (Gigli et al. 2016) จึงเหมาะที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เพื่อลดความแข็งเปราะของพอลิแล็กติกแอซิด ด้วยปัจจุบันการพิมพ์ 3 มิติ ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและเป็นวิธีการสร้างต้นแบบที่สะดวกและประหยัดต้นทุน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนการผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต อะดิเปต ที่เหมาะสมต่อการสร้างต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Xu et al. 2020) และศึกษาการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองในระหว่างการใช้งาน โดยจำลองการให้แรงกดขนาดไม่เกิน 10 N เพื่อปิดแบบจำลอง จำลองการให้แรงคืนตัวที่เกิดขึ้นหลังจากแบบจำลองถูกปิดขนาดไม่เกิน 10 N และจำลองการให้ความดันของของเหลวขนาดไม่เกิน 310 mmHg เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงดันของแบบจำลองขณะใช้งานเพื่อหยุดการไหลของของเหลวภายในท่อ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องอัดขึ้นรูป ยี่ห้อ EN Mach Tablet Press
2. เครื่องตัดเลเซอร์ ยี่ห้อ Robotech รุ่น Mini Laser Engraving LRT-2030
3. เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ ยี่ห้อ Xinda รุ่น SHJ-20
4. เครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว ยี่ห้อ Filabot รุ่น EX2
5. เครื่องม้วนเก็บเส้น ยี่ห้อ Filabot รุ่น Spooler
6. ตู้อบสาร ยี่ห้อ Carbolite
7. เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น Sync C200
8. เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H50KS
9. เม็ดพลาสติก พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ของบริษัท NatureWork LLC. Ingeo™ Grade 2003D
10. เม็ดพลาสติก พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต อะดิเปต (PBSA) ของบริษัท PTT MCC Biochem Company Limited Grade FD92PM
11. เส้นพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เชิงพาณิชย์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 mm บริษัท Sync innovation

12. เส้นพลาสติกอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เชิงพาณิชย์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 mm บริษัท Raise 3D

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต อะดิเปต (PBSA)

เตรียมคอมพาวนด์พอลิเมอร์ผสม PLA และ PBSA อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยอบไล่ความชื้นเม็ดพลาสติก PLA และ PBSA ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 15 h และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปเตรียมคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ โดยใช้ความเร็วสกรู 212 rpm ความเร็วสกรูในการป้อนสาร 25 rpm และตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ที่บริเวณส่วนป้อนถึงหน้าดายเป็น 120, 140, 140, 150, 150, 140 ตามลำดับ จากนั้นอัดรีดคอมพาวนด์ลงในน้ำเย็นและตัดเม็ดก่อนนำไปอัดรีดเป็นเส้น

การเตรียมเส้น PLA/PBSA สำหรับการพิมพ์ 3 มิติทำโดยนำเม็ดคอมพาวนด์สูตรต่างๆ ข้างต้นมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 15 h และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น จากนั้นนำคอมพาวนด์ไปอัดรีดเป็นเส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 mm ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 165 °C ความเร็วสกรู 25 rpm ลงในน้ำเย็นแล้วม้วนเก็บ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBSA อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ศึกษาโดยการเตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยอุ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 155 °C เป็นเวลา 15 นาที และอัดด้วยความดัน 15 MPa อุณหภูมิ 155 °C เป็นเวลา15 นาที ปล่อยให้เย็นตัวลง แล้วนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ จากนั้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 5 mm/min โดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) 50,000 N

ชิ้นงานทดสอบเพื่อศึกษาผลของรูปแบบการเติม (Infill patterns) และความหนาแน่นของรูปแบบการเติม (Infill density) ต่อสมบัติเชิงกล เตรียมจากวัสดุที่มีพฤติกรรมทางกลต่างกัน โดยวัสดุที่มีพฤติกรรมแข็งเปราะ ได้แก่ PLA และวัสดุที่มีสภาพดึงยืดได้สูง ได้แก่ ABS ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ถูกเตรียมขึ้นจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยพิมพ์ด้วย Infill patterns ที่ต่างกัน 3 แบบ คือ แบบรวมศูนย์กลาง (Concentric) ตาราง (Grid) และเส้น (Line) (Fig. 1) และแปรค่าความหนาแน่นของโครงสร้างชิ้นงาน (Infill density) เป็น 20%, 60% และ 100% การขึ้นรูปใช้หัวฉีดขนาด 0.4 mm ตั้งค่าอุณหภูมิหัวฉีดและฐานเครื่องพิมพ์ 3 มิติในการพิมพ์ PLA เป็น 200 °C และ 60 °C และการพิมพ์ ABS เป็น 250°C และ 100 °C ตามลำดับ

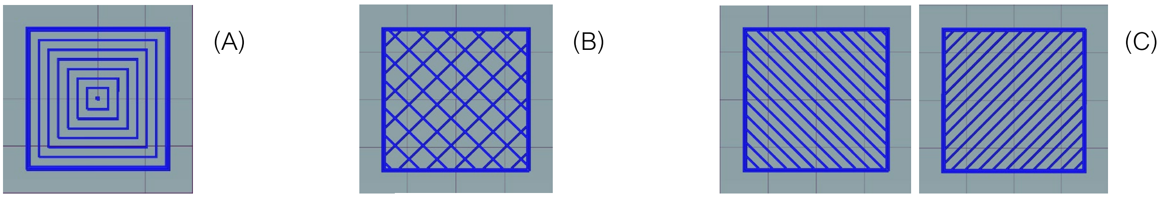


Fig. 1 Variation of infill patterns: (A) Concentric; (B) Grid; (C) Line

การเตรียมต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

นำเส้น PLA/PBSA มาพิมพ์เป็นต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้หัวฉีดขนาด 0.4 mm ตั้งค่าอุณหภูมิหัวฉีดและฐานเครื่องพิมพ์เป็น 200 °C และ 60 °C ตามลำดับ ความหนาแน่นของโครงสร้างชิ้นงานที่ใช้คือ 100% พิมพ์ด้วยรูปแบบการเติมแบบเส้น ด้วยความเร็วหัวฉีด 40 mm/s

การสร้างแบบจำลองแคลมป์ทำหมันสุนัขและการทำนายการกระจายความเค้นภายในแบบจำลองด้วยโปรแกรม CAD

ออกแบบแบบจำลองแคลมป์ทำหมันสุนัขด้วยโปรแกรม CAD แล้วนำแบบจำลองชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาวิเคราะห์การกระจายความเค้นภายหลังจำลองการให้แรงกด แรงคืนตัว และความดันของของเหลวบนแบบจำลองขณะใช้งานโดยบริเวณที่จำลองการให้แรงและความดันมี 3 ตำแหน่ง ดังแสดงใน Fig. 2 ขนาดของแรงกดเพื่อปิดแบบจำลอง (ตำแหน่ง A) และแรงคืนตัวที่เกิดขึ้นหลังจากแบบจำลองถูกปิด (ตำแหน่ง B) ที่ศึกษา ได้แก่ 6, 8 และ 10 N และความดันของของเหลวภายในท่อที่ศึกษา ได้แก่ 103 (2 psi), 206 (4 psi) และ 310 (6 psi) mmHg

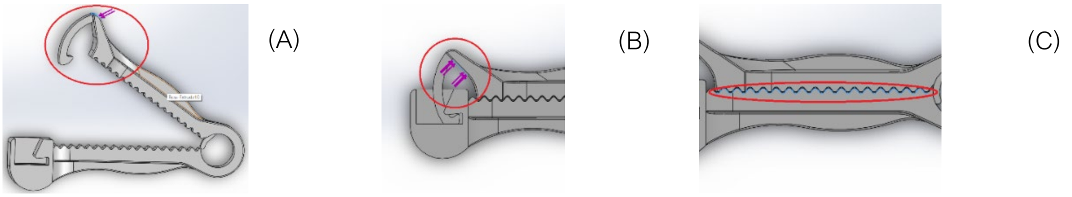


Fig. 2 Positions that (A) simulated compressive force, (B) simulated recovery force and (C) simulated liquid pressure were applied on dog spay clamp model

คำนวณค่าตัวแปรความปลอดภัย (Safety factor) โดยนำค่าความเค้นสูงที่สุดที่ได้จากผลการจำลองการกระจายความเค้น (σ_x) ที่ตำแหน่งต่างๆ มาเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield strength, σ_y) ตาม Equation 1

$$\text{Safety factor} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \qquad (1)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBSA (Fig. 3) แสดงให้เห็นว่าการเติม PBSA ลงในพอลิเมอร์ผสมสามารถช่วยลดปัญหาความแข็งแต่เปราะของ PLA ได้ แต่อย่างไรก็ตามการเติม PBSA ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 มีผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างมาก นอกจากนี้การเติม PBSA ไม่ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีการดึงยืดได้มากขึ้น จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า PLA/PBSA ที่มีอัตราส่วน PBSA ในช่วง 20–30% ส่งผลให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนโดยความต้านทานแรงดึงลดลงไม่เกิน 20% การทดลองนี้จึงเลือกใช้ PLA/PBSA อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 เพื่อศึกษาต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขต่อไป

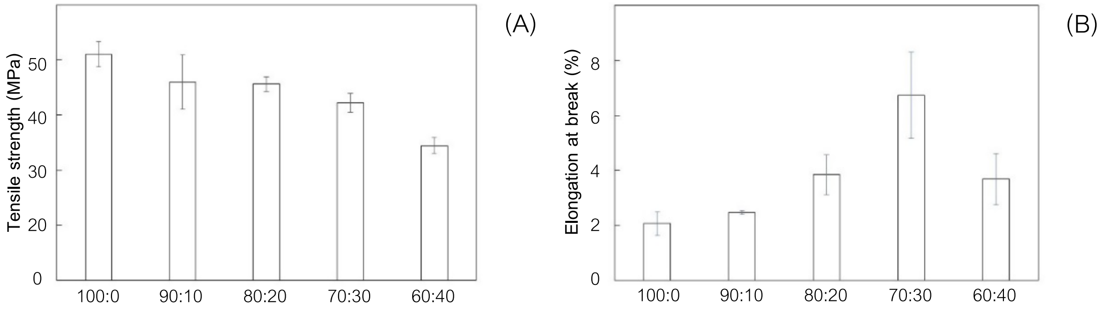


Fig. 3 Mechanical properties of PLA/PBSA blends at PBSA content of 10%wt, 20%wt, 30%wt and 40%wt (A)Tensile strength; (B) Elongation at break

การศึกษาผลของรูปแบบการเติมและความหนาแน่นของรูปแบบการเติมที่มีต่อสมบัติทางกล จะศึกษาทั้งในพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมแข็งเปราะ และพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่น ก่อนนำข้อมูลนี้ไปประยุกต์ใช้กับ PLA/PBSA blends

เพื่อยืนยันว่ารูปแบบการเติมและความหนาแน่นของรูปแบบการเติมแบบต่างๆ ให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน ไม่ขึ้นกับสภาพดึงยืดได้ของวัสดุที่นำมาศึกษา ในการทดสอบนี้ใช้ PLA เป็นตัวแทนพอลิเมอร์แบบแข็งเปราะและใช้ ABS เป็นตัวแทนพอลิเมอร์แบบยืดหยุ่นแทน PBSA เนื่องจาก PBSA บริสุทธิ์มีอุณหภูมิหลอมเหลว (114 °C) ต่ำกว่าขีดจำกัดการให้ความร้อนของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้ในการทดลองนี้ (180 °C) ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูป PBSA เพื่อเป็นตัวแทนของวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นในการทดลองนี้ได้ ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้รูปแบบการเติมและความหนาแน่นของรูปแบบการเติมต่างๆ แสดงใน Fig. 4 (A),(B) ผลที่ได้จากการใช้วัสดุที่มีพฤติกรรมทางกลต่างกันเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือค่าความต้านทางแรงดึง (Tensile strength) มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ Infill density ในส่วนของ Infill patterns การพิมพ์โดยใช้รูปแบบ Concentric ที่ Infill density ต่ำกว่า 100% ชิ้นงานที่ใช้รูปแบบการพิมพ์แบบ Concentric ให้ค่าความแข็งแรงสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ Grid และ Line เนื่องจากวัสดุที่พิมพ์ด้วยรูปแบบ Concentric มีการพิมพ์วัสดุเรียงไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแรงดึง อย่างไรก็ตามร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยรูปแบบการพิมพ์ต่างกันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (Fig. 4 (C),(D)) แต่เมื่อใช้ Infill density 100% ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่พิมพ์เมื่อใช้รูปแบบการพิมพ์ต่างกันมีสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน เนื่องจากการพิมพ์แบบ Concentric วัสดุมีการจัดเรียงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจึงอาจทำให้ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติไม่สม่ำเสมอในแต่ละทิศทาง ในขณะที่ชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยรูปแบบ Grid และ Line มีแนวโน้มให้สมบัติทางกลที่สม่ำเสมอในแต่ละทิศทางมากกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเวลาในการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วย Infill density 20% พบว่าการพิมพ์แบบ Concentric Grid และ Line ใช้เวลาในการพิมพ์ 19.18 min 18.57 min และ 18.54 min ตามลำดับ ซึ่งการพิมพ์แบบ Line ใช้เวลาในการพิมพ์ต่ำที่สุด ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกใช้การพิมพ์รูปแบบ Line โดยใช้ Infill density ที่ 100% เพื่อพิมพ์ต้นแบบ ชิ้นงานต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขที่พิมพ์จาก PLA/PBSA อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 ด้วย Infill density 100% โดยใช้รูปแบบ Line แสดงใน Fig. 5

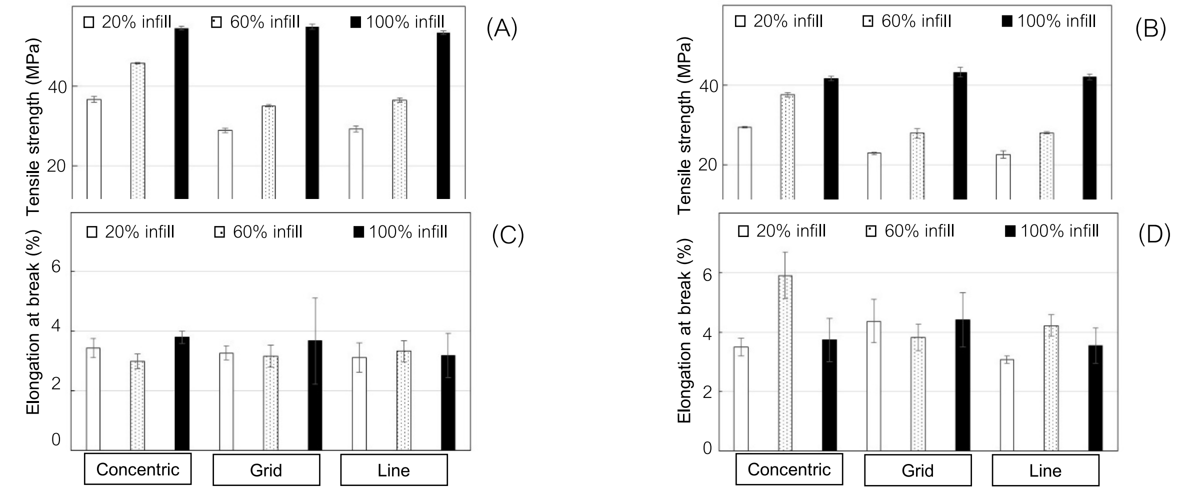


Fig. 4 Mechanical properties of 3D printed PLA and ABS specimens having different infill patterns and infill density. (A) Tensile strength of PLA; (B) Tensile strength of ABS; (C) Elongation at break of PLA; (D) Elongation at break of ABS

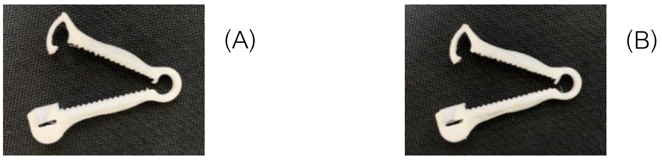


Fig. 5 3D printed dog spay clamp prototypes prepare from PLA/PBSA (A) 80/20; (B) 70/30

จากการศึกษาการกระจายความเค้นภายในแบบจำลองเมื่อจำลองการให้แรงกดเพื่อปิดแบบจำลองขนาด 6–10 N ที่ตำแหน่ง A ใน Fig. 2 พบว่าการให้แรงกดในช่วงขนาดดังกล่าวความเค้นมีการกระจายตัวสูงที่สุดที่บริเวณเดียวกันคือบริเวณวงโค้งของแบบจำลองแคลมป์ทำหมันสุนัข (บริเวณสีแดง Fig. 6A) จากการศึกษาการกระจายความเค้นภายในแบบจำลองเมื่อให้แรงคืนตัวที่เกิดขึ้นหลังจากแบบจำลองถูกปิดแล้ว ขนาด 6–10 N ที่ตำแหน่ง B ใน Fig. 2 พบว่าความเค้นมีการกระจายตัวสูงที่สุดที่บริเวณเขี้ยวล็อคชิ้นงาน (บริเวณสีแดง Fig. 6B) ความเค้นสูงที่สุดที่เกิดขึ้นหลังจากจำลองการให้แรงกดที่ตำแหน่ง A และ B สูงกว่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากส่งผลให้ค่า Safety factor ต่ำกว่า 1 (Fig. 7A–7B) สะท้อนให้เห็นว่าภายหลังจากแคลมป์ถูกปิดแล้ววัสดุจะเกิดการเสียรูปถาวร

จากการศึกษาการกระจายความเค้นภายในแบบจำลองเมื่อจำลองความดันของของเหลวภายในท่อขนาด 102-310 mmHg ที่ตำแหน่ง C ใน Fig. 2 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ครอบคลุมความดันโลหิตของสุนัข พบว่าความเค้นมีการกระจายตัวสูงที่สุดที่บริเวณเดือยท้ายซี่ฟันของแบบจำลองแคลมป์ทำหมันสุนัข (บริเวณสีแดง Fig. 6C) อย่างไรก็ตามภายหลังการรับแรงดันในช่วงดังกล่าว ค่าความเค้นสูงที่สุดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความเค้น ณ จุดครากส่งผลให้ค่า Safety factor มากกว่า 1 (Fig. 7C) ผลการจำลองสะท้อนให้เห็นว่าแคลมป์สามารถทนแรงดันในช่วงดังกล่าวได้โดยไม่เกิดการเสียรูปถาวร

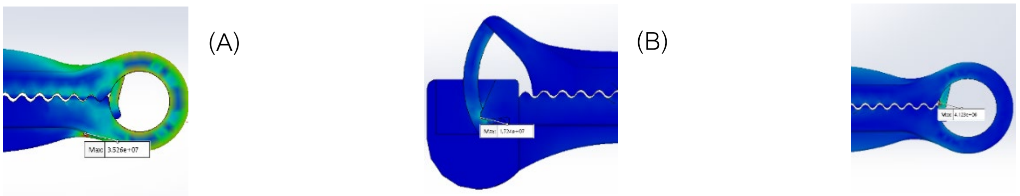


Fig. 6 Simulation of stress distribution in the PLA/PBSA clamp when (A) Force at magnitude of 6 N was simulated to close the clamp; (B) Force at magnitude of 6 N was simulated after the clamp was forced to close; (C) Pressure at magnitude of 102 mmHg was simulated after the clamp was closed

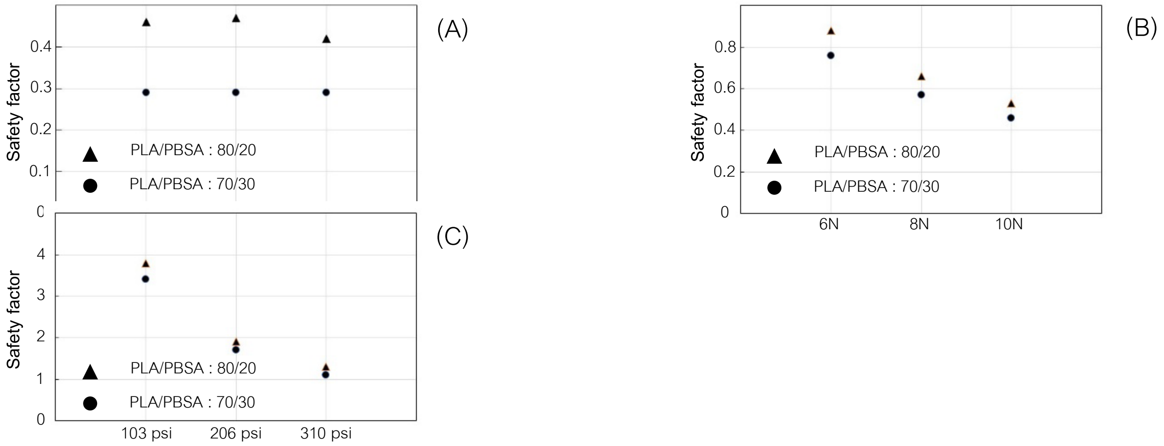


Fig. 7 Safety factor values of PLA/PBSA clamp model when (A) Force at magnitude of 6-10 N was simulated to close the clamp; (B) Force at magnitude of 6-10 N was simulated after the clamp was forced to close; (C) Pressure at magnitude of 102-310 mmHg was simulated after the clamp was closed

สรุป

พอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต อะดิเปต อัตราส่วนการผสม 80/20 และ 70/30 มีร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดที่สูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิด และสามารถขึ้นรูปเป็นต้นแบบแคลมป์ทำหมันสุนัขตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้ ด้วย

เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบหลอมเหลว (FDM) การพิมพ์ด้วย Infill pattern ที่ต่างกันโดยใช้ Infill density 100% ให้ค่าความต้านทานแรงดึงในระดับเดียวกัน แต่ชิ้นงานที่พิมพ์แบบ Line มีแนวโน้มให้สมบัติทางกลที่สม่ำเสมอในแต่ละทิศทาง และใช้เวลาในการพิมพ์ต่ำ จากผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นด้วยโปรแกรม CAD แบบจำลองแคลมป์ทำหมันสุนัขที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มสามารถรับแรงดันของของเหลวขนาดไม่เกิน 310 mmHg ซึ่งครอบคลุมช่วงความดันโลหิตของสุนัขขณะใช้งานเพื่อหยุดการไหลของของเหลวภายในท่อได้ แต่วัสดุมีแนวโน้มเสียรูปถาวรเมื่อใช้งานจากการกดปิดล็อคด้วยแรงขนาด 6 N ขึ้นไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 และทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

Elsawy, M.A., Kim, K., Park, J., Deep, A. 2017. Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites. Renew. Sustain. Energy Rev. 79: 1346–1352.

Gigli, M., Fabbri, M., Lotti, N., Gamberini, R., Rimini, B., Munari, A. 2016. Poly(butylene succinate)-based polyesters for biomedical applications. Eur. Polym. J. 75: 431–460.

Kuaha, Thamonwan. 2018. “ทำความเข้าใจเพื่อมอบความรักให้หมาจรจัด สิ่งมีชีวิตข้างถนนแสนรู้ ที่หากได้รู้จักจะหลงรักไม่รู้ตัว.” A Day BULLETIN (blog). 5 May 2018. https://adaybulletin.com/life-feature-stray-dog/17476.

Singhvi, M.S., Zinjarde, S.S., Gokhale, D.V. 2019. Polylactic acid: Synthesis and biomedical applications. J. Appl. Microbiol. 127: 1612–1626

Xu, Y., Qinghua, M., Xin, J., Feng, L., Jianjun, Y. 2020. Biodegradable scaffolds for urethra tissue engineering based on 3D printing. ACS Appl. Bio Mater. 3: 2007–2016.

Yokohara, T., Yamaguchi, M. 2008. Structure and properties for biomass-based polyester blends of PLA and PBS. Eur. Polym. J. 44: 677–685.

ธีรภาพ มุสิกานนท์. 2012. การทำหมันในสุนัขสำคัญไฉน. Dogilike.Com. 13 June 2012. https://www.dogilike.com/content/vettalk/1359/.

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบอย่างปลอดภัยสำหรับระบบระบายอากาศ

Development of computer-aided safety design for ventilation system

นริศ วิภวศุภกร[a], **ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ**[b,*]

Narit Vipavasupakorn[a], Thongchai Rohitatisha Srinophakun[b,*]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengtcs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาขั้นตอนการคำนวณและออกแบบระบบระบายอากาศ เพื่อลดระดับความรุนแรงและความเข้มข้นของสารเคมีเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานเกิดความปลอดภัย โดยนำหลักการคำนวณและตัวอย่างสมการที่เกี่ยวข้อง เช่น สมการการหาอัตราการไหล การหาความดันเคลื่อนที่ และ การหาความสูญเสียที่ฮูด เพื่อมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องมือด้านดิจิทัลโดยใช้ภาษาไพทอนที่มีความง่ายและรวดเร็วในการพัฒนา โดยนำเสนอในรูปแบบระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ จากกรณีศึกษา เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างผลการคำนวณด้วยมือและผลที่ได้จากโปรแกรมมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในกรณีศึกษาที่ 1 ผลลัพธ์ของ ความเร็วลมในท่อ ความดันเคลื่อนที่ในท่อ และความดันสูญเสียที่ฮูด มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.09%, 0.01% และ 0.24% ตามลำดับ และกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.10%, 0.41% และ 0.58% ตามลำดับ สิ่งที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนคือทศนิยมของตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณและการแปลงหน่วย

คำสำคัญ: ความปลอดภัย, ภาษาไพทอน, ระบบระบายอากาศ, สารเคมี

Abstract

In this study, calculation process and design of ventilation system in the areas with hazardous chemical vapors to reduce the severity and concentration of chemicals to ensure safety for the worker. This study apply the calculation principles and example of related equation such as flow rate equation, velocity pressure equation and duct entry loss equation to be applied with digital tools using the Python language that easy and fast to develop programs, presented in graphical user interface. From the case study found that when comparing the example, the results of hand calculation and the results from the program are slightly different. In 1st case study, the results of duct velocity, velocity pressure and duct entry loss in hood have the percentage error is 0.09%, 0.01% and 0.24%. In 2nd case study, the results of duct velocity, velocity pressure and duct entry loss in hood have the percentage error is 0.10%, 0.41% and 0.58%. The reason for the discrepancy is the decimal used in the calculation and unit conversions.

Keywords: Chemicals, Python, Safety, Ventilation system

คำนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเคมีมีความหลากหลายและสำคัญเป็นอย่างมาก มีการใช้สารเคมีในการะบวนการผลิต ซึ่งเป็นทั้งสารตั้งต้น เป็นสารเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต และเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย สารเคมีเหล่านี้มีคุณสมบัติความเป็นอันตราย มีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษ สามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายช่องทาง เช่น การดูดซึมผ่านทางผิวหนัง การกลืน การฉีด และ การหายใจ ดังนั้นการระบายอากาศจึงเป็นวิธีหนึ่งในการควบคุมการกระจายตัวของสาร ลดความเข้มข้นของสารเคมีที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน (วันทนีย์, 2557) เพื่อไม่ให้สารเคมีเกินค่ามาตรฐานที่ระบุใน American Conference of Governmental Industrial Hygienists

เมื่อนำหลักการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณระบบระบายอากาศ มาใช้ร่วมกับภาษาไพทอนที่ง่ายต่อการศึกษาค้นคว้า ใช้ระยะเวลาในการเขียนโปรแกรมสั้น และนำมาใช้งานได้หลากหลายแล้วจะสามารถพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ และออกแบบระบบระบายอากาศ (Kumar et al., 2001) ที่มีความซับซ้อน ให้มีความสะดวกสบาย ง่ายต่อการใช้งาน ลดระยะเวลาในการคำนวณ (Dols et al., 2012) และนำไปใช้ในการเรียนการสอนได้

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาขั้นตอนการคำนวณและออกแบบระบบระบายอากาศ ตามขั้นตอนเอกสาร Velocity Pressure Method Calculation Sheet ในคู่มือมาตรฐาน Industrial ventilation A manual of Recommended Practice, 23rd ed. และนำมาออกแบบโปรแกรมคำนวณระบบระบายอากาศที่สามารถนำมาคำนวณตามมาตรฐานที่ระบุไว้ (Mahabady et al., 2007) โดยได้ใช้โปรแกรมในการคำนวณกรณีศึกษาทั้งหมด 2 กรณีศึกษา โดยคำนวณตามตัวอย่างในคู่มือมาตรฐาน และ งานวิจัยการออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่เพื่อป้องกันฝุ่นและฟูมที่เกิดขึ้นจากงานเชื่อม (ศุภณัฐ, 2562)

อุปกรณ์และวิธีการ

กำหนดขั้นตอนการคำนวณและสมการที่เกี่ยวข้องกับระบบการระบายอากาศ

ทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการคำนวณของระบบระบายอากาศ เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เช่น ทฤษฎีการไหลของอากาศ ได้อธิบายเกี่ยวกับ ความดันในระบบระบายอากาศไว้ ซึ่งมี ความดันสถิต ความดันเคลื่อนที่และความดันรวม โดยนำมาคำนวณร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์ ที่เกี่ยวข้องกับระบบระบายอากาศ สมการและค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้จากคู่มือ Industrial Ventilation A Manual of Recommended Practice 23rd ed. เช่น มาตรฐานการกำหนดอัตราการไหลและความเร็วลมต่ำสุดที่ต้องการ ขนาดท่อ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียในสล็อตและฮูด เป็นต้น (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1998) คำนวณได้ตามตัวอย่างสมการดังต่อไปนี้

จากความสัมพันธ์ของ อัตราการไหล ความเร็วลมและพื้นที่หน้าตัดของท่อ สามารถคำนวณได้ตามสมการ Equation 1

$$Q = AV \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการไหล (m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)

V คือ ความเร็วลม (m/s)

จากความสัมพันธ์ของ ความดันเคลื่อนที่ และ ความเร็วลม สามารถคำนวณได้ตามสมการ Equation 2

$$VP = \left(\frac{V}{1.29}\right)^2 \quad (2)$$

โดยที่ VP คือ ความดันเคลื่อนที่ (Pa)

V คือ ความเร็วลม (m/s)

จากความสัมพันธ์ของ ค่าความสูญเสียที่ฮูดต่อ VP ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเมื่ออากาศเข้าสู่ฮูด และ แฟกเตอร์ความสูญเสียจากการเร่งความเร็ว สามารถคำนวณได้ตามสมการ Equation 3

$$F = h_e + AF \quad (3)$$

โดยที่ F คือ ความสูญเสียที่ฮูดต่อ VP

h_e คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเมื่ออากาศเข้าสู่ฮูด

AF คือ แฟกเตอร์ความสูญเสียจากการเร่งความเร็ว

จากความสัมพันธ์ของ ความดันเคลื่อนที่ ความสูญเสียที่ฮูดต่อVP และ ค่าความสูญเสียที่ฮูด สามารถคำนวณได้ตามสมการ Equation 4

$$h = F \times VP \quad (4)$$

โดยที่ h คือ ความดันสูญเสียที่ฮูด (Pa)

F คือ ความสูญเสียที่ฮูดต่อ VP

VP คือ ความดันเคลื่อนที่ (Pa)

กำหนดขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม

ดำเนินการพัฒนาโปรแกรมโดยใช้วิธีการคำนวณ ตามเอกสาร Velocity Pressure Method Calculation Sheet จาก คู่มือมาตรฐาน Industrial ventilation A manual of Recommended Practice, 23rd ed. ดังที่แสดงใน Fig 1.

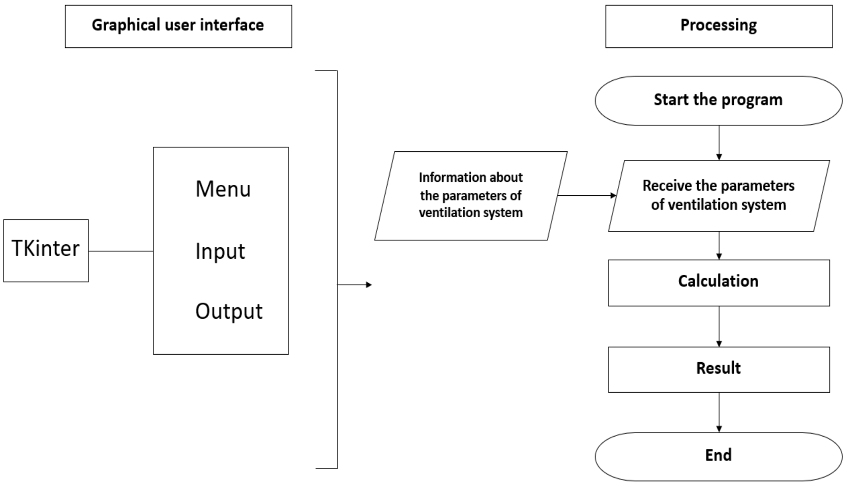


Fig. 1 Calculation methods in graphical user interface for ventilation system

พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษาไพทอน

ภาษาไพทอน (Python) เป็นภาษาโปรแกรมที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานง่าย การแปลงคำสั่งที่เขียนด้วยภาษาไพทอน เป็นการทำงานแบบ Interpret คือ การแปลงคำสั่งทีละบรรทัด เพื่อป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ ชุดเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรมเรียกว่า Integrated Development Environment (ภัทร, 2565) โดยทำการออกแบบโปรแกรมโดยใช้ IDE Jupyter notebook & Python ให้คำนวณและแสดงผลในรูปแบบในระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ (Graphical user interface) ใช้คำสั่ง Tkinter เป็นการนำวิธีการคำนวณและ มาใส่ในโปรแกรม ออกแบบให้

สามารถป้อนข้อมูลเข้าและแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลข (University of Cape Town, 2017) เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากตัวโปรแกรมกับผลการคำนวณมือและผลลัพธ์ในเอกสารคู่มือและมาตรฐานการคำนวณ

ทดสอบการใช้โปรแกรม ประเมินผล และ ดำเนินการแก้ไข

กำหนดกลุ่มตัวอย่างที่จะทดสอบโปรแกรม และ ประเมินผลโดยใช้แบบประเมิน นำผลลัพธ์ที่ได้มาพัฒนา และแก้ไขข้อบกพร่องของตัวโปรแกรม จัดทำรายงานสรุป คู่มือการใช้งานโปรแกรมและข้อแนะนำต่างๆ (มหาศาล, 2564)

ผลและวิจารณ์ผล

เมื่อผู้ใช้งานเริ่มใช้โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง GUI เพื่อดำเนินการป้อนข้อมูลในการคำนวณระบบระบายอากาศ ตามขั้นตอนในเอกสาร Velocity Pressure Method Calculation Sheet โปรแกรมถูกออกแบบมาให้ผู้ใช้งานสามารถคำนวณไปทีละขั้นตอน เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ตัวโปรแกรมจะมีหน้าต่างย่อย ที่สามารถเปิดขึ้นมาได้ โดยการกดปุ่มด้านซ้ายมือของหน้าโปรแกรมหลัก เพื่อปรับแก้ระบบระบายอากาศ เช่น การเปรียบเทียบความดันสถิตระหว่างท่อ การปรับแก้อัตราการไหล ดังที่แสดงใน Fig. 2 โดยผู้วิจัยได้นำโปรแกรมมาทดสอบกับกรณีตัวอย่างทั้ง 2 กรณีดังต่อไปนี้

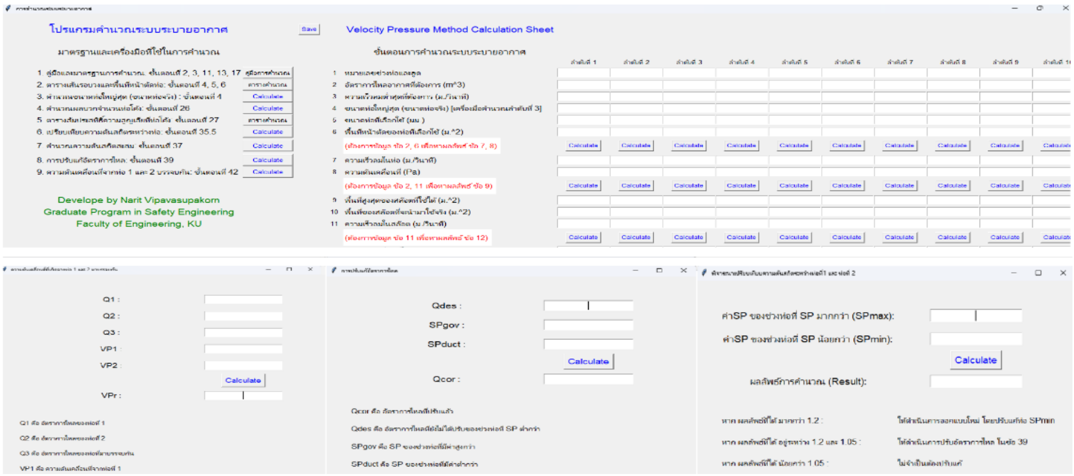


Fig. 2 Graphical user interface for ventilation system

ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1 การคำนวณระบบระบายอากาศจากคู่มือและมาตรฐานการออกแบบ

จาก Fig 3. แสดงถึงระบบระบายอากาศและฮูดสำหรับการดูดฝุ่นผงจากงานเจียร และรายระเอียดมาตรฐานสำหรับการคำนวณในแต่ละองค์ประกอบของระบบระบายอากาศ ดำเนินการออกแบบและคำนวณระบบระบายอากาศโดยกำหนดให้รายระเอียดของระบบระบายอากาศเป็นดังที่แสดงใน Table 1 (วันทนีย์, 2557)

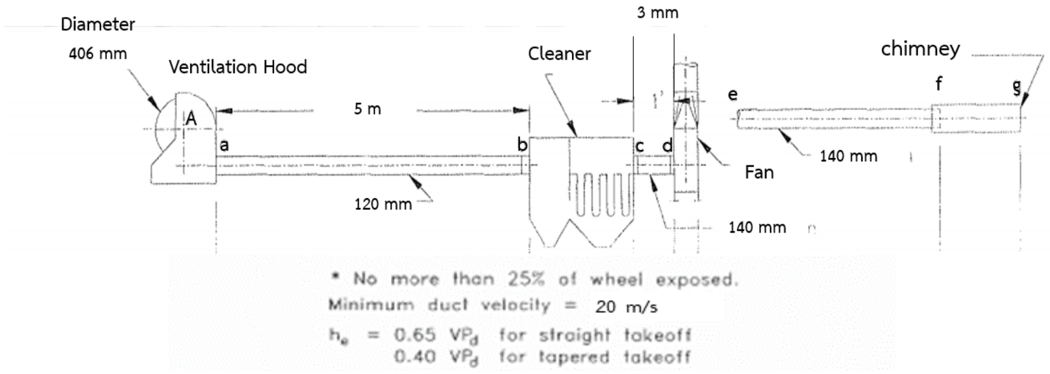


Fig. 3 Design of ventilation system for grinding machine

Table 1 Example of velocity pressure method calculation sheet

1	Duct segment identification	a-c	b-c	c-d	e-f
2	Target volumetric flow rate (m^3/s)	0.25	0.25	0.25	0.25
3	Minimum transport velocity (m/s)	20.0	-	15.0	15.0
4	Maximum duct diameter (mm)	126	-	146	146
5	Selected duct diameter (mm)	120	-	140	140
6	Duct area (m^2)	0.0113	-	0.0154	0.0154
7	Actual duct velocity (m/s)	22.1	-	16.24	16.24
8	Duct velocity pressure (Pa)	294	-	158	158
9	Maximum slot area (m^2)	-	-	-	-
10	Slot area selected (m^2)	-	-	-	-
11	Slot velocity (m/s)	-	-	-	-
12	Slot velocity pressure (Pa)	-	-	-	-
13	Slot loss coefficient	-	-	-	-
14	Acceleration factor	-	-	-	-
15	Slot loss per VP	-	-	-	-
16	Slot static pressure (Pa)	-	-	-	-
17	Duct entry loss coefficient	0.65	-	0.49	-
18	Acceleration factor	1	-	1	-
19	Duct entry loss per VP	1.65	-	1.49	-
20	Duct entry loss (VP)	484	-	236	-
21	Other losses (VP)	-	500	-	-
22	Hood static pressure (VP)	484	500	236	-

ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณระบบระบายอากาศตามคู่มือมาตรฐาน (แสดงตัวอย่างการคำนวณเฉพาะในช่วงท่อ a–b ในขั้นตอนที่ 1–8 และ 17–22)

กำหนดช่วงท่อ a–b ให้มีค่า Target volumetric flow rate เท่ากับ 0.25 m^3/s และ Minimum transport velocity เท่ากับ 20 m/s คำนวณ Duct area ตาม equation 1 เพื่อหา Maximum duct diameter จะได้เท่ากับ 126 mm หา Selected duct diameter จากคู่มือมาตรฐาน ซึ่งจะได้ เท่ากับ 120 mm และ Duct area เท่ากับ 0.0113 m^2 นำ Duct area มาคำนวณหา Actual duct velocity จาก equation 1 จะได้เท่ากับ 22.1 m/s นำ Actual duct velocity ที่ได้ ไปคำนวณหา Duct velocity pressure จาก equation 2 ออกมาเท่ากับ 294 Pa ในส่วนของการคำนวณขั้นตอนที่ 9–16 ถูกข้ามเนื่องจากไม่มีสล็อต ต่อมาใส่ค่า Duct entry loss coefficient ซึ่งได้จากคู่มือมาตรฐาน เท่ากับ 0.65 และ กำหนดค่า Acceleration factor โดยข้อมูลกำหนดให้เท่ากับ 1 คำนวณค่า Duct entry loss per VP โดยนำผลลัพธ์ Duct entry loss coefficient และ Acceleration factor มาคำนวณใน equation 3 ได้เท่ากับ 1.65 นำค่า Duct velocity pressure และ Duct entry loss per VP ที่ได้มาคำนวณใน Equation 4 จะได้ค่า Duct entry loss ซึ่งเท่ากับ 484 Pa โจทย์กำหนดให้ ไม่มี Other losses รวมผลลัพธ์ในข้อ Duct entry loss และ Other losses เข้าด้วยกัน จะได้ผลลัพธ์ของ Hood static pressure ออกมาเท่ากับ 484 Pa

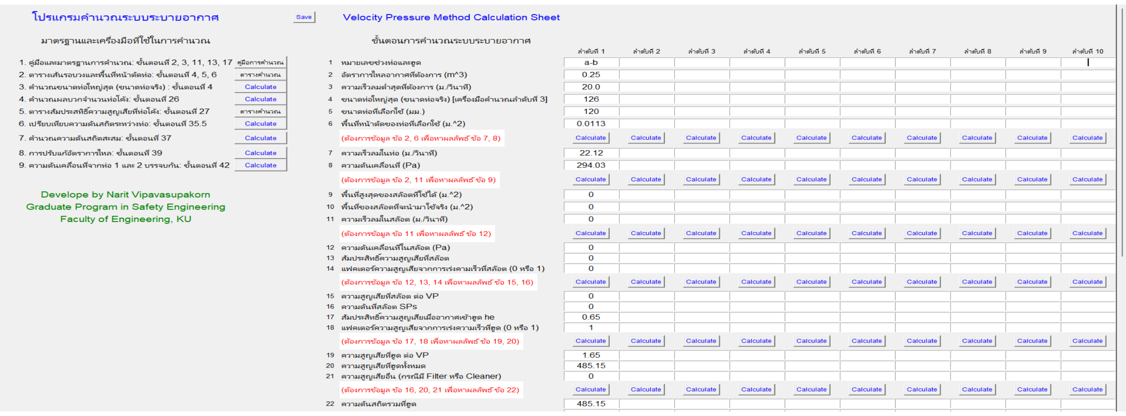


Fig. 4 Example of Graphical user interface for ventilation system

จาก Fig. 4 เป็นการใช้ข้อมูลจากกรณีตัวอย่างป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม ช่วงของท่อลำดับที่ 1 ในขั้นตอนที่ 1 ป้อนข้อมูลช่วงท่อ a–b ขั้นตอนที่ 2 ป้อนข้อมูล Target volumetric flow rate จาก Table 1 ของช่วงท่อ a-b ซึ่งเท่ากับ0.25 m^3/s ขั้นตอนที่ 3 ป้อนข้อมูล Minimum transport velocity เท่ากับ 20 m/s โดยหาได้จากคู่มือมาตรฐานการออกแบบ ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหา Maximum duct diameter ได้โดยใช้เครื่องมือคำนวณลำดับที่ 3 ทางด้านซ้ายมือของโปรแกรม ได้เท่ากับ 126 mm ขั้นตอนที่ 5 และ 6 ป้อนข้อมูล Selected duct diameter และ Duct area ของขนาดท่อนั้น ซึ่งได้จากคู่มือค่ามาตรฐาน จะได้เท่ากับ 120 mm และ 0.0113 m^2 เมื่อกดปุ่ม Calculate ระหว่างขั้นตอนที่ 6 และ 7 จะเป็นผลลัพธ์ออกมาเป็น ค่า Actual duct velocity ในขั้นตอนที่ 7 ได้เท่ากับ 22.12 m/s และ ค่า Duct velocity pressure ในขั้นตอนที่ 8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 294.03 ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 9 ถึง ขั้นตอนที่ 16 ป้อนข้อมูล เท่ากับ 0 เพราะเนื่องจากไม่มีสล็อต ขั้นตอนที่ 17 ป้อนข้อมูล Duct entry loss coefficient ซึ่งได้จากคู่มือค่ามาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 0.65 ขั้นตอนที่ 18 ป้อนข้อมูล Acceleration factor ในตัวอย่างกำหนดให้ป้อนค่า เท่ากับ 1 เมื่อกดปุ่ม Calculate ระหว่างขั้นตอนที่ 18 และ 19 จะเป็นได้ผลลัพธ์ ออกมาเป็น ค่า Duct entry loss per VP ในขั้นตอนที่ 19 ของโปรแกรม ได้เท่ากับ 1.65 และ ค่า Duct entry loss ในขั้นตอนที่ 20 เท่ากับ 485.15 Pa ขั้นตอนที่ 21 ไม่มีค่า Other losses จึงป้อนค่า 0 Pa เมื่อกดปุ่ม Calculate ระหว่างขั้นตอนที่ 21 และ 22 จะได้ผลลัพธ์ ค่า Hood static pressure ในขั้นตอนที่ 22 เท่ากับ 485.15 Pa

นำวิธีการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน มาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนระหว่างผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยโปรแกรมและค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ โดยผลลัพธ์เป็นไปตาม Table 2

Table 2 Calculation results and percentage error of 1st case study in duct segment a–b

Methods calculation	Hand calculation	Program calculation	Percentage error (%)
Maximum duct diameter (mm)	126	126	0.00
Duct area (m^2)	0.0113	0.0113	0.00
Actual duct velocity (m/s)	22.1	22.12	0.09
Duct velocity pressure (Pa)	294	294.03	0.01
Duct entry loss per VP	1.65	1.65	0.00
Duct entry loss (VP)	484	485.15	0.24
Hood static pressure (VP)	484	485.15	0.24

ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 2 การศึกษาและออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่สำหรับเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ (ศุภณัฐ, 2562)

จากกรณีศึกษา เป็นการออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่ เพื่อป้องกันฝุ่นและฟูมที่เกิดขึ้นจากงานเชื่อมโดยใช้โปรแกรม SolidWorks Simulations 2018 ตัวอย่างการคำนวณระบบระบายอากาศและแปลงผลลัพธ์เป็นหน่วย SI unit เป็นดังที่แสดงใน Table 3

เมื่อดำเนินการคำนวณด้วยมือและป้อนข้อมูลลงในโปรแกรมตามวิธีในกรณีศึกษาที่ 1 จะได้ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ผลลัพธ์จากการคำนวณมือ และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เป็นไปตามที่แสดงใน Table 4

Table 3 Example of velocity pressure method calculation sheet

1	Duct segment identification	a-c	b-c	c-d	e-f	12	Slot velocity pressure (Pa)	-	-	-	-
2	Target volumetric flow rate (m^3/s)	6.08	6.29	12.38	12.38	13	Slot loss coefficient	-	-	-	-
3	Minimum transport velocity (m/s)	15.24	15.24	15.24	15.24	14	Acceleration factor	-	-	-	-
4	Maximum duct diameter (mm)	-	-	-	-	15	Slot loss per VP	-	-	-	-
5	Selected duct diameter (mm)	610	610	800	800	16	Slot static pressure (Pa)	-	-	-	-
6	Duct area (m^2)	0.292	0.292	0.5	0.5	17	Duct entry loss coefficient	0.35	0.35	0.35	-
7	Actual duct velocity (m/s)	20.84	21.55	24.72	24.72	18	Acceleration factor	1	1	1	-
8	Duct velocity pressure (Pa)	261.54	278.98	368.65	368.65	19	Duct entry loss per VP	1.35	1.35	1.35	-
9	Maximum slot area (m^2)	-	-	-	-	20	Duct entry loss (VP)	353.71	376.12	495.69	-
10	Slot area selected (m^2)	-	-	-	-	21	Other losses (VP)	-	-	-	-
11	Slot velocity (m/s)	-	-	-	-	22	Hood static pressure (VP)	353.71	376.12	495.69	-

Table 4 Calculation results and percentage error of 2^{nd} case study in duct segment a-b

Methods calculation	Hand calculation	Program calculation	Percentage error (%)
Maximum duct diameter (mm)	-	-	-
Duct area (m^2)	0.292	0.292	0.00
Actual duct velocity (m/s)	20.84	20.82	0.10
Duct velocity pressure (Pa)	261.54	260.48	0.41
Duct entry loss per VP	1.35	1.35	0.00
Duct entry loss (VP)	353.71	351.65	0.58
Hood static pressure (VP)	353.71	351.65	0.58

จากกรณีศึกษาทั้ง 2 กรณี เมื่อป้อนข้อมูลตัวแปรต่างๆ เข้าโปรแกรมคำนวณระบบระบายอากาศ โปรแกรมจะนำตัวแปรเหล่านี้ไปแทนค่าในสมการและทำการคำนวณผลลัพธ์ ซึ่งการคำนวณพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยมือ จากการคำนวณในคู่มือมาตรฐาน และการคำนวณในกรณีศึกษา ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ทั้งหมดที่แสดงในตัวอย่าง มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดอยู่ที่ 0.58% โดยสิ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างของตัวเลขคือทศนิยมที่ใช้ในการคำนวณและการแปลงหน่วย การคำนวณสามารถเพิ่มความแม่นยำให้กับตัวโปรแกรมได้ด้วยการเพิ่มหน่วยทศนิยมที่สามารถป้อนข้อมูลเข้าและแสดงข้อมูลออกมาในหน้าต่างโปรแกรม

สรุป

บทความนี้ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคำนวณระบบระบายอากาศด้วยภาษาไพทอน และดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ โดยทดสอบความถูกต้องกับตัวอย่างในคู่มือ Industrial Ventilation A Manual of Recommended Practice ของมาตรฐาน American Conference of Governmental Industrial Hygienists และทดสอบกับผลลัพธ์ของตัวอย่างงานวิจัยที่ได้มีการออกแบบจริงโดยการใช้โปรแกรม SolidcWorks simulations 2018 ตัวโปรแกรมสามารถช่วยปรับปรุงในเรื่องของการคำนวณและการออกแบบให้มีความรวดเร็วและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น สามารถนำไปใช้ช่วยในการออกแบบระบบระบายอากาศใหม่ ตรวจสอบระบบระบายอากาศเดิมที่มีอยู่แล้ว และนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือการเรียนการสอนในเรื่องของระบบระบายอากาศและการเขียนภาษาไพทอนได้ เนื่องจากตัวโปรแกรมเป็น

การคำนวณด้วยหน่วย SI unit ผู้ใช้โปรแกรมจึงต้องคำนึงถึงหน่วยของตัวแปร โดยโปรแกรมสามารถพัฒนาเพื่อให้รอบรับหน่วยของตัวแปรอื่นๆ ได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำบทความขอขอบคุณภาควิชาสาขาวิศวกรรมความปลอดภัย และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัยที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ภัทร ลีลาพฤทธิ์. 2565. การเขียนโปรแกรมภาษาไพทอนด้วยการเรียนรู้ด้วยตนเอง. https://www.cpe.ku.ac.th/~pattara/204111/pattara_python_book.pdf, 23 พฤศจิกายน 2565.

มหาศาล เกิดคล้าย. 2564. การพัฒนาเว็ปแอพลิเคชันสำหรับการคำนวณการรั่วไหลและกระจายตัวของสารเคมี. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วันทนีย์ พันธุ์ประสิทธิ์. 2557. การระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรม และ นักอาชีวอนามัย หลักการ การคำนวณ การออกแบบ. พิมพ์ครั้งที่ 3. ห้างหุ้นส่วนจำกัด เบสท์ กราฟฟิค เพรส. กรุงเทพฯ.

ศุภณัฐ พิลา. 2562. การศึกษาและออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่สำหรับเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 1998. Industrial ventilation A manual of Recommended Practice, 23rd ed. American Conference of Governmental Industrial Hygienists Inc. Ohio, USA.

Dols, W.S., Emmerich, S.J., Polidoro, B.J. 2012. LoopDA 3.0 - Natural Ventilation Design and Analysis Software User Guide. https://www.researchgate.net/publication/258689357_LoopDA_30_-_Natural_Ventilation_Design_and_Analysis_Software_User_Guide, 26 November 2022.

Kumar, A., Duvvuru, A., Patel, I. 2001. Development and evaluation of a software for design of industrial ventilation systems. Environ. Prog. A6–A10. doi.org/10.1002/ep.670200106

Mahabady, H.A., Omidvar, M., Rezaee, A., Khavanin, A., Mortazavi, S.B. 2007. A new exhaust ventilation system design software. Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng. 4: 235–242

University of Cape Town. 2017. Object-Oriented programming in python documentation. https://readthedocs.org/projects/python-textbok/downloads/pdf/1.0, 23 November 2022.

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์อันตรายจากปฏิกิริยาเคมี

Development of program for chemical reaction hazard analysis

พัชรมนต์ เบ็ญจโศภิษฐ์[a], ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ[b,*]

Phatcharamon Benjasopit[a], Thongchai Rohitatisha Srinophakun[b,*]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Safety Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengtcs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการคำนวณและออกแบบโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์และเฝ้าระวังอันตรายของปฏิกิริยาเคมีแบบควบคุมไม่ได้ มุ่งเน้นการใช้งานในห้องปฏิบัติการเคมี โดยนำหลักการคำนวณและตัวอย่างสมการที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาออกแบบระบบการจัดเก็บสารเคมีอันตรายอย่างปลอดภัย รวมถึงทำการศึกษาการคัดแยกสารเคมีที่อาจก่อให้เกิดอันตรายจากการทำปฏิกิริยาผ่านการทำแบบคัดกรอง โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องมือดิจิทัลโดยใช้ภาษาไพทอน และแสดงผลในรูปแบบระบบการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่อง เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณมือและการคำนวณด้วยโปรแกรมมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยา (x), Dimensionless time, อัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเอง ณ ปัจจุบัน, อัตราการเกิดปฏิกิริยา สูงสุด (x_m), Dimensionless time ณ อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด, อัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเองสูงสุด มีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.85% 067% 0.05% 0.44% และ 0.81% ตามลำดับ โดยความเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากทศนิยมของตัวเลขที่ใช้

คำสำคัญ: ปฏิกิริยาเคมี, ปฏิกิริยาเคมีแบบควบคุมไม่ได้, ภาษาไพทอน, อันตรายจากปฏิกิริยาเคมี

Abstract

This research studies the calculation and program design for analyzing and monitoring the risk of runaway reactions, focusing on use in chemistry laboratories. By using the calculation principles and examples of related equations in order to design a safe storage system for hazardous chemicals reaction including the separation of chemicals that may cause reaction hazards through questionnaires by the application of Python language then display in the form of a Graphical User Interface. The research results showed that the result from hand calculation and program calculations is only a slight discrepancy. In case of study, the results of current conversion rate, current dimensionless time, current self-heat rate, maximum conversion rate, dimensionless time at maximum conversion rate, and maximum self-heat rate have the percentage error are 0.85% 0.67% 0.05% 0.44% and 0.81%. The reason for discrepancy is the decimal used in the calculation.

Keywords: Chemical Reactivity, Hazard from chemical reactivity, Python, Runaway Reaction

คำนำ

ในปัจจุบันการจัดการเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการเคมีนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากภายในพื้นที่การทำงานมีเชื้อเพลิงที่อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้หลายประเภท ทั้งสารเคมีประเภทไวไฟ สารเคมีประเภทออกซิไดซ์ สารเคมีประเภทกัดกร่อน ก๊าซภายใต้แรงดัน สารพิษและสารเคมีประเภทอื่นๆ หากมีการใช้งานสารเคมีที่ไม่เข้ากันหรือมีการจัดการในการจัดเก็บสารเคมีที่ไม่เหมาะสมหรือไม่ถูกต้อง อาจทำให้เกิดการปฏิกิริยาที่รุนแรงและนำไปสู่การบาดเจ็บหรืออุบัติภัยต่าง ๆ อันจะเกิดแก่ร่างกายชีวิต หรือ ทรัพย์สิน ดังนั้นการมีวิธีการจัดเก็บสารเคมีที่เหมาะสมและมีการเฝ้าระวังปฏิกิริยาเคมีที่ควบคุมไม่ได้จากการทำปฏิกิริยาของสารเคมีในห้องปฏิบัติการจึงมีความสำคัญอย่างมากในการปฏิบัติงาน

โดยหลักในการวิเคราะห์ลักษณะอันตรายของสารเคมีที่เกิดปฏิกิริยาที่แพร่หลายที่สุดคือใช้เครื่องมือแคลอริมิเตอร์ (เงินเย็น, 2563) เพื่อทำความเข้าใจปฏิกิริยาที่ต้องการและไม่ต้องการให้เกิด อาทิเช่น ปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่ได้ (Runaway Reaction) ปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นช้าในช่วงแรก เนื่องจากไม่มีการคายความร้อนออกมาจากปฏิกิริยา หากแต่จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและปลดปล่อยความร้อนรวมถึงความดันของปฏิกิริยาขึ้นอย่างรวดเร็วในภายหลัง โดยหนึ่งในขั้นตอนที่สามารถทำได้เพื่อหลีกเลี่ยงหรือป้องกันปฏิกิริยาดังกล่าวได้ คือ การคัดกรองเบื้องต้นการระบุและจัดการอันตรายของสารเคมีที่ครอบครองอย่างเหมาะสม เพื่อจัดให้มีการจัดเก็บสารเคมีได้อย่างเหมาะสม (Nolan and Barton,1987; Barton and Nolan,1991) และสามารถนำไปใช้ในพื้นที่การทำงานในห้องปฏิบัติการเคมีได้

ผู้วิจัยทำการศึกษาขั้นตอนในการคำนวณเพื่อเฝ้าระวังการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ควบคุมไม่ได้ รวมถึงการตรวจสอบและคัดแยกเบื้องต้นอันเกี่ยวเนื่องกับความเป็นอันตรายของปฏิกิริยาเคมีเบื้องต้นเป็นแนวทางในการจัดเก็บหรือคัดแยกสารเคมีให้กับห้องปฏิบัติการเคมีที่มีการใช้งานสารเคมีที่หลากหลายได้นำไปทดลองใช้งานตามขั้นตอนระบุในเอกสาร Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed., 2011 โดยใช้โปรแกรมในการคำนวณกรณีศึกษา 1 กรณีศึกษาการคำนวณอัตราการสร้างความร้อนสูงสุดด้วยตนเองของปฏิกิริยาเคมีระหว่างเมทานอลและอะซีติกแอนไฮไดร์ด ในสัดส่วน 2:1 โมลโดยคำนวณตามตัวอย่างในเอกสารข้างต้น

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ควบคุมไม่ได้

(U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2002) ได้เสนอคำจำกัดความของอันตรายจากปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่ได้ ไว้ว่า เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหัน โดยไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่มีศักยภาพหรือก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อ บุคคล ทรัพย์สิน หรือสิ่งแวดล้อม

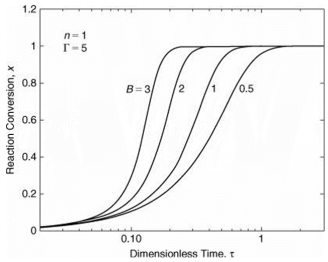
(Nolan and Barton, 1987; Barton and Nolan, 1991) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์หาสาเหตุของอุบัติเหตุที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่ได้จำนวน 169 เหตุการณ์ โดยสรุปสาเหตุในการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวไว้โดยสังเขป ดังนี้

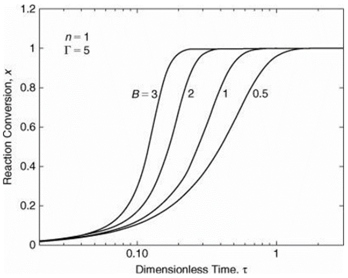
- การขาดความเข้าใจในกระบวนการเคมี อาทิ การใช้สารเคมีที่มีความไม่เข้ากันมาทำปฏิกิริยาเคมีต่อกัน
- ระบบควบคุมหรือการจัดเก็บสารเคมีที่ไม่เหมาะสม
- ขั้นตอนการจัดการสารเคมีที่ไม่เหมาะสม
- ผู้ปฏิบัติงานไม่มีความรู้ความเข้าใจในการจัดเก็บสารเคมีหรือการใช้งานสารเคมี

กำหนดวิธีการคำนวณการเฝ้าระวังการเกิดปฏิกิริยาแบบควบคุมไม่ได้

ในทางทฤษฎีนั้นเราสามารถหาความเข้มข้นของปฏิกิริยาได้ หากในทางปฏิบัติ การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วเช่นกัน ทำให้การคำนวณหาค่าความเข้มข้นนั้นเป็นไปได้ยาก ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณตรวจจับและคำนวณง่ายที่สุดในทางปฏิบัติ คือ อุณหภูมิของปฏิกิริยาและความร้อนที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยา โดย (Crowl and Louvar, 2011) กำหนดขั้นตอนการคำนวณ ดัง Table 1

Table 1 Calculation method for Runaway reaction monitoring

Calculation method	Unit	Equations
Find Dimensionless adiabatic temperature (B)	-	$B=\frac{\Delta T_{ad}}{T_0}=\frac{T_F-T_0}{T_0}$ (1) Where T_{ad} is adiabatic temperature, T_0 is initial reaction temperature, T_F is final reaction temperature
Find Dimensionless activation energy (Γ)	-	$\Gamma=\frac{E_a}{R_g T_0}$ (2) Where E_a is activation energy, R_g is gas constant
Find reaction conversion (x)	-	$x=\frac{T-T_0}{\Delta T_{ad}}=\frac{T-T_0}{T_F-T_0}$ (3)
Find Dimensionless time during current self-heat rate	-	Compared with current conversion through the graph.  **Fig.1** Example of conversion plot
Find current conversion at dimensionless time	-	$\frac{dx}{d\tau}=(1-x)^n \exp(\frac{\Gamma Bx}{1+Bx})$ (4) Where τ is Dimensionless Time, n is reaction order
Find current self-heat rate	K/min	$\frac{dT}{dt}=(T_F-T_0)k(T_0)\frac{dx}{d\tau}$ (5) Where $k(T_0)$ คือ temperature-dependent rate coefficient
Find actual time at current converesion (t)	min	$t=\frac{\tau}{k(T_0)\,C_0^{n-1}}$ (6)
Find conversion at the maximum rate (x_m)	-	$x_m=\frac{1}{2nB}[-(\Gamma+2n)+\sqrt{\Gamma[\Gamma+4n(1+B)]}]$ (7)

Find dimensionless time during conversion at the maximum rate	-	Compared with maximum conversion through the graph.  **Fig. 2** Example of conversion plot
Find actual time of conversion at the maximum rate (t_m)	min	$t_m = \frac{\tau}{k(T_0)\, C_0^{n-1}}$ (8)
Find a time at maximum rate	min	Brind actual time of conversion at the maximum rate (Equation 8) minus with actual time at current conversion (Equation 6)
Find maximum conversion at dimensionless time	-	$\frac{dx_m}{d\tau} = (1-x_m)^n \exp\left(\frac{\Gamma B x_m}{1+Bx_m}\right)$ (9)
Find maximum self-heat rate	K/min	$\frac{dT}{dt} = (T_F-T_0)k(T_0)\frac{dx_m}{d\tau}$ (10)

ในการคำนวณตาม Table 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ประกอบการคำนวณมีทั้งสิ้น 5 ตัว ประกอบด้วย อันดับปฏิกิริยา (Reaction Order), อุณหภูมิเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยา (Onset Temperature,T_0), ค่าคงที่ ($k(T_0)$), อุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา (Final Temperature, T_f) และ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy, E_a) เพื่อหาอัตราการสร้างความร้อนสูงสุดด้วยตนเองของปฏิกิริยา และนำมาใช้ในการออกแบบระบบการจัดเก็บสารเคมีหรือการใช้งานสารเคมีเพื่อเฝ้าระวังการเกิดปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่ได้

ศึกษาทฤษฎีการระบุอันตรายจากปฏิกิริยาเคมี

การจัดเก็บสารเคมีโดยมีการแบ่งประเภทที่เหมาะสมนั้นมีความสำคัญในสถานประกอบการอย่างยิ่ง โดยหนังสือ Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed. (Crowl and Louvar, 2011) ได้ระบุแผนภาพที่ใช้คัดกรองอันตรายจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่งหากการคัดกรองเบื้องต้นดังกล่าวนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดเก็บสารเคมีก็มีจะความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ไว้ดังนี้

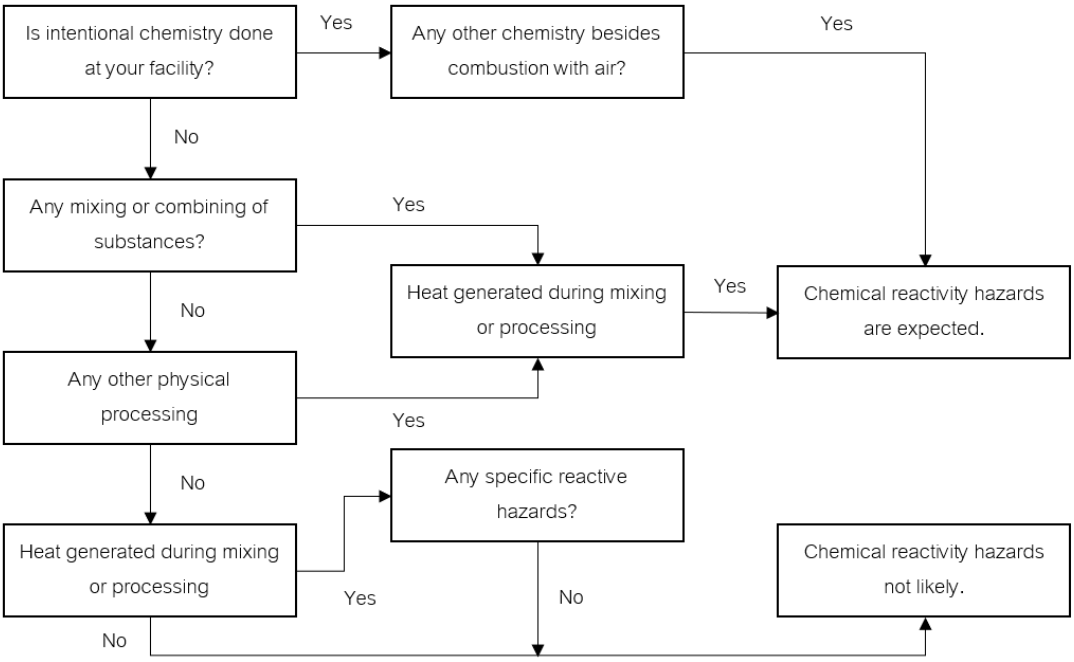


Fig. 3 Screening flowchart for reactive chemical hazards

ทดสอบการใช้โปรแกรม ประเมินผล และดำเนินการแก้ไข

กำหนดกลุ่มตัวอย่างเป็นนักเคมีในห้องปฏิบัติการเคมีจำนวน 30 คน และเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยระดับหัวหน้างานและระดับบริหารในห้องปฏิบัติการเคมี โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน อันประกอบด้วย

1. ให้ทำแบบคัดกรองเบื้องต้นในการระบุอันตรายของสารเคมีที่ใช้งาน
2. ใส่ค่าข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต่อการคำนวณ โดยอ้างอิงจากค่าพารามิเตอร์ในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นอันตรายที่อาจเกิดขึ้นก่อนเริ่มทำการทดลอง

ภายหลังจากการทดลองใช้จะมีการประเมินผลผ่านแบบสอบถามและนำมาสรุปผลและดำเนินการแก้ไขต่อไป

ผลและวิจารณ์ผล

การประยุกต์ใช้งานภาษาไพทอนในบทความฉบับนี้ จะแยกเป็น 2 ส่วน คือ การคัดกรองความเป็นอันตรายของปฏิกิริยาเคมีเบื้องต้นและการคำนวณอัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเองสูงสุดของปฏิกิริยาเพื่อเฝ้าระวังปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่ได้ โดยทั้งสองส่วนนั้นจะมี Graphic user interface (GUI) เพื่อกับใช้ในการติดต่อและสื่อสารกับผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้งานกดเข้าเมนู การคัดกรองความเป็นอันตรายของสารเคมีเบื้องต้นหรือ Identify Reactive Chemical Hazard ซึ่งจะพบหน้าต่างแสดงผลดัง Fig. 4 และดำเนินการแสดงผลอ้างอิงตามเกณฑ์การคัดกรองจากหนังสือ Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards (Johnson et al., 2003)

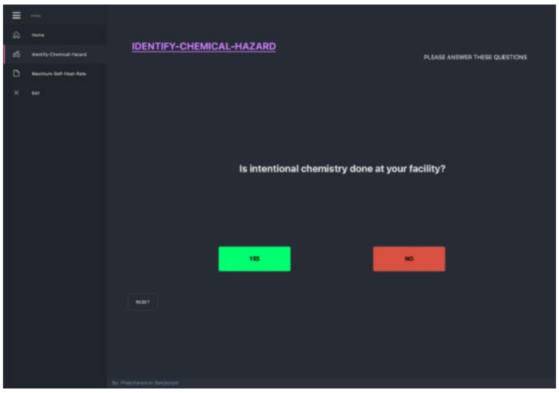


Fig. 4 identify reactive chemical hazard questionnaire section in GUI

และเมื่อกดเข้าใช้งานเมนูการคำนวณอัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเองสูงสุดของปฏิกิริยาเพื่อเฝ้าระวังปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่ได้ อ้างอิงจากหลักการคำนวณและการใช้ค่าพารามิเตอร์จากหนังสือ Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed. (Crowl and Louvar, 2011)

ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1 การคำนวณอัตราการสร้างความร้อนสูงสุดด้วยตนเองของปฏิกิริยาเคมีระหว่างเมทานอลและอะซีติกแอนไฮไดร์ด ในสัดส่วน 2:1 โมล

กำหนดให้อุณหภูมิ ณ ปัจจุบันเท่ากับ 400 K และข้อมูลจากแคลอริมิเตอร์กำหนด ดังนี้ อันดับการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1, อุณหภูมิเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาเท่ากับ 377 K, อุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเท่ากับ 483 K, ค่าพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 15,000 cal/gm-mole K นำพารามิเตอร์ที่ได้มาหา Dimensionless adiabatic temperature (B) จากสมการที่ 1 จะได้เท่ากับ 0.282 และหา Dimensionless activation energy (Γ) จากสมการที่ 2 จะได้เท่ากับ 20.0 จากนั้นหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (x) จากสมการที่ 3 จะได้เท่ากับ 0.217 และทำการหาอัตราการสร้างความร้อนสูงสุดด้วยตนเอง ณ ปัจจุบัน จากสมการที่ 5 ได้เท่ากับ 0.886 K/min โดยใช้ค่าอัตราส่วนของอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อ Dimensionless time จากสมการที่ 4 และหาค่า Dimensionless time โดยเทียบค่าผ่านกราฟอัตราการเกิดปฏิกิริยา ต่อ Dimensionless Time ได้เท่ากับ 0.141 ดัง Fig. 5

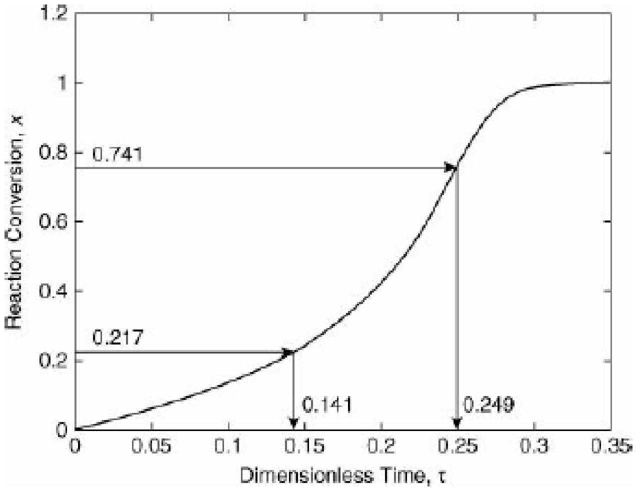


Fig. 5 Conversion plot

จากนั้นทำการหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดจากสมการที่ 6 จะได้เท่ากับ 0.741 แล้วทำการเทียบค่าผ่านกราฟเพื่อหา Dimensionless time ณ อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 0.249 และทำการหาอัตราการสร้างความร้อนสูงสุดด้วยตนเอง จากสมการที่ 5 จะได้ผลลัพธ์เท่ากับ 0.0489 K/min

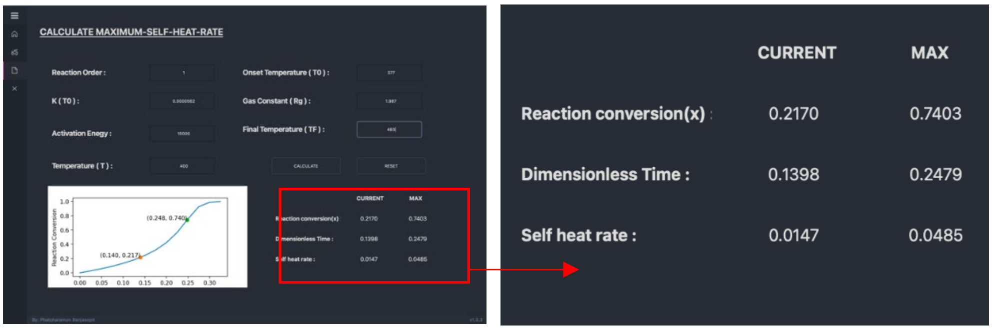


Fig. 6 Example page of maximum self-heat rate after input parameters in GUI with Conversion plot

จาก Fig. 6 เป็นการใช้ข้อมูลจากกรณีตัวอย่างป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม ในขั้นตอนที่ 1 จะมีช่องข้อความให้ผู้ใช้งานระบุค่าพารามิเตอร์ทั้งสิ้น 5 ตัว ประกอบด้วย อันดับการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Order), อุณหภูมิเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยา (Onset Temperature,T_0), ค่าคงที่ (k(T_0)), อุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา (Final Temperature, T_f) และ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy, E_a) จากนั้นกดคำสั่งคำนวณหรือ Calculate เพื่อให้โปรแกรมคำนวณหาผลลัพธ์ 6 ตัว อันได้แก่

- อัตราการเกิดปฏิกิริยา (x) ได้เท่ากับ 0.217
- Dimensionless time ณ ปัจจุบัน ได้เท่ากับ 0.1398
- อัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเอง ณ ปัจจุบัน ได้เท่ากับ 0.0147
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด (x_m) ได้เท่ากับ 0.7406
- Dimensionless time ณ อัตราส่วนของปริมาณสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาสูงสุด ได้เท่ากับ 0.2479
- อัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเองสูงสุด ได้เท่ากับ

อีกทั้งโปรแกรมจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แปรผันตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Conversion) และ Dimensionless time ไว้ที่มุมขวาล่างของหน้าจอ สามารถดูภาพประกอบที่ Fig. 7

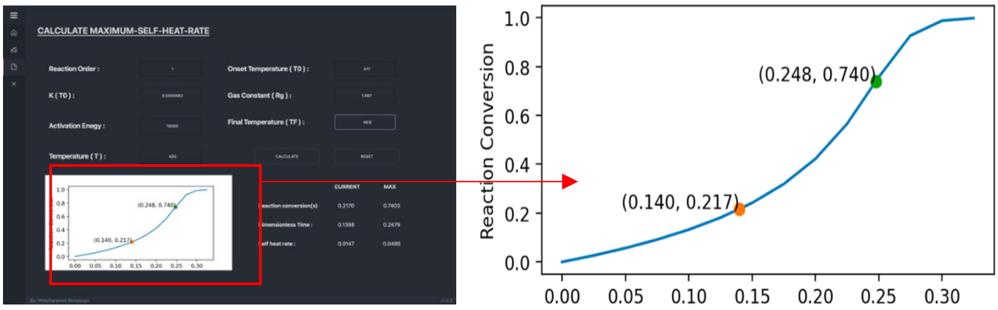


Fig. 7 Example page of Conversion plot

เมื่อดำเนินการคำนวณด้วยมือและป้อนข้อมูลลงในโปรแกรมตามวิธีในกรณีศึกษาที่ 1 จะได้ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยมือ การคำนวณด้วยโปรแกรมและค่าความคลาดเคลื่อนตามที่แสดงใน Table 2

Table 2 Calculation results and error percentage of case study

Methods calculation	Hand Calculation	Program Calculation	Error Percentage (%)
อัตราการเกิดปฏิกิริยา (x)	0.217	0.217	0.00
Dimensionless time ณ ปัจจุบัน	0.141	0.1398	0.85
อัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเอง ณ ปัจจุบัน	0.0148	0.0147	0.67
อัตราการเกิดปฏิกิริยา สูงสุด (x_m)	0.741	0.7406	0.05
Dimensionless time ณ อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด	0.249	0.2479	0.44
อัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเองสูงสุด	0.0489	0.0485	0.81

สรุป

บทความนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคำนวณเพื่อเฝ้าระวังปฏิกิริยาเคมีที่ควบคุมไม่ได้รวมถึงทำแบบสอบถามเพื่อคัดแยกปฏิกิริยาเคมีที่อาจก่อให้เกิดอันตราย เพื่อให้มีการจัดเก็บที่เหมาะสม ด้วยการใช้งานภาษาไพทอน และแสดงผลผ่านระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือ Graphic User Interface (GUI) โดยดำเนินตามขั้นตอนที่ได้ระบุไว้ โดยได้ทดสอบความถูกต้องกับตัวอย่างในเอกสาร Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed. (Crowl and Louvar, 2011) ในเบื้องต้นพบว่าสามารถคัดแยกสารเคมีอันตรายออกจากรายชื่อสารเคมีที่ห้องปฏิบัติการเคมีครอบครองได้จริง รวมถึงโปรแกรมการคำนวณอัตราการสร้างความร้อนด้วยตนเองสูงสุดของปฏิกิริยาเพื่อเฝ้าระวังปฏิกิริยาที่ควบคุมไม่ได้ ค่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ทางทฤษฎี ซึ่งในอนาคตมีแผนงานที่จะเพิ่มข้อมูลเอกสารความปลอดภัยของสารเคมี (Safety Data Sheet : SDS) เพื่อให้นักเคมีในห้องปฏิบัติการสามารถค้นหาอันตรายและข้อควรระวังเบื้องต้นเกี่ยวกับสารเคมีที่ตนใช้งาน รวมถึงการเพิ่มตารางการความไม่เข้ากันของสารเคมี (Chemical Compatibility Matrix) เพื่อสนับสนุนแบบคัดกรองอันตรายของสารเคมีที่ผู้จัดทำได้จัดทำขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำบทความขอขอบคุณภาควิชาสาขาวิศวกรรมความปลอดภัย และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัยที่ให้ความช่วยเหลือและช่วยประสานงาน รวมถึงสนับสนุนในการหาและรวบรวมข้อมูลเพื่อให้เกิดเป็นบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

Crowl, D.A., Louvar, J.F. 2011. Chemical process safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed., Paul Boger. Westford, Massachusetts, USA. pp. 723.

Barton, J.A., Nolan. P.F. 1991. Safety of chemical batch reactors and storage tanks. 1st ed. Kluver Academic Publishers, pp. 99–124. UK.

Nolan, P.F. Barton, J.A. 1987. Some lessons from thermal-runaway incidents. J. Hazard. Mater. 14: 233–239

Johnson, R.W. Rudy, S.W., Unwin, S.D. 2003. Essential practices for managing chemical reactivity hazards New York: AIChE Center for Chemical Process Safety. NYC.

U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. 2002. Improving Reactive Hazard Management. https://www.c sb.gov/improv ing-reactive-hazard-management/, 9 December 2022

คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ความปลอดภัยจากการเกิดไฟฟ้าสถิต

Computer-Aided safety analysis of static electricity

นภสร สหพรวัฒนานุกูล[a], **ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ**[b,*]

Noppasorn Sahapornwattananugoon[a], Thongchai Rohitatisha Srinophakun[b,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengtcs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าสถิตและการออกแบบเพื่อความปลอดภัยในอุตสาหกรรมการผลิต โดยใช้หลักการในการควบคุมความเร็วในการไหล ร่วมกับระบบรากสายดิน เพื่อลดปริมาณประจุไฟฟ้าสถิตสะสม ปัญหาสำคัญที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตในโรงงานปิโตรเคมีคือประกายไฟ ซึ่งนำไปสู่การเกิดเพลิงไหม้และระเบิดได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อโรงงาน บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้ภาษาไพทอน ในการคำนวณการคายประจุไฟฟ้าสถิต และค่าความต้านทานหลักดินที่เหมาะสมต่อกระบวนการทำงาน โดยนำเสนอในรูปแบบการใช้ภาพกราฟฟิก (Graphical User Interface, GUI) โดยมีการอ้างอิงตัวอย่างปัญหาจากหนังสือ Chemical Process Safety และ ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพ ด้านการออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบและทดสอบการต่อลงดิน พบว่าสามารถคำนวณพารามิเตอร์เกี่ยวกับระบบไฟฟ้าสถิตอย่างรวดเร็ว ถูกต้องและง่ายต่อการใช้งาน พร้อมทั้งนำไปใช้ในการออกแบบหลักดินให้เหมาะสม

คำสำคัญ: การต่อลงดิน, ความปลอดภัย, ไฟฟ้าสถิต, ภาษาไพทอน

Abstract

This article study about electrostatic systems and their design for safety in the manufacturing industry by utilizing the grounding system and control flow velocity to lessen the buildup of static charge, in order to reduce the accumulation of static charge. In petrochemical factories, static electricity cause sparks, which are a serious issue that can cause fires and explosions and significant plant damage. This article use Python for calculating electrostatic discharge and resistance of ground rod with example problem in the book Chemical Process Safety and Code of practice for design, installation, inspection and testing of grounding system. It is given using graphics (Graphical User Interface, GUI) for friendly user. The electrostatic parameters may be determined fast, dependable and simple to use moreover, it is properly used in the design of ground rod as well.

Keywords: Electrostatic, Grounding, Python, Safety

คำนำ

ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีไอระเหยและฝุ่นละอองที่ติดไฟได้อยู่ในสภาพแวดล้อมการทำงานปกติ การสะสมประจุไฟฟ้าสถิตเป็นผลมาจากการแยกตัวนำที่ไม่ดี ออกจากตัวนำที่ดีหลังจากวัตถุสัมผัสกัน โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านส่วนต่อประสานจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่ง หากวัตถุนึงเป็นฉนวนหรือตัวนำที่ไม่ดี อิเล็กตรอนจะไม่เคลื่อนที่และติดอยู่บนพื้นผิว ส่งผลให้มีวัตถุนั้นมีค่าประจุเป็นบวก และอีกวัตถุมีประจุเป็นลบ ทำให้วัตถุทั้งสองมีความต่างศักย์ทางไฟฟ้า หรือ มีขั้ว เกิดขึ้น (ทัศนีย์, 2562) หากนำวัตถุเข้ามาใกล้กันเพียงพอที่จะเกิดการถ่ายเทประจุในสภาพแวดล้อมที่สามารถติดไฟได้ การถ่ายเทประจุจะก่อให้เกิดประกายไฟ (spark) เมื่อองค์ประกอบในการติดไฟครบ ทำให้ไฟฟ้าสถิตเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดเพลิงไหม้หรือการระเบิดของของเหลวไวไฟหรือของเหลวติดไฟ ที่มักถูกมองข้าม แต่จากการสอบสวน การพิสูจน์และการทดลอง ก็พบว่าไฟฟ้าสถิตเป็นสาเหตุหลักสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดเพลิงไหม้หรือการระเบิดซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อโรงงานอุตสาหกรรม การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตในของเหลวนั้น ก็สามารถเกิดขึ้นได้ในหลายกรณีเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การถ่ายเทของเหลวหรือการไหลผ่านท่อ การเขย่าของเหลว ตลอดจนการเดินบนพื้นที่เป็นฉนวนก็สามารถเกิดประจุไฟฟ้าสถิตได้ ส่วนจะมีปริมาณของประจุไฟฟ้าสถิตมากน้อยเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหลวและความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว ความเร็วที่มากเกินไปเป็นสาเหตุอันดับสองที่ก่อให้เกิดอันตรายจากไฟฟ้าสถิต (Yuqin Hu et al.,2013) วิธีการป้องกันการเกิดประกายไฟจากไฟฟ้าสถิต สามารถทำได้โดยทำความเข้าใจเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต และใช้ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบกระบวนการผลิตให้มีความเร็วของอัตราการไหลของสารเคมี (ฐิติวรดา, 2564) การเลือกใช้ขนาดหลักดินที่เหมาะสม รวมถึงการต่อสายดินและการต่อฝากเพื่อป้องกัน/ลด การสะสมของประจุไฟฟ้าสถิต โดยใช้ภาษา Python ในการออกแบบโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณสมการที่เกี่ยวข้อง เพื่อช่วยให้การคำนวณสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องสามารถใช้งานได้ง่าย เป็นประโยชน์ในการป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิตในโรงงานอุตสาหกรรม

อุปกรณ์และวิธีการ

ประกายไฟที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต จะเกิดจากการปลดปล่อยไฟฟ้าสถิต(Electrostatic Discharge) ประจุส่วนเกินจะถูกทำให้เป็นกลางโดยการไหลของประจุจากวัตถุไปยังสภาพแวดล้อม พลังงานที่เก็บไว้ในรูปไฟฟ้าสถิตบนวัตถุหนึ่งจะแปรผันขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุและค่าคาปาซิแตนซ์ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ใส่ประจุและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลางโดยรอบ วัตถุขนาดที่ใหญ่กว่าจะเก็บพลังงานได้มากกว่า ซึ่งอาจเป็นอันตรายโดยตรงจากการสัมผัสของมนุษย์ หรืออาจจะให้ประกายไฟที่สามารถจุดชนวนก๊าซหรือฝุ่นละอองไวไฟ ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการคำนวณค่าพลังงานที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยไฟฟ้าสถิต และ การออกแบบการต่อลงดิน

การคำนวณระบบไฟฟ้าสถิต

หาค่าเวลาผ่อนคลายคือเวลาสำหรับประจุไฟฟ้าที่จะกระจายไปโดยการรั่วไหลสามารถคำนวณได้ได้จาก Equation 1:

$$\tau = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{\gamma_c} \tag{1}$$

โดยที่ τ = เวลาผ่อนคลาย (วินาที)

ε_r = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ไม่มีหน่วย)

ε_0 = สภาพยอมของสูญญากาศ (8.85*10-12 coulomb2/Nm^2 = 2.7*10-12 coulomb/volt ft)

γ_c = ความสามารถในการนำไฟฟ้าของของเหลว (โอห์ม/ซ.ม.)

เมื่อได้ค่าเวลาผ่อนคลายมาแล้ว จึงนำค่าที่ได้มาใช้ในการหาค่ากระแสที่เกิดขึ้นขณะถ่ายเทของเหลว (I_s) โดยสามารถคำนวณได้ได้จาก Equation 2 และหาค่าความต้านทานจาก Equation 3:

$$I_s = \frac{10*10^{-6}\ \text{amp}}{(m/s)^2(m)^2}(ud)^2[1 - \exp(-\frac{L}{u\tau})] \quad (2)$$

โดยที่ I_s = กระแสไหล (แอมแปร์)

u = ความเร็ว (เมตร/วินาที)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)

L = ความยาวท่อ (เมตร)

$$R = \frac{L}{\gamma_c A} \quad (3)$$

โดยที่ γ_c = ความสามารถในการนำไฟฟ้าของของเหลว (โอห์ม/ซม.)

L = ความยาวของตัวนำ (ซม.)

A = พื้นที่ของตัวนำ (ตร.ซม.)

R = ความต้านทาน (โอห์ม)

จากนั้นจึงนำค่า I_s และค่า R ที่คำนวณได้มาใช้ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะถ่ายเทของเหลว (V) จากการที่ของเหลวไหลผ่านท่อซึ่งส่งผลให้มีประจุสะสมบริเวณท่อซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Equation 4:

$$V = I_s R \quad (4)$$

การคำนวณแรงดันไฟฟ้าของวัตถุทรงกลมสามารถคำนวณได้จาก Equation 5 และความจุได้จาก Equation 6:

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{\varepsilon_r r} \quad (5)$$

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r \quad (6)$$

การคำนวณแรงดันไฟฟ้าสำหรับสองแผ่นคู่ขนาน สามารถคำนวณได้จาก Equation 7 และความจุได้จาก Equation 8:

$$V = \frac{QL}{\varepsilon_r\varepsilon_0 A} \quad (7)$$

$$C = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A}{L} \quad (8)$$

โดยที่ ε_r = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ไม่มีหน่วย)

ε_0 = สภาพยอมของสูญญากาศ (8.85*10–12 *coulomb*2/*Nm*2 = 2.7*10–12 *coulomb/volt ft*

r = รัศมีทรงกลม

C = ความจุ

L = ความหนาของไดอิเล็กตริก

A = พื้นที่ของพื้นผิว

V = แรงดันไฟฟ้า (โวล์ต)

การคำนวณประจุสำหรับภาชนะที่มีทางเข้า-ออก หลายทาง สามารถคำนวณได้จาก Equation 9:

$$\frac{dQ}{dt} = \sum^{n} I_{s_{i,in}} - \sum^{m} I_{s_{j,out}} - \frac{Q}{\tau} \quad (9)$$

โดยที่ $I_{s_{i,in}}$ = กระแสไหลเข้าถังผ่านทางเข้า I ในชุดของ n

$I_{s_{j,out}}$ = กระแสที่ออกจากทางออก j ในชุดของ m

$\frac{Q}{\tau}$ = การสูญเสียประจุที่เกิดจากการคลายประจุ

τ = เวลาผ่อนคลาย (วินาที)

ขั้นตอนสุดท้ายในการหาค่าพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ คือการนำค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องมาใช้คำนวณใน Equation 10–12 โดยจะใช้ค่าที่ได้ในการประเมิน หากค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 0.1 มิลลิจูล จะถือว่ากระบวนการดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการติดไฟหรือจุดระเบิดของไอระเหยในอากาศ (Crowl and Louvar, 2011).

$$J = \frac{1}{2} cv^2 \quad (10)$$

$$J = \frac{1}{2} QV \quad (11)$$

$$J = \frac{1}{2}\left(\frac{Q^2}{C}\right) \quad (12)$$

โดยที่ J = พลังงาน (จูล)

C = ค่าความจุ (ฟารัด)

V = ความต่างศักย์ (โวลต์)

Q = ประจุ (คูลอมบ์)

การออกแบบหลักดิน

หลังจากทำการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยไฟฟ้าสถิตได้แล้ว หากค่าที่ได้มีสามารถก่อให้เกิดการจุดติดไฟ หรือ ระเบิดขึ้นได้ ต้องมีการลดประจุไฟฟ้าสถิตในระบบด้วยการต่อลงดิน พื้นดินสามารถแบ่งได้เป็นหลายชั้น ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีในสภาวะที่แห้ง แต่หากมีความชื้นหรือมีสารละลายเกลือก็จะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี อีกทั้งอุณหภูมิก็มีผลต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน หรือ สามารถเทียบค่าได้ จากค่าความต้านทานจำเพาะของดินประเภทต่างๆ หากค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าต่ำ จะเป็นผลดีกับระบบการต่อลงดิน และการติดตั้งหลักดิน มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย กำหนดค่าความต้านทานของหลักดินกับดิน (Resistance to ground) ต้องไม่เกิน 5 โอห์ม แต่มีข้อยกเว้นในพื้นที่ยากในการปฏิบัติ ยอมให้ค่าความต้านทานของ

หลักดินกับดินต้องไม่เกิน 25 โอห์ม หากคำนวณจำนวน 1 แท่ง แล้วค่าความต้านทานยังสูงกว่าค่าที่กำหนด ต้องเพิ่มแท่งหลักดินขนานกัน และต่อฝากถึงกันโดยเว้นระยะห่างไม่น้อยกว่าความยาวของแท่งหลักดิน (สภาวิศวกร, 2554)

แท่งหลักดินตามแนวลึกในเนื้อดินมีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ สามารถคำนวณได้จาก Equation 13:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1\right) \quad (13)$$

หลักดินฝังลึกตามแนวผิวดิน เนื่องจากหลักดินชนิดนี้ได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศอย่างมาก ดังนั้นเมื่อต้องการวัดความต้านทาน จะคิดเสมือนว่าหลักดินนี้ติดตั้งอยู่ที่ผิวดิน คือไม่คำนึงถึงระยะความลึกที่ฝังหลักดิน สามารถคำนวนได้จาก Equation 14:

$$R = \frac{\rho}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{a} - 1\right) \quad (14)$$

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทานของหลักดิน (โอห์ม)

L คือ ความยาวของแท่งหลักดิน (โอห์ม)

a คือ รัศมีของแท่งหลักดิน (เมตร)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์มเมตร)

ภาษาไพทอน (Python)

ภาษาไพทอนได้รับอิทธิพลมาจากภาษา ABC ซึ่งมีความสามารถในการจัดการเกี่ยวกับข้อผิดพลาดของโปรแกรม (Exception handling) ได้ดี และดึงเอาความสามารถเด่นๆ ของภาษาระดับสูงอื่นๆ มาประยุกต์ดัดแปลงใช้กับภาษาไพทอนด้วย ส่งผลให้ไพทอนเป็นภาษาที่นิยม และใช้งานกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นภาษาที่สามารถเรียนรู้ได้ง่าย รวดเร็ว รูปแบบการเขียนโปรแกรมมีความกระทัดรัด และมีประสิทธิภาพสูง จากการนำเอาคุณลักษณะเด่นของภาษาอื่นๆมาเป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อยอด ไพทอนถูกพัฒนาขึ้นมาโดยไม่ขึ้นกับแพลตฟอร์ม กล่าวคือ สามารถทำงานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการตระกูลวินโดวส์ ยูนิกส์-ลินกซ์ และ แมคด้วย ทำให้สามารถนำภาษาไพทอนมาพัฒนาโปรแกรมได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย จึงทำให้มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย

ทดสอบการใช้งานโปรแกรม ประเมินผล และดำเนินการแก้ไข

การทดสอบการใช้งานโปรแกรมการคำนวนพารามิเตอร์เกี่ยวกับระบบไฟฟ้าสถิต โดยทดสอบการใช้งานกับตัวอย่างการคำนวณเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตจากหนังสือ Chemical Process Safety (Crowl and Louvar, 2011) และการคำนวณหาค่าความต้านทานของหลักดินเพื่อใช้ในกำหนดจำนวนแท่งหลักดินที่ต้องใช้จากประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพด้านการออกแบบติดตั้ง ตรวจสอบและทดสอบการต่อลงดิน (สภาวิศวกร,2554) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการออกแบบของโปรแกรมการคำนวณด้วยภาษาไพทอน นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองใช้งานมาพัฒนา และแก้ไขข้อบกพร่องของโปรแกรม

ผลและวิจารณ์การทดลอง

บทความนี้ประยุกต์ใช้ภาษาไพทอนในการคำนวณพารามิเตอร์เกี่ยวกับระบบไฟฟ้าสถิต ซึ่งอ้างอิงจากตัวอย่างปัญหาจากหนังสือ โดยพัฒนาระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้ง่ายสำหรับผู้ใช้งาน

เมื่อผู้ใช้งานเริ่มใช้โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง GUI เพื่อดำเนินการป้อนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าสถิตและการคำนวณค่าความต้านทานของหลักดิน

ตัวอย่างที่ 1 จากหนังสือ Crowl and Louvar (2011) ประเมินความจุของคน (สูง 6 ฟุต 2 นิ้ว) ยืนอยู่บนพื้นไม้แห้ง

ผลการคำนวณของโปรแกรม

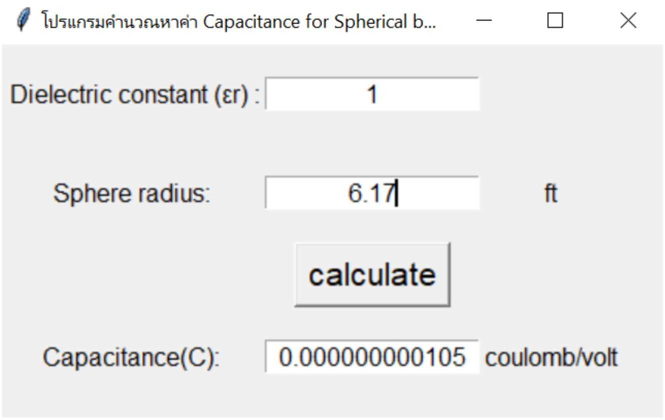


Fig. 1 Graphic user interface for calculate Capacitance

ตัวอย่างที่ 2 จากหนังสือ Crowl and Louvar (2011) กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างหัวฉีดที่มีประจุและถังที่มีสายดิน ดังแสดงใน Fig. 2 และ คำนวณพลังงานสะสมที่หัวฉีดและของเหลว พร้อมทั้งอธิบายอันตรายที่อาจจะเกิดในกระบวนการนี้ สำหรับอัตราการไหลที่ 1 gpm

ข้อมูลคือ : ท่อยาว 20 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2 นิ้ว ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว : 10^{-8} โอห์ม/ซม.

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ε_r : 25.7 และ ความหนาแน่น 0.88 กรัม/ลบ.ซม.

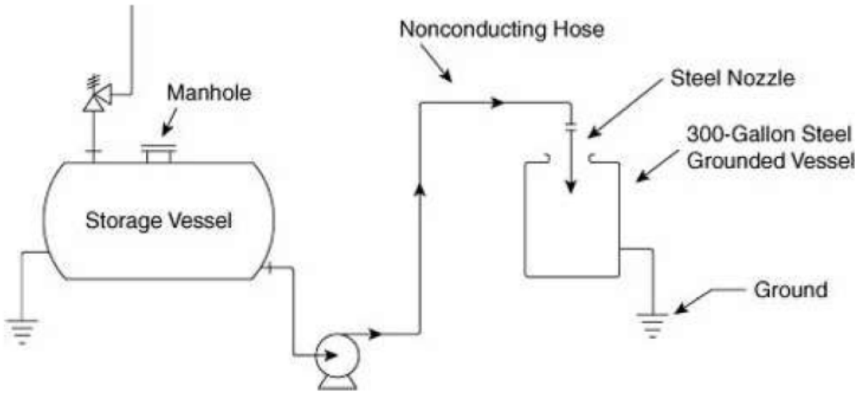


Fig. 2 System for Example 2

ผลการคำนวณของโปรแกรม

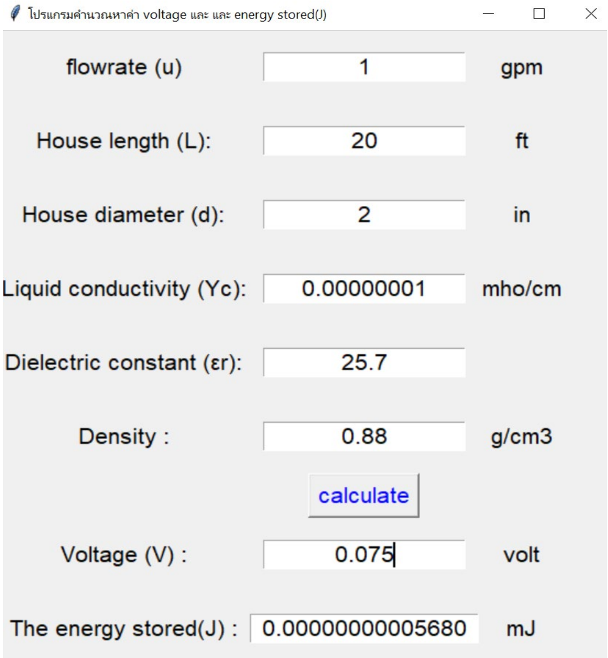


Fig. 3 Graphic user interface for calculate Voltage and energy stored

ตัวอย่างที่ 3 สภาวิศกร (2554) กำหนดให้แท่งหลักดิน 1 แท่ง ยาว 2.4 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร กำหนดให้ความต้านทานจำเพาะของดินมีค่า 100 โอห์มเมตร จงหาความต้านทานของหลักดิน

ผลการคำนวณของโปรแกรม

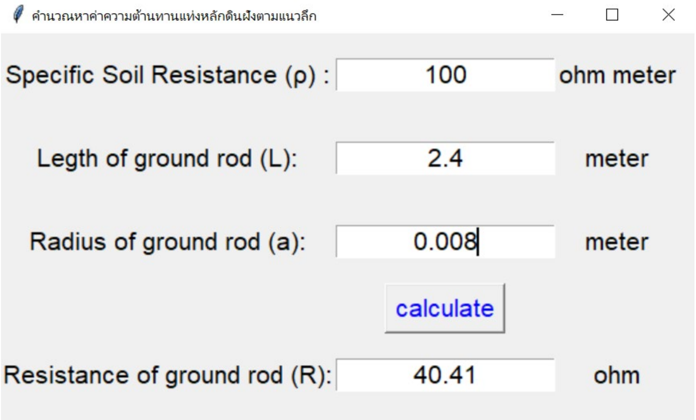


Fig. 4 Graphic user interface for Resistance of ground rod

สรุป

บทความนี้ได้ทำการออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ (Graphical User Interface, GUI) โดยใช้ภาษาไพทอนในการคำนวณพารามิเตอร์เกี่ยวกับระบบไฟฟ้าสถิต และการออกแบบหลักดินที่เหมาะสมต่อกระบวนการทำงานซึ่งจะช่วยลดอันตรายจากการเกิดเพลิงไหม้หรือระเบิดจากการปลดปล่อยไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรมการผลิต โดยมีการอ้างอิงตัวอย่างปัญหาจากหนังสือของ Crowl and Louvar (2011) และ สภาวิศวกร

(2554) พบว่าสามารถคำนวณพารามิเตอร์เกี่ยวกับระบบไฟฟ้าสถิตอย่างรวดเร็วและถูกต้อง เพื่อพัฒนาการคำนวณให้ดียิ่งขึ้น ควรมีการเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลเกี่ยวกับสารเคมีที่มีการปรับปรุงฐานข้อมูลให้เป็นปัจจุบันอยู่เสมอ

เอกสารอ้างอิง

ฐิติวรดา ทองเสนา. 2564. การประยุกต์ Python เพื่อคำนวณพารามิเตอร์เพลิงไหม้และระเบิด. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทัศนีย์ เจนบ้านผือ. 2562. การศึกษาสาเหตุและการลดการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตในกระบวนการผลิตเทปฟันสายไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สภาวิศวกร. 2554. ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพ ด้านการออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบและทดสอบการต่อลงดิน. https://blog.rmutl.ac.th/montri/old/download/20120327105753-1.pdf, 19 กันยายน 2565.

Crowl, D.A., Louvar, J.F. 2011. Chemical process safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed., Paul Boger. Westford, Massachusetts, USA. pp. 723.

NFPA 77. 2019. Recommended Practice on Static Electricity. Qunicy Massachusetts, USA

Hu, Y., Wang, D., Liy, J., Gao, L. 2013. A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation. In: 7th international Conference on Applied Electrostatics. Shanghai, China

คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อย

Computer-Aided design of inerting system

บุษกร ปานกลาง[a], ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ[b,*]

Bussakorn Panklang[a], Thongchai Rohitatisha Srinophakun[b,*]

[a]สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengtcs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อย จัดทำขึ้นเพื่อคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อย ในการป้องกันไฟไหม้ โดยพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไพทอน ซึ่งแสดงผลออกมาเมื่อรับข้อมูลจากผู้ใช้งานและทำการคำนวณ โดยแยกการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือการคำนวณในภาชนะป้องกันและการคำนวณในห้องป้องกัน ซึ่งผลลัพธ์สุดท้าย จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการดับเพลิง ผลการทดสอบโปรแกรม เปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณจากหนังสือ Crowl and Louvar (2011) และการคำนวณจากกรณีศึกษาของงานวิจัยการพัฒนาโปรแกรมออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซเฉื่อยด้วย Microsoft Excel (ถนอมศักดิ์ และสุภัทร, 2560) พบว่า ผลการคำนวณมีค่าที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งไนโตรเจนเป็นสารดับเพลิงประเภทก๊าซเฉื่อย ที่มีมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับจากสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ แต่ถ้าผู้ออกแบบไม่มีประสบการณ์เพียงพอ อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบก๊าซเฉื่อย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยนี้ ช่วยทำให้เกิดความถูกต้องและน่าเชื่อถือ อีกทั้งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ก๊าซไนโตรเจน, ความปลอดภัย, ภาษาไพทอน, ระบบก๊าซเฉื่อย, ระบบสารสะอาดดับเพลิง

Abstract

Computer-Aided Design of Inerting System was made to calculating the design of inertial systems, to preventing fires by using a python-language computer program. The program displayed the results as a data from users was received and calculated by separating into two parts which are the calculation in protective container and the protective room. At last, the final result is the amount of nitrogen gas used in the firefighting. The program was tested by comparing the results from Crowl and Louvar (2011) book and the calculation based on case study of research on the development of inert gas fire suppression system by Microsoft Excel (Thanomsak and Suphat, 2017). It showed an acceptable result. Nitrogen is an inert gas fire extinguishing agent with standards recognized by the National Fire Protection Association. But if the program designer does not have enough experience, it would affect the performance of inertial system. The program will help to achieve accuracy and reliability. It can also be adapted for making more effectively study.

Keywords: Fire Extinguishing System, Inerting System, Nitrogen Gas, Python, Safety

คำนำ

อัคคีภัยเป็นสาธารณภัยอย่างหนึ่งซึ่งไม่มีผู้ใดประสงค์ให้เกิด การเกิดอัคคีภัยประกอบด้วยสามเงื่อนไข ได้แก่ เชื้อเพลิง ออกซิเจน และแหล่งกำเนิดประกายไฟ ถ้าเงื่อนไขใดถูกกำจัดออก จะทำให้ไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้ (ฐิติวรดา, 2564) ดังนั้นระบบก๊าซเฉื่อยจึงถูกใช้โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความโดดเด่นในด้านลดสัดส่วนของก๊าซออกซิเจน ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดไฟไหม้ได้ โดยไนโตรเจนเป็นสารดับเพลิงก๊าซเฉื่อย ที่ได้รับการยอมรับ เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ และไม่ทิ้งสารตกค้างหลังการดับเพลิง (NFPA, 2001)

บทความนี้ได้แยกการคำนวณสมการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยเป็น 2 ส่วน คือการคำนวณในภาชนะป้องกัน ใช้สมการจากหนังสือ Crowl and Louvar (2011) และการคำนวณในห้องป้องกันใช้สมการจากหนังสือคู่มือการออกแบบระบบดับเพลิงก๊าซไนโตรเจน สำหรับวิศวกร (วริทธิ์, 2547) จากนั้นทำการทดสอบโปรแกรมโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณระบบเฉื่อยในภาชนะป้องกันจากหนังสือ Crowl and Louvar (2011) จำนวน 9 ตัวอย่างและผลการคำนวณระบบเฉื่อยในห้องป้องกันจากกรณีศึกษาของงานวิจัยการพัฒนาโปรแกรมออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซเฉื่อยด้วย Microsoft Excel (ถนอมศักดิ์ และสุภัทร, 2560) จำนวน 1 ตัวอย่าง ซึ่งจะสามารถคำนวณหาจำนวนก๊าซไนโตรเจนที่ต้องใช้ในระบบได้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยนี้ เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาไพทอน ที่ง่ายต่อการศึกษา ใช้เวลาในการเขียนโปรแกรมสั้น และนำมาใช้งานได้หลากหลาย (ภัทร, 2565) ทำให้การคำนวณออกแบบระบบเกิดความถูกต้องและน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

ทฤษฎีการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบเฉื่อย

1. ทฤษฎีคำนวณระบบก๊าซเฉื่อยในภาชนะป้องกัน ใช้สมการคำนวณจากหนังสือ Crowl and Louvar (2011) มี 5 เทคนิคที่ใช้ในการลดสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนในภาชนะป้องกันด้วย Inerting System แสดงใน Table 1

Table 1 Inert gas system in protective container

Technique of Inerting System	Equation	
1. Vacuum Purging	$y_j = y_0(\frac{n_L}{n_H})^j = y_0(\frac{P_L}{P_H})^j$	(1)
2. Pressure Purging	$\Delta n_{N_2} = j(P_H - P_L)(\frac{V}{R_g T})$	(2)
3. Combined Pressure-Vacuum Purging	$y_0 = 0.21(\frac{P_0}{P_H})$	(3)
4. Vacuum and Pressure Purging with Impure Nitrogen	$(y_j - y_{oxy}) = \left(\frac{P_L}{P_H}\right)^j (y_0 - y_{oxy})^y$	(4)
5. Sweep-Through Purging	$Q_v t = V \ln\left(\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0}\right)$	(5)

ดัดแปลงจาก (Crowl and Louvar, 2011)

อธิบายความหมายของตัวแปร ดังนี้

y_j	ความเข้มข้นออกซิเจนสุดท้าย	(%)	y_{oxy}	ความเข้มข้นออกซิเจนเข้าระบบ	(%)
y_0	ความเข้มข้นออกซิเจนเริ่มต้น	(%)	$Q_V t$	อัตราการการฟอกด้วยก๊าซไนโตรเจน	(ft^3/hr)
n_L	จำนวนโมลทั้งหมดที่สภาวะเริ่มต้น	(moles)	C_1	ความเข้มข้นออกซิเจนเริ่มต้น	(%)
n_H	จำนวนโมลทั้งหมดที่สภาวะสุดท้าย	(moles)	C_2	ความเข้มข้นออกซิเจนสุดท้าย	(%)
P_L	ความดันเริ่มต้น	(psia)	C_0	ความเข้มข้นออกซิเจนเข้าระบบ	(%)
P_H	ความดันที่เพิ่มขึ้น	(psia)	V	ปริมาตรภาชนะบรรจุ	(ft^3)
j	จำนวนรอบ	(purges)	T	อุณหภูมิ	(°R)
Δn_{N_2}	จำนวนก๊าซไนโตรเจน	(lb-moles)	t	เวลา	(hr)

2. ทฤษฎีคำนวณระบบก๊าซเฉื่อยในห้องป้องกัน ใช้คู่มือการออกแบบระบบดับเพลิงก๊าซไนโตรเจน สำหรับวิศวกร การออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยดับเพลิงแบบฉีดครอบคลุมทั่วทั้งห้อง (Total Flooding Systems) แสดงใน Table 2

Table 2 Inert gas system in protective room

Parameter of Total Flooding Systems	Equation	
1. Quantity of fire extinguishers	$CLY = \frac{Q}{V_{N_2}}$	(6)
2. Total quantity of inert gas	$Q(total) = CLY \times V_{N_2}$	(7)
3. Quantity of nozzle	$N = \frac{\text{protection area } (m^2)}{\text{Protection area per nozzle} (m^2)}$	(8)
4. Flow rate	$\dot{Q} = \frac{Q(total)}{t} \times 0.95$	(9)
5. Flow rate of nozzle	$\dot{Q}_n = \frac{\dot{Q}}{N}$	(10)
6. Concentration of the oxygen gas	$C = \{1 - \exp[-\frac{Q(total)}{V}]\}$	(11)
7. Concentration of the oxygen gas	$C_{ox} = 21 \times (\frac{100 - C}{100})$	(12)

ดัดแปลงจาก (วริทธิ์, 2547)

อธิบายความหมายของตัวแปร ดังนี้

CLY	จำนวนถังดับเพลิง	(unit)	$\dot{Q}$	อัตราการไหลสารก๊าซเฉื่อยทั้งหมด	(m^3/min)
Q	ปริมาตรของสารก๊าซเฉื่อยดับเพลิง	(m^3)	$\dot{Q}_n$	อัตราการไหลสารก๊าซเฉื่อยที่หัวฉีด	(m^3/min)
N	จำนวนหัวฉีดสารดับเพลิงทั้งหมด	(Nozzle)	C_{ox}	ความเข้มข้นของสารออกซิเจน	(%O_2)
V_{N_2}	ปริมาตรถังดับเพลิง	(m^3)	C	ความเข้มข้นของก๊าซเฉื่อย	(%N_2)

ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม

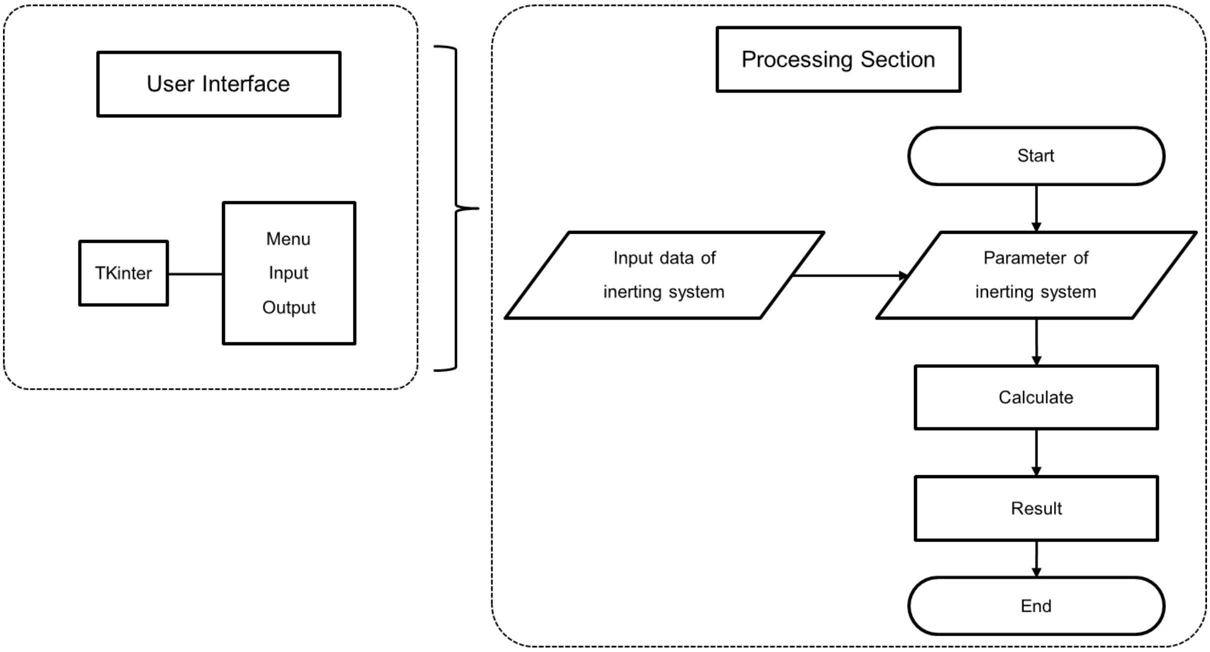


Fig. 1 Program Development Process

การพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษาไพทอน

ภาษาไพทอน เป็นภาษาโปรแกรมที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานง่าย การแปลงคำสั่งที่เขียนด้วยภาษาไพทอน คือการแปลงคำสั่งทีละบรรทัด เพื่อป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ การใช้ภาษาไพทอนพัฒนาโปรแกรมจะถูกเรียกว่า Integrated Development Environment หรือ IDE (ภัทร, 2565) โดยใช้ IDE Jupyter notebook & Python ให้คำนวณและแสดงผลในรูปแบบระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้คำสั่ง TKinter เป็นการนำสมการคำนวณใส่ในโปรแกรม เพื่อให้สามารถป้อนข้อมูลเข้าและแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลข (University of Cape Town, 2017)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อเริ่มต้นโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างหลัก ดังแสดงใน Fig. 2 ผู้ใช้งานสามารถเลือกหัวข้อที่ต้องการคำนวณให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์การออกแบบระบบก๊าซเฉื่อย ได้แก่ การคำนวณในห้องป้องกันและการคำนวณในภาชนะป้องกัน จากนั้นโปรแกรมจะนำไปสู่ หน้าต่างนำเข้าข้อมูลเพื่อทำการการคำนวณ ดังแสดงใน Fig. 3 และ Fig. 4 ตามลำดับ หลังจากกดปุ่มการคำนวณ ผู้ใช้งานจะได้ผลลัพธ์ของการคำนวณจากโปรแกรม

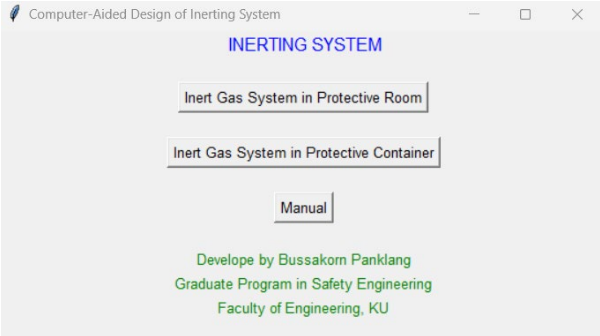


Fig. 2 Graphical User Interface of Inerting System

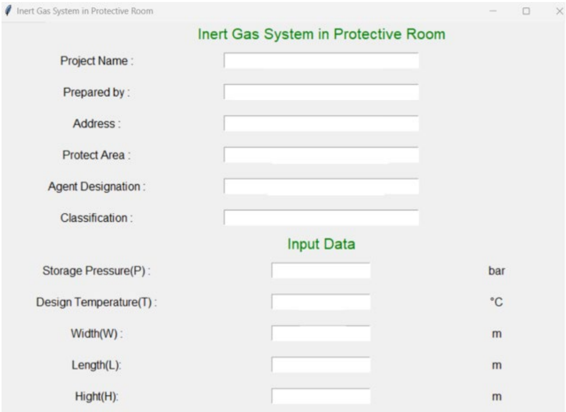


Fig. 3 Inert Gas System in Protective Room

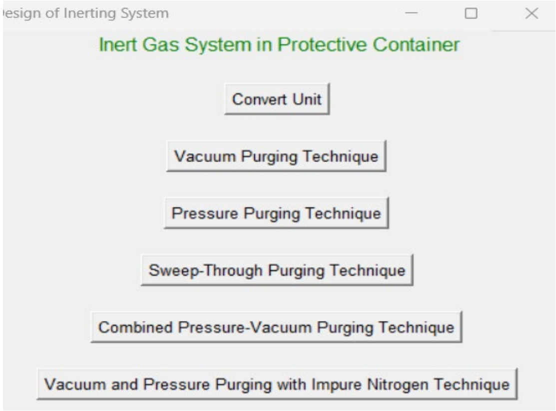


Fig. 4 Inert Gas System in Protective Container

1. การแสดงผลการคำนวณในภาชนะป้องกันเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณจากปัญหาท้ายบทที่ 7 ในหนังสือ Crowl and Louvar, 2011. : Inerting ดังแสดงใน Table 3 และ Fig. 5

1.1 ปัญหาท้ายบทที่ 7: ใช้วิธีการ Sweep-Through Purging เพื่อทำการเฉื่อย ในภาชนะขนาด 100 แกลลอน จนกว่าความเข้มข้นของออกซิเจนเท่ากับ 1% ต้องใช้ไนโตรเจนบริสุทธิ์ในปริมาตรเท่าใด ที่อุณหภูมิ 77 °F

Table 3 Result of Inert gas system in protective container from Excel and Python program

Calculation techniques: Sweep-Through Purging

No.	Parameter	Variable	Method	Unit	Excel Calculation	Python	%Error
1	The initial oxygen concentration	C_1	input	%	21	21	0.00
2	The final oxygen concentration	C_2	input	%	1	1	0.00
3	The oxygen concentration in the system	C_0	input	%	0	0	0.00
4	Volume of container	V	input	ft^3	13.40	13.40	0.00
5	Volume of inert gas	Qvt	Calculate	ft^3/hr	40.80	40.80	0.00

หน้าต่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อย แสดงผลคำนวณใช้เทคนิค Sweep-Through Purging

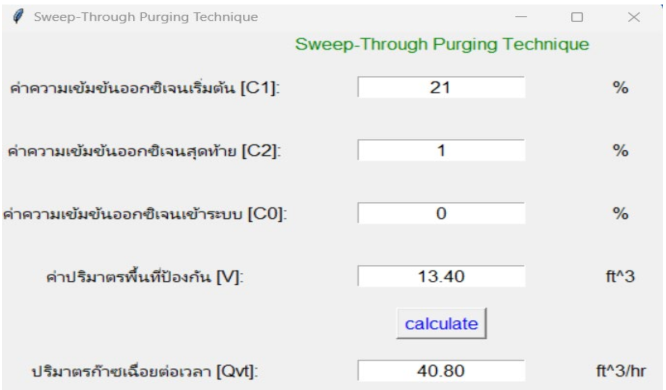


Fig. 5 Result of Inert gas system in protective container from Python program

จากการนำโปรแกรมไปทดสอบ โดยการคำนวณในภาชนะป้องกันเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณจากปัญหาท้ายบทที่ 7 จากหนังสือ Crowl and Louvar (2011) ใช้เทคนิค Sweep-Through Purging พบว่าต้องใช้ไนโตรเจนบริสุทธิ์

ในปริมาตร 40.80 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง ผลการคำนวณเมื่อเทียบกับการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel พบว่ามีค่าที่สามารถยอมรับได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.00

2. การแสดงผลการคำนวณในห้องป้องกันเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณ: กรณีศึกษาการพัฒนาโปรแกรมออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซเฉื่อยด้วย Microsoft Excel (ถนอมศักดิ์ และสุภัทร,2560) ได้ทำการออกแบบคำระบบก๊าซเฉื่อย ในห้อง MDB Room แบบฉีดครอบคลุมทั่วทั้งห้อง โดยโปรแกรม Microsoft Excel ดังแสดงใน Table 4 จากนั้นจึงนำข้อมูลการออกแบบมาใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไพทอนช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยดังแสดงใน Fig 6

Table 4 Case study by Development of Inert Gas Fire Extinguishing System Design Software Using Excel

Inert Gas System in Protective Room : Case Study							
Project: Kasetsart University				Prepared by: Harn Engineering Solution Company			
Address: Bangkok				Protect Area: MDB Room			
Agent Designation: IG-100 (Nitrogen)				Classification: Class C			
No.	Parameter	Variable	Method	Unit	Excel Calculation	Python	%Error
1	Storage Pressure	P	input	bar	300	300	0.00
2	Design Temperature	T	input	℃	15	15	0.00
3	Width	W	input	m	6.50	6.50	0.00
4	Length	L	input	m	8.35	8.35	0.00
5	Hight	H	input	m	5.71	5.71	0.00
6	Quantity of fire extinguishers	CLY	Calculate	-	7.97	7.97	0.00
7	Total quantity of inert gas	Q(total)	Calculate	kg	198.57	198.57	0.00
8	Quantity of nozzle	N	Calculate	nozzle	4.00	4.00	0.00
9	Flow rate	$\dot{Q}$	Calculate	m^3/s	1.57	1.57	0.00
10	Flow rate of nozzle	$\dot{Q}_n$	Calculate	m^3/s	0.39	0.39	0.00
11	Concentration of the inert gas	C	Calculate	%	47.31	47.31	0.00
12	Concentration of the oxygen gas	C_{ox}	Calculate	% O_2	11.07	11.07	0.00

ดัดแปลงจาก (ถนอมศักดิ์ และสุภัทร, 2560)

หน้าต่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบเฉื่อย แสดงผลการคำนวณระบบก๊าซเฉื่อยในห้องป้องกันแบบฉีดครอบคลุมทั่วทั้งห้อง MDB Room

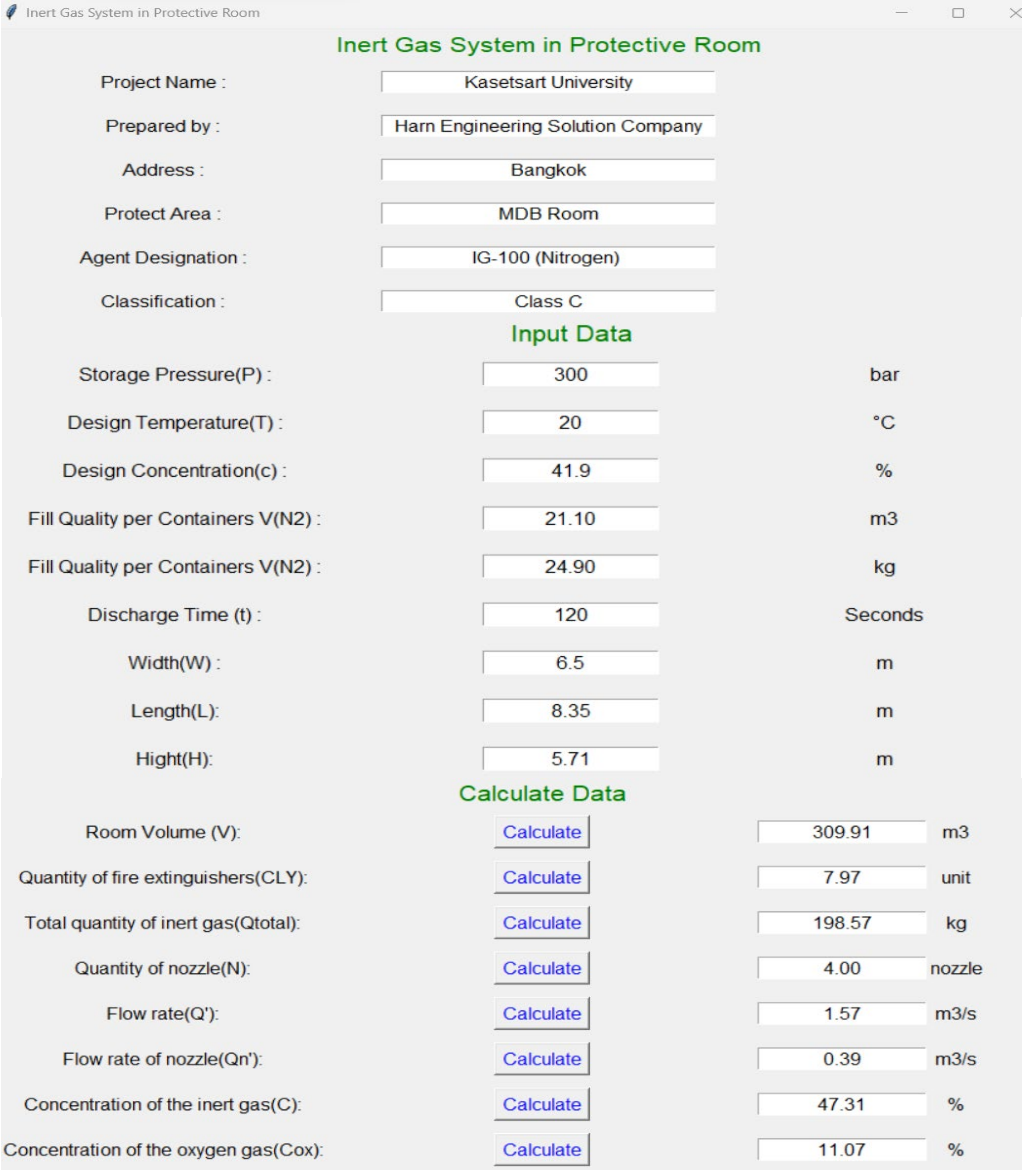


Fig. 6 Result of Inert gas system in protective room from Python program

จากการนำโปรแกรมไปทดสอบ โดยการคำนวณในห้องป้องกันเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณจาก ตัวอย่างกรณีศึกษาการพัฒนาโปรแกรมออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซเฉื่อยด้วย Microsoft Excel (ถนอมศักดิ์ และสุภัทร, 2560) พบว่าจำนวนถังดับเพลิงที่ต้องใช้ คือ 8 ถัง (7.97 ถัง) ต้องใช้ไนโตรเจนบริสุทธิ์ 198.59 กิโลกรัม จำนวนหัวฉีด (Nozzle) คือ 4 หัวฉีด อัตราการไหลในท่อ 1.57 m^3/s อัตราการไหลที่หัวฉีด (Nozzle) คือ 0.39 m^3/s ความเข้มข้นของก๊าซเฉื่อยที่เกิดขึ้นจริงหลังการฉีด คือ 47.31% ความเข้มข้นของสารออกซิเจน ในห้อง คือ 11.06 %

ผลการคำนวณในส่วนของการคำนวณหาจำนวนก๊าซไนโตรเจนที่ต้องใช้ในระบบ มีค่าที่สามารถยอมรับได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.00

สรุป

บทความนี้นำเสนอ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไพทอน และสร้าง Graphic User Interface (GUI) ช่วยในการคำนวณการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อย โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณระบบก๊าซเฉื่อยในภาชนะป้องกันจาก หนังสือ Crowl and Louvar (2011) จำนวน 9 ตัวอย่าง และผลการคำนวณระบบก๊าซเฉื่อยในห้องป้องกันจากกรณีศึกษา ของงานวิจัยการพัฒนาโปรแกรมออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซเฉื่อยด้วย Microsoft Excel (ถนอมศักดิ์ และสุภัทร, 2560) จำนวน 1 ตัวอย่างเมื่อดำเนินการตามขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมที่ได้กำหนดไว้ พบว่าสามารถช่วยปรับปรุงการ คำนวณและการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยได้ผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมภาษาไพทอน พิจารณาได้จากส่วน ของการคำนวณหาจำนวนก๊าซไนโตรเจนที่ต้องใช้ในระบบเมื่อเทียบกับการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ร้อยละ 0.00 ดังนั้นคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยนี้จึงสามารถนำไปใช้ใน การคำนวณและช่วยในการออกแบบระบบก๊าซเฉื่อยได้ปลอดภัยมากยิ่งขึ้น และนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการเรียน การสอนตามหลักวิศวกรรม เรื่องระบบก๊าซเฉื่อยและการเขียนภาษาไพทอนได้ แต่โปรแกรมยังขาดขั้นตอนในการออกแบบ ตำแหน่งการวางถังสารดับเพลิง แนวการเดินท่อ ดังนั้นควรพัฒนา เพื่อให้สามารถรองรับการออกแบบดังกล่าวได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาสาขาวิศวกรรมความปลอดภัย และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ฐิติวรดา ทองเสนา. 2564. การประยุกต์ Python เพื่อคำนวณพารามิเตอร์เพลิงไหม้และระเบิด. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถนอมศักดิ์ และสุภัทร. 2560. เรื่องการพัฒนาโปรแกรมออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซเฉื่อยด้วย Microsoft Excel. การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภัทร ลีลาพฤทธิ์. 2565. การเขียนโปรแกรมภาษาไพทอนด้วยการเรียนรู้ด้วยตนเอง. https://www.cpe.ku.ac.th/~pattara/204111/pattara_python_book.pdf, 23 พฤศจิกายน 2565.

วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์. 2547. คู่มือการออกแบบระบบดับเพลิงก๊าซไนโตรเจนสำหรับวิศวกร. สมาคมวิศวกรรม ปรับอากาศแห่งประเทศไทย.

Crowl, D.A., Louvar, J.F. 2011. Chemical process safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed., Paul Boger. Westford, Massachusetts. USA. pp. 723.

NFPA 2001. 2015. Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System. Qunicy, Massachusetts, USA.

Siemens Products. 2005. Cerexen N2/ Ar Automatic extinguishing Systems. Schweiz AG.

University of Cape Town. 2017. Object-Oriented Programming in Python Documentation. https://readthedocs.org/projects/python-textbok/downloads/pdf/1.0, 8 ธันวาคม 2565.

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การติดไฟและการระเบิด

Computer program for flammability and explosion analysis

ปวิตรา จำปาสัก[a], **ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ**[b,*]

Pawitra Jumpasak[a], Thongchai Rohitatisha Srinophakun[b,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengtcs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้จัดทำขึ้นเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของไฟ การจุดติดไฟ และการระเบิดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไพทอนคำนวณพารามิเตอร์การติดไฟและการระเบิด และแสดงแผนภาพความไวไฟผ่านระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานและคอมพิวเตอร์ (Graphic User Interface, GUI) ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนด้านการวิเคราะห์การจุดติดไฟและการระเบิด และใช้ในการออกแบบกระบวนการผลิต ตลอดจนการประยุกต์ใช้ข้อมูลในการประเมินความเสี่ยงในกระบวนการผลิต เพื่อเตรียมพร้อมรับมือกับเหตุการณ์เพลิงไหม้และการระเบิดของอุตสาหกรรมเคมี หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ในการศึกษาครั้งนี้ผู้จัดทำคำนวณตัวอย่างและแบบฝึกหัดจากหนังสือ Chemical Process Safety Fundamentals with Applications จำนวน 22 ข้อ เช่น การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของออกซิเจน และเชื้อเพลิงจากแผนภาพความไวไฟ และการคำนวณแรงดันเกินจากการระเบิด พบว่าโปรแกรมให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณมือ

คำสำคัญ: การเกิดเพลิงไหม้และระเบิด, โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไพทอน, แผนภาพความไวไฟ

Abstract

In this study, the python programming language for calculating flammability and explosion parameters and shows a flammability diagram also other data. Users can use this program as Graphic User Interface (GUI) which is user-friendly and provide accurate and reliable results. Furthermore, users can apply results and data for improving the study of ignition and explosion analysis. And use to design the production process to be safe and assess hazard risks in the production process. To prevent fires and explosions in the chemical industry or related industries. The results of the python program calculated 22 problems from the Chemical Process Safety Fundamentals with Applications book, examples of oxygen and fuel concentration from the flammability diagram and overpressure were accurate when compared with manual calculation.

Keywords: Fires and Explosions, Flammability Diagram, Python

คำนำ

จากสถิติการเกิดอุบัติเหตุในอุตสาหกรรมเคมี เช่น โรงงานสารเคมี โรงงานผลิตปุ๋ยเคมี โรงกลั่นน้ำมัน โรงกลั่นปิโตรเคมี และโรงงานพลาสติก พบว่า ร้อยละ 80–85 คือ เหตุการณ์เพลิงไหม้และการระเบิด (กองส่งเสริมเทคโนโลยีความปลอดภัยโรงงาน, ม.ป.ป.) เนื่องจาก ใช้สารเคมีเป็นตัวตั้งต้นในการผลิตซึ่งสารส่วนใหญ่มีคุณสมบัติในการติดไฟ จึงมีความเสี่ยงสูงในการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติของสารเคมี องค์ประกอบของไฟ การจุดติดไฟ และการลามไฟนับเป็นความรู้ที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบกระบวนการผลิต และการควบคุมการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด ในการศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์องค์ประกอบของไฟ และการจุดติดไฟ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไพทอนคำนวณพารามิเตอร์การติดไฟและการระเบิด และแสดงแผนภาพความไวไฟผ่านระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานและคอมพิวเตอร์ (Graphic User Interface, GUI) โดยไพทอน (Python) เป็นภาษาแบบ interpreter ที่ถูกออกแบบโดยมีวัตถุประสงค์ในการทำให้โค้ดอ่านง่าย และในปัจจุบันมีไลบรารีมาตรฐานจำนวนมาก เช่น ไลบรารีสำหรับคณิตศาสตร์ และไลบรารีสำหรับสร้างระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานและคอมพิวเตอร์ (GUI) (ฐิติวรดา, 2564; ปาวิสา, 2564; ศรายุทธ, ม.ป.ป.) ส่งผลให้สามารถพัฒนาโปรแกรมในส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้มีความสวยงาม และสามารถใช้งานได้สะดวก ผู้ใช้โปรแกรมสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนด้านการวิเคราะห์การจุดติดไฟและการระเบิด และใช้ในการออกแบบกระบวนการผลิต ตลอดจนการประยุกต์ใช้ข้อมูลในการประเมินความเสี่ยงในกระบวนการผลิต เพื่อเตรียมพร้อมรับมือกับเหตุการณ์เพลิงไหม้และการระเบิดของอุตสาหกรรมเคมี หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาทฤษฎีและวิธีการคำนวณพารามิเตอร์การติดไฟและการระเบิด

1. องค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้เกิดการจุดติดไฟ ได้แก่ เชื้อเพลิง (Fuel) ตัวสันดาป (Oxidizer) และพลังงานความร้อน (Heat) องค์ประกอบเหล่านี้แสดงโดยรูปสามเหลี่ยมไฟ (Fire Triangle) ซึ่งวัตถุสามารถเผาไหม้ได้ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส และตัวสันดาป คือ ออกซิเจน ซึ่งในอากาศประกอบด้วย ออกซิเจน ร้อยละ 21 และไนโตรเจน ร้อยละ 79 โดยปริมาตร และใช้ความร้อนในการเปลี่ยนสถานะของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไอ พร้อมทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและออกซิเจนสูงเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาเคมีได้ (Crowl and Louvar, 2011)

2. ขีดจำกัดความสามารถในการติดไฟ (Flammability Limits) คือ ช่วงของความเข้มข้นของก๊าซ หรือไอระเหยในอากาศที่สามารถทำให้เกิดประกายไฟในที่ที่มีแหล่งกำเนิดประกายไฟ โดยต้องมีค่าอยู่ในช่วงขีดจำกัดล่าง (Lower Flammable Limit, LFL) และขีดจำกัดบน (Upper Flammable Limit, UFL) หากมีความเข้มข้นสูง หรือต่ำเกินไปก็จะไม่ติดไฟ (Crowl & Louvar, 2011) สามารถคำนวณ LFL_{mix} ตาม Equation 1 และ UFL_{mix} ตาม Equation 2:

$$LFL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{y_j}{LFL_i}} \quad (1) \qquad UFL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{y_j}{UFL_i}} \quad (2)$$

โดยที่ LFL_i คือ ขีดจำกัดล่างในการติดไฟของสาร i (volume %)

UFL_i คือ ขีดจำกัดบนในการติดไฟของสาร i (volume %)

y_j คือ เศษส่วนโมลของของสาร i

n คือ จำนวนสารที่ติดไฟ

3. กลไกการจุดติดไฟของเชื้อเพลิง

การจุดติดไฟเป็นกระบวนการเริ่มต้นของการเผาไหม้ โดยการเผาไหม้แบบมีเปลวไฟ เชื้อเพลิงต้องอยู่ใน สถานะ

แก๊สจึงจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนได้ และต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ประกอบด้วย

1) ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในแก๊สผสมอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เช่น อยู่ในช่วงติดไฟได้ จะเรียกแก๊สผสมนี้ว่า “แก๊สผสมติดไฟได้ (flammable mixture)” (ณัฐศักดิ์, 2560)

2) อุณหภูมิของแก๊สผสมติดไฟสูงเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจน ซึ่งการจุดติดไฟมี 2 ลักษณะ ประกอบด้วย การจุดติดไฟแบบไพล็อต (piloted ignition) และการจุดติดไฟด้วยตัวเอง (autoignition) โดยการจุดติดไฟแบบไพล็อตเกิดขึ้นจากการถูกเหนี่ยวนำจากพลังงานภายนอกทำให้อุณหภูมิของแก๊สผสมติดไฟสูงขึ้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ในทางตรงข้ามหากอุณหภูมิของแก๊สผสมติดไฟสูงเพียงพอ การจุดติดไฟนั้นสามารถเกิดขึ้นเองได้โดยไม่ต้องอาศัยการเหนี่ยวนำจากแหล่งพลังงานภายนอก (ณัฐศักดิ์, 2560)

4. แผนภาพความไวไฟ (Flammability Diagram)

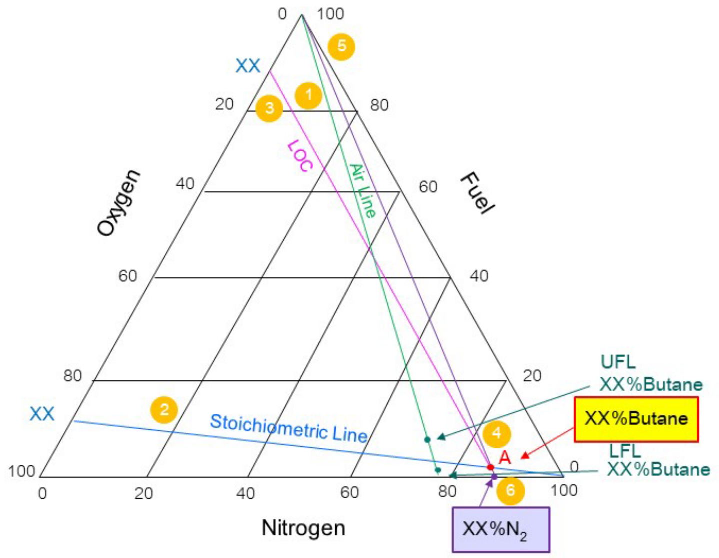


Fig. 1 Flammability Diagram

จาก Fig. 1 สามารถอธิบายขั้นตอนการวาดแผนภาพความไวไฟ ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ลากเส้นกราฟ Air Line จากค่า 100% บนแกน Fuel มาตัดกับแกน Nitrogen เพื่อสร้าง Flammability Limits

ขั้นตอนที่ 2 ลากเส้นกราฟ Stoichiometric Line บนแกน Oxygen ตามค่าที่ได้จากการคำนวณใน Equation 3:

$$\text{Stoichiometric Point} = 100\left(\frac{z}{1+z}\right) \quad (3)$$

โดยที่ Stoichiometric Line คือ ค่าความเข้มข้นของออกซิเจน (vol. %)

z คือ จำนวนโมลของออกซิเจน

ขั้นตอนที่ 3 ลากเส้นกราฟ LOC ตัดกับเส้นกราฟ Stoichiometric Line ที่จุด A เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารเคมี

ขั้นตอนที่ 4 อ่านค่า A บนแกน Fuel จะได้ค่า A คือ ความเข้มข้นของสารเคมี

ขั้นตอนที่ 5 ลากเส้นกราฟจากค่า 100% บนแกน Fuel ตัดกับจุด A และแกน Nitrogen
ขั้นตอนที่ 6 อ่านค่าบนแกน Nitrogen จะได้ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจน (N_2)
ขั้นตอนที่ 7 สามารถหาค่าความเข้มข้นของออกซิเจน (O_2) จาก Equation 4:

$$O_2 = 100 - N_2 \quad (4)$$

โดยที่ O_2 คือ ค่าความเข้มข้นของออกซิเจน (vol. %)
N_2 คือ ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจน (vol. %)

5. การระเบิด (Explosion) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1) การระเบิดแบบ Detonation คือ ปฏิกิริยาที่เคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วเสียง ก่อให้เกิดคลื่นกระแทกด้านหน้าบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างกะทันหัน ส่งผลให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรง (Crowl and Louvar, 2011)

2) การระเบิดแบบ Deflagration คือ ปฏิกิริยาที่เคลื่อนที่ช้ากว่าความเร็วเสียง และก่อให้เกิดคลื่นกระแทกในระยะที่ห่างจากจุดที่เกิดปฏิกิริยาจึงมีความรุนแรงน้อยกว่าการระเบิดแบบ Detonation (Crowl and Louvar, 2011)

6. ความเสียหายจากการระเบิดเนื่องจากแรงดันเกิน การระเบิดของก๊าซไวไฟ หรือฝุ่นระเบิด ส่งผลให้เกิดคลื่นกระแทกด้านหน้าบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา หรือแหล่งประกายไฟ เมื่อการเผาไหม้สิ้นสุดลงแต่ยังคงมีคลื่นกระแทกเนื่องจากแรงดันส่งผลให้เมื่อเกิดระเบิดขึ้นจะส่งผลกระทบที่รุนแรงและเกิดความเสียหายมากกว่าการเกิดเพลิงไหม้ปกติ (Crowl and Louvar, 2011) สามารถคำนวณความเสียหายจากการระเบิดเนื่องจากแรงดันเกินจากการคำนวณระยะระเบิดตาม Equation 5:

$$Z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}} \quad (5)$$

โดยที่ Z_e คือ ระยะระเบิด (m/kg$^{-1/3}$)
m_{TNT} คือ มวลเทียบเท่าของ TNT (kg)
r คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการระเบิด (m)

การออกแบบโปรแกรมภาษาไพทอนสำหรับคำนวณพารามิเตอร์การติดไฟและการระเบิด

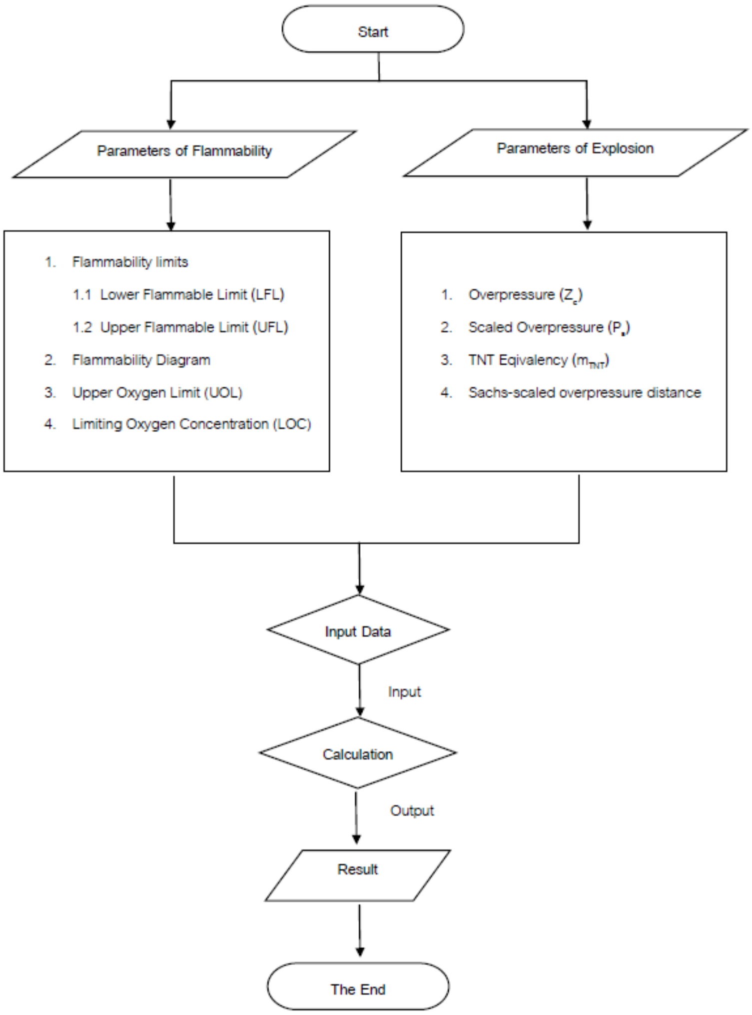


Fig. 2 Computer program for calculating flammability and explosion parameters

ผลและวิจารณ์

การสร้างโปรแกรมโดยประยุกต์ใช้ภาษาไพทอน (Python) และระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานและคอมพิวเตอร์ (Graphic User Interface, GUI) สำหรับคำนวณตัวอย่างและแบบฝึกหัดที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์การติดไฟและการระเบิดจำนวน 22 ข้อ จากหนังสือ Chemical Process Safety Fundamentals with Applications เมื่อผู้ใช้งานเริ่มใช้โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง GUI ดังแสดงใน Fig. 3 เพื่อดำเนินการป้อนข้อมูลสำหรับคำนวณพารามิเตอร์การติดไฟและการระเบิด โดยผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น จำนวนโมลของสารเคมี ขีดจำกัดความสามารถในการติดไฟของสารเคมี ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการระเบิด เป็นต้น โปรแกรมจะคำนวณพารามิเตอร์ดังกล่าว และแสดงผลการคำนวณที่ถูกต้องและแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณมือ

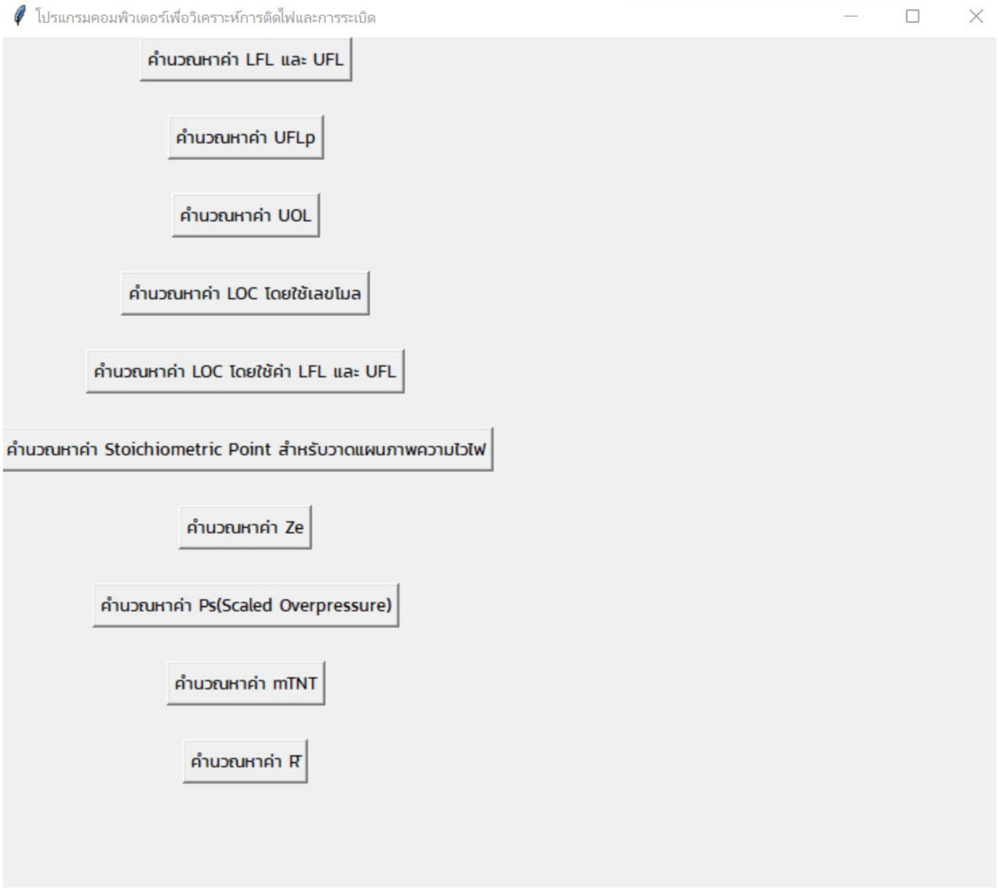


Fig. 3 Graphic User Interface (GUI) for calculating Flammability and Explosion Parameters

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อสร้างแผนภาพความไวไฟ (Flammability Diagram)

วาดแผนภาพความไวไฟสำหรับบิวเทน (n-butane) โดยกำหนด ค่า LOC เท่ากับ 12% จากกราฟให้หาความเข้มข้นของออกซิเจนและความเข้มข้นของบิวเทนที่ลดลง ก่อนจะเริ่มกระบวนการส่งออกบิวเทนทางท่อ

กำหนดค่า LOC = 12% , ค่า LFL = 1.8%, ค่า UFL = 8.5% จาก Appendix B ในหนังสือ Chemical Process Safety Fundamentals with Applications

$$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$$

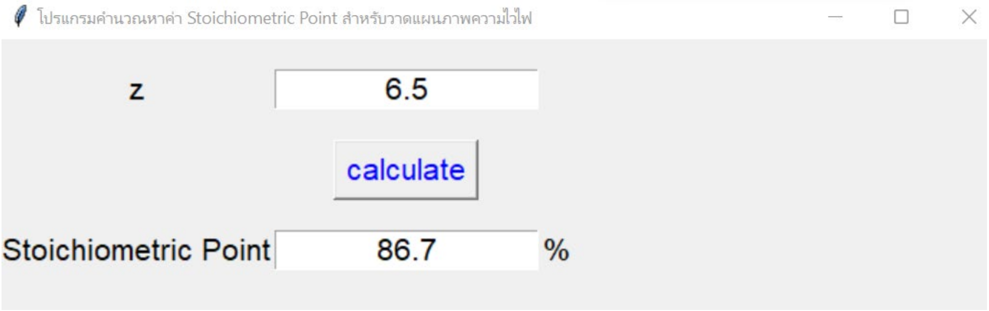


Fig. 4 Example of Graphic User Interface for Flammability Diagram

เริ่มต้นใช้งานโปรแกรม โดยป้อนข้อมูลจำนวนโมลออกซิเจน z เท่ากับ 6.5 โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณค่า Stoichiometric Point เท่ากับ 86.7% จากการคำนวณตาม Equation 3 และนำค่าที่ได้ไปวาดแผนภาพความไวไฟตามขั้นตอนที่ได้แสดงในหัวข้อ 4. แผนภาพความไวไฟ (Flammability Diagram) จะได้แผนภาพความไวไฟดัง Fig. 5 ซึ่ง

จากภาพสามารถอ่านค่าความเข้มข้นของบิวเทนเท่ากับ 3.8% ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับ 87.8% และคำนวณค่าความเข้มข้นของออกซิเจนตาม Equation 4 ได้เท่ากับ 12.2%

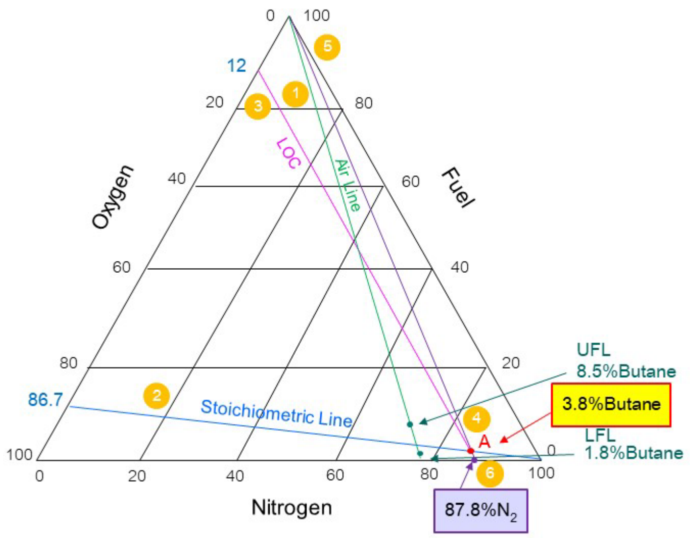


Fig. 5 Example of Flammability Diagram

ตัวอย่างการคำนวณระยะระเบิดและแรงดันเกินจากการระเบิด

จากการระเบิดของวัตถุ 1 kg. ให้หาแรงดันเกินจากการระเบิดที่มีระยะระเบิดจากศูนย์กลางเท่ากับ 30 m.

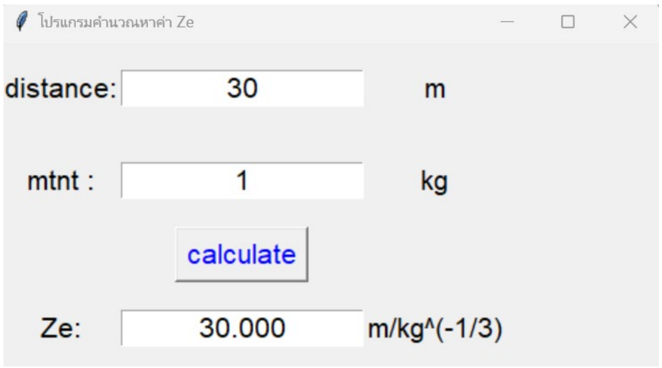


Fig. 6 Example of graphic user interface for scaled distance

เริ่มต้นใช้งานโปรแกรม โดยป้อนข้อมูลระยะระเบิดจากศูนย์กลางเท่ากับ 30 m. และค่ามวลเทียบเท่าของ TNT เท่ากับ 1 kg. โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณระยะระเบิด (Scaled Distance, Z_e) เท่ากับ 30 m/kg$^{-1/3}$ จากการคำนวณตาม Equation 5 ดัง Fig. 6 จากนั้นนำค่าไปอ่านบนกราฟจากภาพที่ 6-23 ในหนังสือ Chemical Process Safety Fundamentals with Applications จะได้ค่าแรงดันเกินจากการระเบิดเท่ากับ 0.055 โดยในความดันบรรยากาศปกติที่ 1 atm จะมีค่าแรงดันเกินเท่ากับ (0.055 × 101.3 kPa) = 5.6 kPa

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในบทความนี้ สรุปได้ว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การติดไฟและการระเบิดช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถคำนวณพารามิเตอร์การจุดติดไฟและการระเบิดได้รวดเร็ว และสามารถใช้งานโปรแกรมได้ง่าย โดยจาก

การคำนวณตัวอย่างและแบบฝึกหัดทั้งหมด 22 ข้อ โปรแกรมให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยมือ สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนด้านการวิเคราะห์การจุดติดไฟและการระเบิด และการออกแบบกระบวนการผลิต ตลอดจนการประยุกต์ใช้ข้อมูลในการประเมินความเสี่ยงในกระบวนการผลิตเพื่อเตรียมพร้อมรับมือกับเหตุการณ์เพลิงไหม้และการระเบิดในอุตสาหกรรมเคมี หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ในอนาคตผู้ใช้งานสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมอื่น ๆ เช่น การวางแผนการอพยพกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินสารเคมีหกล้น รั่วไหล โดยการใช้โปรแกรม Aloha เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำบทความขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย โครงการปริญญาโท ภาคพิเศษ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กองส่งเสริมเทคโนโลยีความปลอดภัยโรงงาน. ข้อมูลสถิติอุบัติเหตุ ปี 2564. http://reg3.diw.go.th/safety, 16 กรกฎาคม 2565.

ฐิติวรดา ทองเสนา. 2564. การประยุกต์ Python เพื่อคำนวณพารามิเตอร์เพลิงไหม้และระเบิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. พลศาสตร์อัคคีภัย, พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ปาวิสา บุญจูง. 2564. คอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบระบบวาล์วนิรภัยในอุตสาหกรรมเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศรายุทธ นนท์ศิริ. ภาษาโปรแกรม Python คืออะไร ?. https://www.9experttraining.com/articles, 14 กรกฎาคม 2565.

Crowl, D.A., Louvar, J.F. 2011. Chemical process safety, Fundamentals with Applications, 3rd ed., Paul Boger. Westford, Massachusetts, USA. pp. 723.

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางด้วยเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดโดยใช้วิธีทากูชิ

Reduction of molecular weights of rubber using rubber pelletizer and Taguchi technique

เบญจา มุลเสนา[a], ปณิธิ วิรุฬห์พอจิต[b], กรรณิกา หัตถะปะนิตย์[b], นันทิยา หาญศุภลักษณ์[a,c,]*
Benja Mulsena[a], Panithi Wiroonpochit[b], Kannika Hatthapanitand[b], Nanthiya Hansupalak[a,c,]*
[a]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[a]Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ปทุมธานี 12120
[b]National Metal and Materials Technology Center, Pathum Thani 12120, Thailand
[c]ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวัสดุยางและพอลิเมอร์เพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรม ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[c]Specialized Center of Rubber and Polymer Materials for Agriculture and Industry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: fengnyh@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจนำเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดมาใช้บดยางแท่ง STR5L เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลโดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ ตัวแปรคือ อุณหภูมิ ความเร็วของใบมีด และจำนวนครั้งในการป้อนยางกลับเข้าเครื่อง (N) และวัดค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดของยาง ($\overline{M}_v$) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ยางแท่งที่ไม่ผ่านการบดมี $\overline{M}_v = 10^6$ g/mol ผลการวิเคราะห์พบว่า N เท่านั้นที่ส่งผลต่อ $\overline{M}_v$ อย่างมีนัยยะ ($p < 0.05$) และอุณหภูมิส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าความเร็วรอบใบมีด ทั้งสามตัวแปรล้วนส่งผลต่อ $\overline{M}_v$ เชิงลบ สภาวะที่ให้ $\overline{M}_v$ ต่ำที่สุด คือ N = 20 รอบ ที่ 150 °C และ 319 rpm ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลง N ในช่วง 0–60 รอบ (150 °C, 319 rpm) สามารถลดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยได้ประมาณ 100 เท่า

คำสำคัญ: เครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด, น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด, ยางแท่ง SRT5L, วิธีทากูชิ

Abstract

This research aimed at using a rubber pelletizer to masticate STR5L block rubber in order to reduce its molecular weights, using Taguchi's design. The variables were temperature, cutting speed and the number of times feeding rubber back to the pelletizer (N), and the viscosity-average molecular weights of the masticated rubber ($\overline{M}_v$) was measured. It was found that the unmasticated block rubber had a viscosity-average molecular weight ($\overline{M}_v$) of 10^6 g/mol. The analysis revealed that only N significantly affected $\overline{M}_v$ ($p < 0.05$). With Taguchi analysis, it was found that temperature influenced on the molecular weights more than the cutting speed. All three variables showed negative correlation with $\overline{M}_v$. The conditions yielding the lowest $\overline{M}_v$ was N of 20, 150ºC, and 319 rpm. In addition, the change of N in the range of 0–60 (150 ºC, 319 rpm) could reduce $\overline{M}_v$ about 100 times.

Keywords: SRT5L block rubber, Rubber pelletizer, Viscosity-average molecular weight, Taguchi's design

คำนำ

ยางแท่ง STR 5L ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ จึงมีปริมาณสิ่งเจือปนต่ำ ทำให้เป็นยางแท่งที่มีคุณภาพสูงที่สุด เหมาะสำหรับทำผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น ยางล้อรถยนต์ ท่อยางทางการแพทย์ เส้นด้ายยางยืด เป็นต้น ยางแท่งประกอบด้วยพอลิไอโซพรีนเป็นส่วนใหญ่ (ในที่นี้เรียกว่า สายโซ่ยาง) ด้วยน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสายโซ่ยางที่มีค่า 10^6 g/mol (Thuong et al., 2016) ทำให้ยางมีคุณภาพสูง สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมรรถนะสูงได้ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการผสมยาง STR 5L ต้องใช้พลังงานสูงและระยะเวลานานในการผสมยางกับสารตัวเติมให้เข้ากัน (Fries and Pandit, 1982) ในกรณีของกาวยาง ก็พบว่าหากใช้ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะทำให้กาวมี tack property ดีขึ้น เพราะการพันกันของสายโซ่เกิดน้อยลง ส่งผลให้สายโซ่ยางสามารถแผ่ตัวบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น (พิมานจันทน์, 2548) จะเห็นว่าการศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ยางเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการเลือกความยาวสายโซ่ที่เหมาะสมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้นตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

โดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ยางสามารถลดได้ด้วยการบดยาง (Mastication) ซึ่งใช้แรงเฉือนของใบมีดหรือสกรูตัดสายโซ่ยาง การบดยางที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เป็นการตัดสายโซ่ด้วยแรงทางกลมากกว่า ปฏิกิริยาทางเคมี thermo-oxidative ก็เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำนี้ แต่ยังไม่รุนแรงพอที่จะตัดสายโซ่ได้ ความรุนแรงของปฏิกิริยาเคมีนี้จะมากพอเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 130°C โดยประมาณ และยังเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิ (Dimier et al., 2004; Fries and Pandit, 1982) ตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยการบดยาง คือ ขนาดของแรงเฉือนที่ได้รับจากเครื่องบด ความเร็วรอบของใบมีด อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจน (Dimier et al., 2004; Fries and Pandit, 1982) การตัดสายโซ่ด้วยการบดยางนี้ ทำให้ปลายของสายโซ่ยางที่ถูกตัดเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถรวมตัวกันเอง เพื่อกลายเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้นได้ (Dimier et al., 2004; Fries and Pandit, 1982)

โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบดยางจะทำหน้าที่ทั้งบดยางให้นิ่มและผสมยางกับสารตัวเติมไปพร้อม ๆ กัน เช่น เครื่องผสมระบบปิดแบนบูรี่ และเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง เป็นต้น แต่สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆได้ยาก จึงสนใจที่จะใช้เครื่องมือที่มีอยู่แล้วมาลดน้ำหนักโมเลกุลของยางแท่ง STR 5L ซึ่งก็คือเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด (Rubber) ที่ใช้ตัดยางขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งยังไม่เคยมีผู้ใดรายงานมาก่อน ยางที่ป้อนเข้าเครื่องนี้ จะเคลื่อนที่เข้าไปในห้องที่มีสกรูและสามารถปรับอุณหภูมิได้ เพื่อทำให้ยางสามารถไหลออกจากห้องได้ ที่บริเวณทางออกของห้องจะมีใบมีดทำหน้าที่ตัดยาง หากต้องการลดขนาดของยาง ก็ทำได้ด้วยการเพิ่มความเร็วของใบมีดนี้ ดังนั้นตัวแปรที่ศึกษาคืออุณหภูมิ ความเร็วของใบมีด และจำนวนครั้งที่ป้อนยางกลับเข้าเครื่อง ตัวแปรตอบสนองที่สนใจคือน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดของยาง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและสารเคมี

ยางแท่ง STR5L จาก บริษัท เนเชอรัลอาร์ต แอนด์ เทคโนโลยี จำกัด และ โทลูอีน (ความบริสุทธิ์ 99%) จากห้างหุ้นส่วนจำกัด แล็ป วัลเล่ย์ ประเทศไทย สารเคมีทุกชนิดใช้โดยไม่ทำให้บริสุทธิ์เพิ่ม

การออกแบบการทดลองโดยเทคนิคทากุชิ (Taguchi Method)

วิธีทากุชิเป็นวิธีออกแบบการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการใช้แนวแถวตั้งฉาก (Orthogonal array) ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อความแปรปรวนของข้อมูล และหาตัวแปรที่ส่งผลต่อการทดลองมากที่สุดโดยใช้จำนวนการทดลองขั้นต่ำ เพื่อช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากร วิธีทากุชิเหมาะสมกับระบบที่มีจำนวนตัวแปรปานกลาง (3 ถึง 50) (Fraley et al., 2022) ในการศึกษานี้ ตัวแปรที่สนใจประกอบด้วย อุณหภูมิ ความเร็วของใบมีด (Cutting speed) และจำนวนครั้งของ

การป้อนยางกลับเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด (N) โดยออกแบบสภาวะการบดยางด้วยทากุชิ 2 ครั้ง (Table 1) ในการออกแบบครั้งที่ 1 ศึกษา 2 ตัวแปรคือ อุณหภูมิและความเร็วของการบด (กำหนด N = 1) ในการออกแบบครั้งที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิและ N (ใช้ความเร็วของการบดสูงสุด 319 rpm) โดยดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก จะได้รูปแบบการทดลองเป็น L9 (3^2) โดยมีทั้งหมด 2 ตัวแปร แต่ละตัวแปรมี 3 ระดับ แต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง. ยางที่ผ่านการบดตามสภาวะที่ได้ออกแบบจะนำไปวัดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด ($\overline{M}_v$) การวิเคราะห์ทางสถิติทำด้วย Minitab® 19.1 และเลือกอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise) เป็นชนิด Smaller the better เพราะสนใจหาสภาวะที่ทำให้ ได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำสุด

Table 1 Experimental design using the Taguchi method

Experiments	Temperature (°C)	Cutting speed (rpm)	N	$\overline{M}_v$ (g/mol)
	1st Experimental design			
1	100	203	1	2.67×10^6
2	100	216	1	2.25×10^6
3	100	319	1	2.12×10^6
4	125	203	1	1.99×10^6
5	125	216	1	1.98×10^6
6	125	319	1	2.40×10^6
7	150	203	1	1.66×10^6
8	150	216	1	1.82×10^6
9	150	319	1	1.57×10^6
	2nd Experimental design			
1	100	319	1	2.01×10^6
2	125	319	1	1.98×10^6
3	150	319	1	1.65×10^6
4	100	319	10	6.72×10^5
5	125	319	10	5.47×10^5
6	150	319	10	5.64×10^5
7	100	319	20	6.00×10^5
8	125	319	20	5.47×10^5
9	150	319	20	4.89×10^5

*การบดตัวอย่างด้วย*เครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด

ตัดยางแท่ง STR5L ให้เป็นเส้นขนาด 2.5 x 34 เซนติเมตร จากนั้นบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด (บริษัท โกลวสปริง อินเตอร์ไพรส์ ประเทศไต้หวัน) ยางที่บดได้สามารถป้อนกลับเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดได้ตามการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากุชิ (Table 1)

การหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด

แช่ยางที่บดแล้ว 0.01 กรัม ในโทลูอีน 20 มิลลิลิตร ในที่มืด 7 วัน เพื่อให้ละลายจนหมด นำของเหลวไปวัดความหนืดด้วย Ubbelohde ที่ 30 °C บันทึกเวลาในการเคลื่อนที่ของสารละลายยาง ($t_{solution}$) และโทลูอีน ($t_{solvent}$) นำมาคำนวณความหนืดจำเพาะ (Specific viscosity, η_{sp}) และค่าความหนืดภายใน (Intrinsic viscosity, $[\eta]$) โดยใช้ Equations 1 และ 2:

$$\eta_{sp} = \frac{t_{solution} - t_{solvent}}{t_{solvent}} \quad (1)$$

$$[\eta](dL/g) \cong \frac{\eta_{sp}}{C} \quad (2)$$

C คือความเข้มข้นของสารละลายยาง (0.05 g/dL) ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืด ($\overline{M}_v$, g/mol) เป็นไปตามสมการของ Mark-Houwink (Equation 3) โดยค่าคงที่เป็นของพอลิไอโซพรีน (Riyajan et al., 2003)

$$[\eta] = 1.90\times10^{-4}\ \overline{M}_v^{\,0.745} \quad (3)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากุชิครั้งที่ 1

ตัวแปรอิสระสำหรับการออกแบบครั้งที่ 1 คืออุณหภูมิ (100–150 °C) และความเร็วในการบดยาง (203–319 rpm) โดยกำหนดให้จำนวนครั้งของการป้อนยางกลับเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดคือ 1 ครั้ง ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสายโซ่ยางที่ได้จากการทดลองเป็นดังแสดงใน Table 1 เนื่องจากจำนวนการทดลองที่ได้เลือกออกแบบนี้ต่ำ จึงศึกษาได้เพียงอิทธิพลของปัจจัยหลักเท่านั้น ไม่สามารถศึกษาอิทธิพลของปัจจัยร่วมได้ จาก Fig. 1 อุณหภูมิและความเร็วในการบดยางส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางเชิงลบ นั่นคือการเพิ่มของปัจจัยทั้งสอง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 100 เป็น 150 °C และยังลดลงมากกว่าการเพิ่มความเร็วในการบดยางจาก 203 ไปยัง 319 rpm ด้วย (Fig. 1) นั่นแสดงอุณหภูมิที่ใช้บดยางส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางมากกว่าความเร็วในการบดยาง ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยา thermos-oxidative ที่รุนแรงมากขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ (Dimier et al., 2004) ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Table 2) โดยอุณหภูมิมีค่า *p* ต่ำกว่าความเร็วในการบดยาง อย่างไรก็ตามค่า $p > 0.05$ ทำให้ยังไม่สามารถยืนยันอิทธิพลของอุณหภูมิในการบดต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยิ่งไปกว่านั้นยังสังเกตเห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการบด 27 ครั้งนี้ (จากการออกแบบการทดลองล้วนมีค่าอยู่ในระดับ 10^6 g/mol กอปรกับน้ำหนักโมเลกุลที่วัดในการวิจัยนี้เป็นเพียงค่าเฉลี่ย จึงทำให้สรุปได้ว่าสำหรับการป้อนยางเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด 1 ครั้งนี้ อุณหภูมิและความเร็วในการบดยางไม่ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยาง

Table 2 Analysis of variance of the 1st Experiment design.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Temperature	2	8.4197	8.4197	4.20985	6.28	0.058
Cutting speed	2	0.1198	0.1198	0.05992	0.09	0.916
Residual Error	4	2.6816	2.6816	0.67040		
Total	8	11.2211				

DF- Degree of freedom; Seq SS-Sequential sums of squares; Adj SS -Adjusted sum of squares; Adj MS - Adjusted mean squares; F-Value-Test statistics; P-Value- Probability ($p < 0.05$)

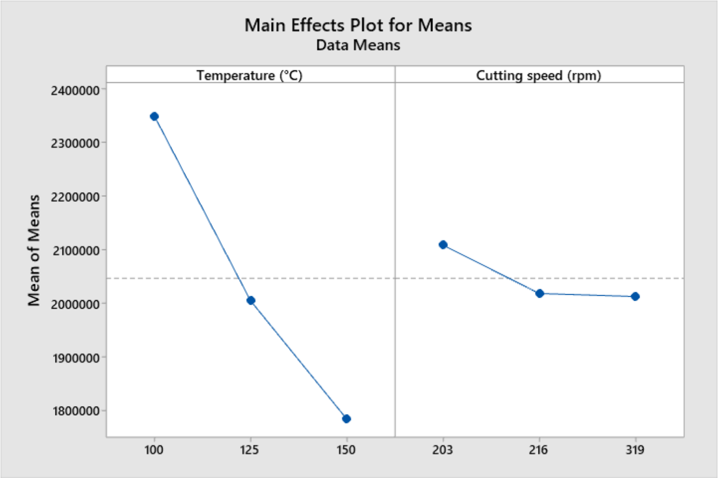


Fig. 1 Main effect plots for temperature and cutting speed (N=1; 1st Experimental design).

ผลการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิครั้งที่ 2

เนื่องจากในการบด สามารถที่จะป้อนยางที่บดแล้วกลับเข้าไปในเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดได้อีก ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองแบบ 2 ตัวแปร คืออุณหภูมิ (100–150 °C) และจำนวนครั้งการป้อนยางเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด (1–20 ครั้ง) ทั้งนี้ได้เลือกความเร็วในการบดยางเป็น 319 rpm เพราะทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางมีค่าต่ำสุด (Fig. 1) ผลการทดลองได้สรุปไว้ใน Table 1 สำหรับอิทธิพลของปัจจัยหลักสามารถพิจารณา Fig. 2 พบว่า อุณหภูมิและจำนวนครั้งการป้อนยางเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางเชิงลบ (Fig. 2) แต่การเปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งการป้อนยางเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางลดลงมากกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ ANOVA (Table 3) ยังได้ระบุว่าจำนวนครั้งการป้อนยางเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดเท่านั้นที่ส่งผลอย่างมีนัยยะต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยาง ($p < 0.05$) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงถึง 10 เท่าในช่วงของจำนวนครั้งการป้อนยางเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดที่ศึกษา แต่น้ำหนักโมเลกุลเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษานี้

ในการป้อนยางที่ผ่านการบดกลับเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด ยางที่ป้อนมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เมื่อยางเข้าไปในห้องของเครื่องที่กำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ อุณหภูมิของยางจะเพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่เกินอุณหภูมิที่ควบคุมไว้ ดังนั้นในช่วงแรกการตัดสายโซ่จะเป็นชนิดเชิงกล (Mechanical effect) เท่านั้น แต่เมื่อยางเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในห้องที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาเคมี thermo-oxidative ก็จะมีอิทธิพลต่อการตัดสายโซ่ของยาง (Dimier et al., 2004) อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่สารอยู่ในเครื่องอาจสั้นเกินไปทำให้เกิดการตัดสายโซ่ได้น้อยลง ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของเครื่องบดไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของสารเข้าไปในเครื่อง จึงไม่สามารถที่จะพิสูจน์สมมุติฐานนี้ได้

Table 3 Analysis of variance of the 2nd Experiment design.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Temperature	2	56241006617	56241006617	28120503308	2.83	0.172
N	2	3.46145E+12	3.46145E+12	1.73073E+12	174.05	0.000
Residual Error	4	39774380526	39774380526	9943595131		
Total	8	3.55747E+12				

DF- Degree of freedom; Seq SS-Sequential sums of squares; Adj SS -Adjusted sum of squares; Adj MS - Adjusted mean squares; F-Value-Test statistics; P-Value- Probability ($p < 0.05$)

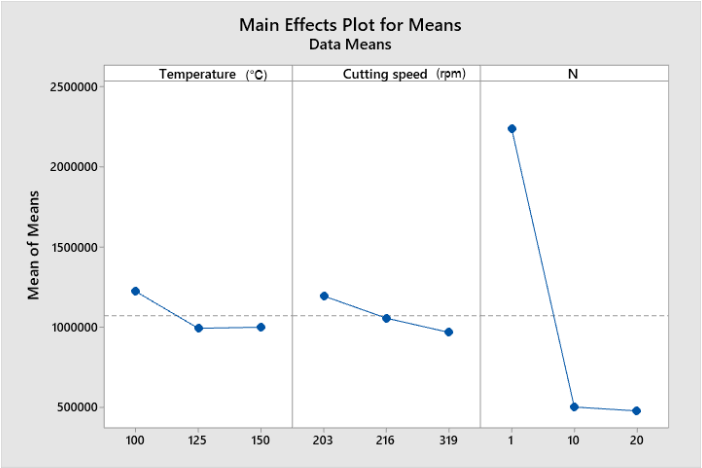


Fig. 2 Main effect plots for temperature, cutting speed, and N (2^{nd} Experiment design).

อิทธิพลของจำนวนครั้งการป้อนยางเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด (N)

เนื่องจาก N เท่านั้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้เปลี่ยนแปลงค่า N เท่านั้น (0–60 ครั้ง) และเลือกใช้อุณหภูมิและความเร็วในการบดยางสูงที่สุด ลักษณะของเม็ดยางที่ได้จากการบดที่สภาวะต่าง ๆ มีรูปร่างแบบเดียวกัน Fig. 3 ได้แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางเริ่มต้น (N = 0) มีค่า 2.66 x 10^6 g/mol น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยนี้ได้ลดลง 10 เท่าเมื่อ N มีค่า 10–20 ครั้ง และลดลงเพิ่มอีก 10 เท่า เมื่อป้อนยางกลับเข้าเครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ด 60 ครั้ง (Fig. 3) จากผลการทดลองเห็นได้ชัดว่าเมื่อเพิ่มจำนวนการครั้งในการป้อนยางกลับเข้าเครื่อง (N) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่การเพิ่ม N สูงกว่า 60 ครั้งไม่ควรทำ เพราะเครื่องบดต้องทำงานเกิน 1 ชั่วโมง ทำให้เกิดความร้อนและเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ ดังนั้นหากต้องการน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่านี้ก็ควรพิจารณาวิธีอื่นที่ให้ผลเหมือนกันแต่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่า

ในการศึกษานี้ แม้ว่าจะไม่ได้เติมสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยลดการเกิดเป็นอนุมูลอิสระของปลายสายโซ่ที่เกิดจากการตัดสายโซ่ แต่ก็ยังสามารถที่จะลดน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ยางได้ (Fig. 3) อย่างไรก็ตามก็ยังควรศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยลดการรวมตัวกันของสายโซ่ยางที่ถูกตัด ซึ่งอาจจะเพิ่มประสิทธิภาพของการลดน้ำหนักโมเลกุลให้ดีขึ้นได้

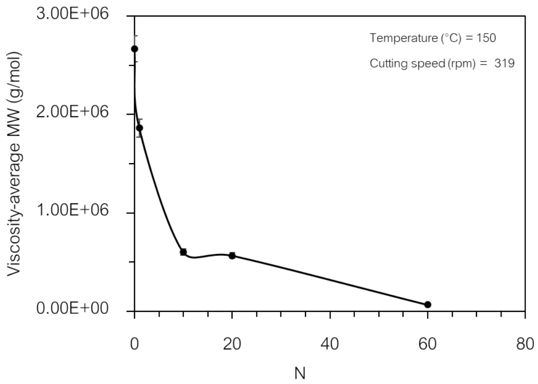


Fig. 3 Effect of N on the average molecular weight of rubber under 150 °C and 319 rpm.

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าสามารถลดน้ำหนักโมเลกุลของยางด้วยการใช้เครื่องขึ้นรูปยางเป็นเม็ดจากระดับ 10^6 เหลือเพียงระดับ 10^4 เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งการบดยางจาก 0 รอบ (ไม่บด) เป็น 60 รอบ และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทากุชิ พบว่าตัวแปรทั้งสามที่ศึกษาส่งผลเชิงลบต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยาง คือการเพิ่มขึ้นของแต่ละตัวแปรจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางลดลง ทั้งนี้จำนวนครั้งในการบดยางส่งผลอย่างมีนัยยะต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($p < 0.05$) และยังมากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของใบมีด ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้ถือว่าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอย่างมีนัยยะ ($p > 0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์กรต่อไปนี้ที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษา ทุนวิจัย สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ปทุมธานี

เอกสารอ้างอิง

พิมานจันทน์ รุ่งโรจน์. 2548. การพัฒนา Pressure Sensitive Adhesive จากน้ำยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

อมรา ขวดบา. 2558. การศึกษาผลของสารช่วยย่อยที่มีต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติและพอลิแลคติคแอซิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

Dimier, F., Vergnes, B., Vincent, M. 2004. Relationships between mastication conditions and rheological behavior of a natural rubber. *Rheologica Acta.* 43: 196–202. doi.org/10.1007/s00397-003-0342-7

Fraley, S., Zalewski, J., Oom, M., Terrien, B. 2022. Design of Experiments via Taguchi Methods-Orthogonal Arrays. In: Woolf, P. (Ed.). LibreTexts. https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/14%3A_Design_of_Experiments/14.01%3A_Design_of_Experiments_via_Taguchi_Methods_-_Orthogonal_Arrays. 25 February 2023.

Fries, H., Pandit, R.R. 1982. Mastication of rubber. Rubber Chem. Technol. 55: 309–327. doi.org/10.5254/1.3535880

Riyajan, S.-A., Sakdapipanich, J.T., Tanaka, Y. 2003. Controlled degradation of cured natural rubber by encapsulated benzophenone as a photosensitizer. J. Appl. Polym. Sci. 90: 297–305. doi.org/10.1002/app.12784

Thuong, N.T., Nghia, P.T., Kawahara, S. 2016. Characterization of commercial natural rubber purified with transesterification. Vietnam J. Chem. 54: 483. doi.org/10.15625/0866-7144.2016-00351

การพัฒนาวัสดุแอสฟัลต์ผิวทางเก่าผสมโพลียูรีเทนเพื่อเป็นวัสดุพื้นผิว

Development of Reclaim Asphalt Pavement (RAP) with polyurethane for surface material

วีรยุทธ มหานิล*, **บารเมศ วรรธนะภูติ**, **วัชรินทร์ วิทยกุล**

Weerayut Mahanin*, Barames Vardhanabhuti, Watcharin Witayakul

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Weerayut.ma@ku.th

บทคัดย่อ

Reclaimed Asphalt Pavement Material (RAP) เป็นวัสดุผิวทางเก่าที่เหลือจากการขูดไสผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม ประกอบด้วยวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ผิวจราจรเดิม ในปัจจุบันมีวัสดุ RAP เหลือใช้เพิ่มมากขึ้น และยังเป็นปัญหาในการจัดสรรพื้นที่กองเก็บในหลายหน่วยงาน งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์หลักเพื่อนำวัสดุ RAP กลับมาใช้ใหม่ ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดต้นทุนการก่อสร้าง โดยทดลองนำ RAP มาใช้เป็นวัสดุมวลรวม และแบ่งตัวอย่าง RAP 2 ชุด (ชุดที่ 1 well graded sample และ ชุดที่ 2 poor graded sample) แล้วทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของ RAP ทั้งลักษณะทางกายภาพของวัสดุ ขนาดคละ รวมไปถึงค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวม ก่อนนำมาผสมกับวัสดุเชื่อมประสาน Polyurethane (PU) ในอัตราส่วน 2-7% โดยน้ำหนัก เพื่อทดลองใช้เป็นวัสดุพื้นผิวใหม่ที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานวิศวกรรมงานทาง ได้แก่ Marshall Test, Permeability Test, Compressive Strength Test, Wheel Tracking Test ผลการทดสอบพบว่า RAP ผสม PU สามารถให้ค่าเสถียรภาพผ่านมาตรฐานพอรัสแอสฟัลต์คอนกรีต,แอสฟัลต์คอนกรีต และโพลีเมอร์มอดิฟายด์แอสฟัลต์ ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท. และยังสามารถระบายน้ำได้ดีเมื่อใช้ RAP ชนิด poor graded อีกทั้งมีกำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ ไม่แตกหักเมื่อรับแรงกดสูง มีความสามารถต้านทานการเกิดร่องล้อได้มากกว่า 10,000 รอบโดยไม่เสียรูป

คำสำคัญ: การพัฒนาแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า, โพลียูริเทน, วัสดุพื้นผิว, คุณสมบัติของโพลียูริเทน

Abstract

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is the removed pavement material from milling process which contains aggregate and old asphalt. Nowadays, the RAP waste is increasing and storage allocation is the problems in multiple departments. Therefore, this research has the main objectives to reuse the waste RAP to reduce natural aggregate and construction costs. The study, utilizes RAP as aggregate divide RAP samples into 2 sets, set 1: Well graded sample and set 2 : Poor graded sample. The test of physical properties of RAP had been determined including grain size and gradation, specific gravity, and water absorption rate and then experiment with mixing adhesive material, Polyurethane (PU) polymer 2-7% by weight to be used as surface material that qualified the engineering properties including Marshall test, Permeability test, Compressive strength test and Wheel tracking test. The results show that RAP mixed with PU can be used as surface material. The stability passes the standard asphalt concrete, porous asphalt concrete and polymer modified asphalt of DRR code. Able to drain and well permeability when using poor graded sample. The compressive strength could pass the standards Soil Cement Base and does not break under high pressure. The material can resist more than 10,000 cycles of wheel tracking without failure.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement; Polyurethane; Surface Material; Stability

บทนำ

ในปัจจุบันโครงข่ายถนนทั่วประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองทางด้านระบบคมนาคม ซึ่งร้อยละ 90 เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (กฤษณะ, 2559) เมื่อผิวจราจรเกิดการหลุดร่อนเสียหาย การซ่อมแซมผิวจราจรจะต้องทำการขุดไส (Milling) ผิวจราจรเดิม แล้วทำการปูผิวจราจรใหม่แทนที่ ถึงแม้ว่าวัสดุผิวจราจรดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัสดุในงานทางได้ใหม่ ที่เรียกว่า Recycling Pavement แต่ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากจำเป็นต้องมีชุดเครื่องจักรเฉพาะ มีราคาสูง นักวิจัยและวิศวกรหลายท่านจึงมีการศึกษานำ RAP มาปรับปรุงใช้เป็นวัสดุมวลรวมในงานคอนกรีต (จิระยุทธ และคณะ, 2559), ในงาน Slurry Seal (ชลัท, 2562) ซึ่งพบว่ายังคงเหลือวัสดุ RAP จำนวนมาก จำเป็นต้องจัดหาพื้นที่ในการกองเก็บมากขึ้นทุกปี งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่าเหลือใช้ มาทำการทดลองใช้เป็นวัสดุมวลรวม โดยเริ่มจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า อาทิ ทดสอบหาขนาดคละ, ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวม แล้วทดลองนำมาผสมเข้ากับ Polyurethane [PU] ในอัตราส่วน 2–7% โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากมีคุณสมบัติค่าแรงดึงสูง (Tensile Strength) มีความเหนียวสูง ทนต่อการฉีกขาด มีความยืดหยุ่นและรับแรงกระแทกได้ดี เพื่อทดลองพัฒนาเป็นวัสดุพื้นผิวใหม่ที่มีความพรุน สามารถระบายน้ำได้ดี และผ่านมาตรฐานวิศวกรรมงานทางในประเทศไทย ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยวิธี Marshall Test, Permeability Test, Wheel Tracking Test, Compressive Strength Test เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นวัสดุในงานทาง อาทิเช่น วัสดุทางเท้า หรือวัสดุพื้นผิวระบายน้ำ ต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

RAP เป็นวัสดุที่ได้จากการขุดไสผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าจากถนนเดิม ประกอบด้วยวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ ขนาดของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเดินเครื่องจักร และสภาพของหัวกัดขูดไสผิวทางเก่า โดยทั่วไปจะมีขนาดเม็ดหยาบ (Gravel and Sand Size) มีปริมาณเม็ดละเอียด (Fine Content) ที่น้อย เนื่องจากน้ำยางมะตอยจะเข้าไปเกาะกับหินฝุ่นจนเป็นก้อนขนาดใหญ่ วัสดุผิวทางเก่าจะมีสีที่เข้มกว่าและรูปทรงของมวลรวมมีความเหลี่ยมมนเปลี่ยนไปเนื่องจากการใช้งานและอิทธิพลจากการขุดไส โดย RAP ที่ใช้ในงานวิจัยมาจากแขวงทางหลวงชนบทสมุทรปราการ

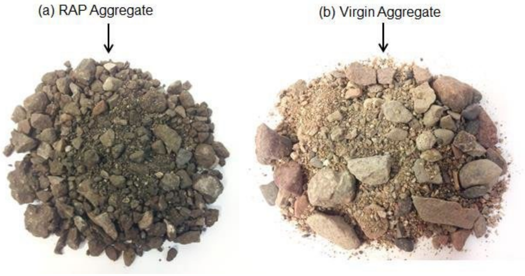


Fig. 1 RAP Aggregate and Virgin Aggregate (Akshay, 2014)

PU เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ทดแทนยางธรรมชาติ ผลิตขึ้นครั้งแรกในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ปัจจุบันได้มีการใช้อย่างแพร่หลาย สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์มีลักษณะที่หลากหลายตั้งแต่แข็งเหนียวเหมือนพลาสติกไปจนอ่อนนุ่มเหมือนยาง (Paula, 2005) PU ยังมีคุณสมบัติเด่น คือ มีค่าแรงดึงสูง มีความเหนียวสูง ทนต่อการกัดกร่อน และมีความยืดหยุ่นสูง งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทดสอบนำ PU มาผสมกับมวลรวม พบว่าโพลียูรีเทน (TS-PU) มีความสามารถต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดี (Zengping et al., 2020) ขนาดของวัสดุมวลรวม, อัตราส่วนผสมของ PU,

อุณหภูมิ, ส่วนประกอบของ PU มีอิทธิพลอย่างมากกับค่า มอดูลัสยืดยุ่น(E)ของวัสดุ และ PU บางชนิดสามารถทนต่อแสงอาทิตย์ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย (Bijlsma, 2010) งานวิจัยนี้ได้ใช้โพลียูรีเทนจาก บริษัท อินฟินิท คราฟท์ จำกัด ที่มีคุณสมบัติดัง Fig. 2

A : B (Weight proprtion)	A 70 : B 100
Operating temp. (°C)	25-40
Gel time (min/30°C)	5-10 (Variable)
Demould Time (min/30°C)	24 hours
Performance of finished product	
Appearance	Light yellow elastomer
Hardness (Shore A)	80 - 90 Shore A
Tensile strength (Mpa)	10 – 12 Mpa
Elongation ar break (%)	500 - 700
Tear strenght (KN/m)	40 - 45
Rebound (%)	45 - 50
Specific gravity	1.11

Fig. 2 Properties of Polyurethane

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ในงานวิจัยนี้ เก็บตัวอย่าง RAP จากแขวงทางหลวงชนบทสมุทรปราการและนำมาทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ หาขนาดคละของมวลรวม, ค่าความถ่วงจำเพาะ,ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมและจำแนกมวลรวม สรุปใน Table 1 จากนั้นได้แบ่งวัสดุ RAP ออกเป็น 2 ชุด ตาม มทช.แอสฟัลต์คอนกรีต คือ ชุดที่ 1 เป็น RAP ที่มีขนาดคละกันดี (Well graded) และชุดที่ 2 ตาม มทช.งานพอรัสแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นขนาดคละไม่ดี (Poor graded) วัสดุ RAP ทั้ง 2 ชุดนี้ถูกนำมาผสมกับ PU ในอัตราส่วน 2-7% โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบหาค่าเสถียรภาพโดยวิธี Marshall Test ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท และทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน(Permeability Test)เพื่อหาอัตราส่วน RAP:PU ที่เหมาะสมดัง Table 2 เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับ RAP แต่ละชุด จึงได้นำอัตราส่วนผสมที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ การหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test) และทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อ (Wheel Tracking Test) สรุปดัง Table 3

Table 1 Testing samples of RAP materials used in the research.

TEST	Set	Standard
1. Sieve Analysis	1	มทช.(ท) 501.8-2545
2. Classification of Soil	1	AASHTO Classification system
3. Specific Gravity and Absorption	4	มทช.(ท) 101.4-5-2545

Table 2 Testing the optimum ratio of RAP mixed PU

RAP	%PU	Test	Standard
Well graded	2-7%	Marshall Test, Permeability Test	มทช.(ท) 607-2545 Japan Road Assoc B012
Poor graded	2-7%	Marshall Test, Permeability Test	มทช.(ท) 607-2545 Japan Road Assoc B012

Table 3 Properties test of RAP mixed PU material

RAP	%PU	Test	Set	Standard
Well graded	6%	Compressive Strength Test	3	มทช.(ท)105.1-2545
		Wheel Tracking Test	1	ERSA (TRC201)
Poor graded	6%	Compressive Strength Test	3	มทช.(ท)105.1-2545
		Wheel Tracking Test	1	ERSA (TRC201)

เปรียบเทียบราคาต้นทุนวัสดุมวลรวม RAP ผสม PU กับวัสดุพื้นผิวอื่น

เพื่อให้เกิดข้อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดต่างๆ เป็นแนวทางในการนำวัสดุ RAP และ PU กลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

ผลการศึกษาวิจัย

สมบัติพื้นฐานของ RAP

จำแนกวัสดุ RAP ตัวอย่างตามมาตรฐาน AASHTO Classification system ได้เป็นกลุ่ม A-1-a คือมีลักษณะเป็นมวลรวมหยาบ (กรวด) ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 15% ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 น้อยกว่า 30% ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 น้อยกว่า 50% ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค่า P.I. น้อยกว่า 6 ถือว่ามีลักษณะกรวดหรือทรายที่มีขนาดคละดี ทำการหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมของมวลรวมหยาบ, มวลละเอียดของวัสดุ RAP แสดงใน Table 4 และแบ่งขนาดคละของ RAP ออกเป็น 2 ชุดตัวอย่าง การกระจายตัวของตัวอย่างแสดงดัง Fig. 3

Table 4 Specific Gravity and Absorption of RAP Aggregate

TYPE	SG_{BULK}	SG_{SSD}	SG_{APP}	ABSORPTION
Coarse Aggregate	2.409	2.474	2.577	2.70 %
Fine Aggregate	2.277	2.334	2.502	4.05 %

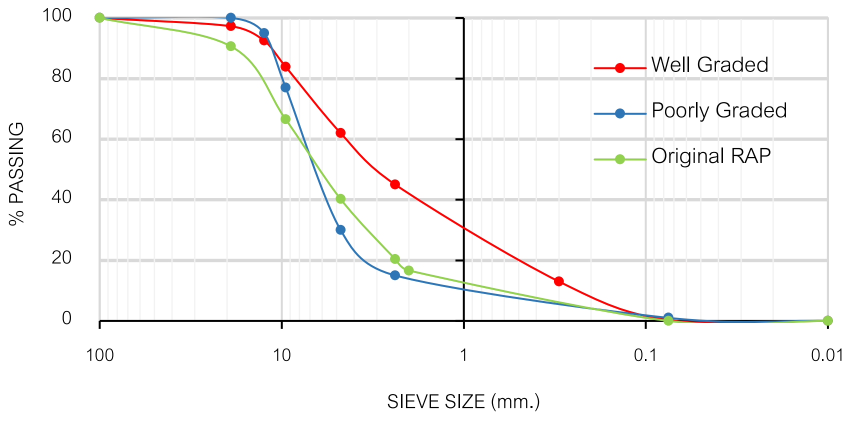


Fig. 3 Sieve Analysis of RAP

ผลการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ โดยวิธี Marshall Test

ที่อัตราส่วนผสม RAP+PU 6% ให้ค่าเสถียรภาพสูงที่สุด โดยที่ชุดที่ 1 ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุด 6,580.47 lb. ชุดที่ 2 ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดที่ 3,963.55 lb. ซึ่งผ่านมาตรฐานงานโพลีเมอร์มอดิฟายด์แอสฟัลต์(2,700 lb.) มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (1,800 lb.) และมาตรฐานพอรัสแอสฟัลต์คอนกรีต (800 lb.) ดัง Fig. 4

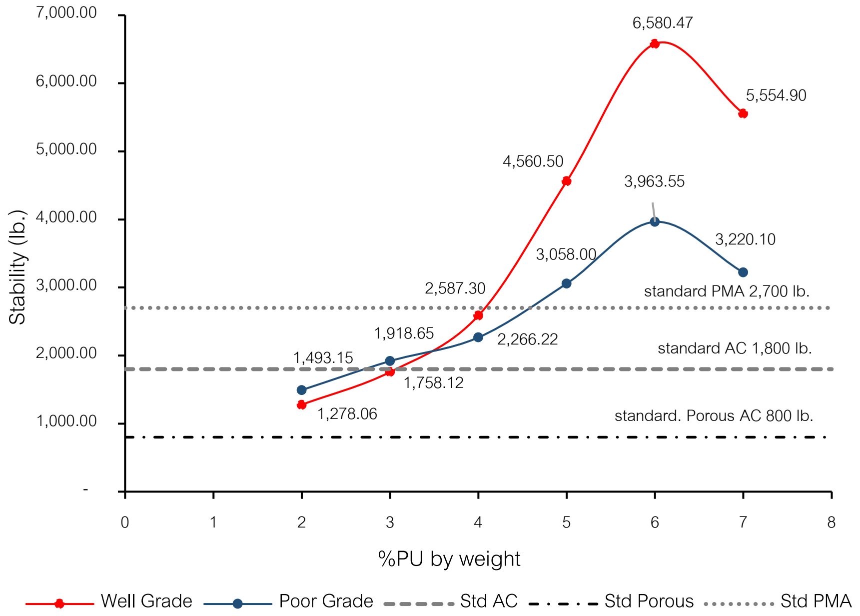


Fig. 4 Relationship between tensile strength and %PU

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k)

ตัวอย่างชุดที่ 1 และชุดที่ 2 มีค่า k อยู่ระหว่าง 0.004 – 0.070 cm/s. และ 0.098 – 0.249 cm/s. เมื่อเทียบกับมาตรฐาน Japan Road Assoc. B012 ที่ต้องมีค่า k ไม่น้อยกว่า 0.01 cm/s. พบว่า ตัวอย่างชุดที่ 1 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่อัตราส่วนผสม PU 2-4% ตัวอย่างชุดที่ 2 สามารถผ่านมาตรฐานได้ทุกอัตราส่วนผสมตาม Fig. 5

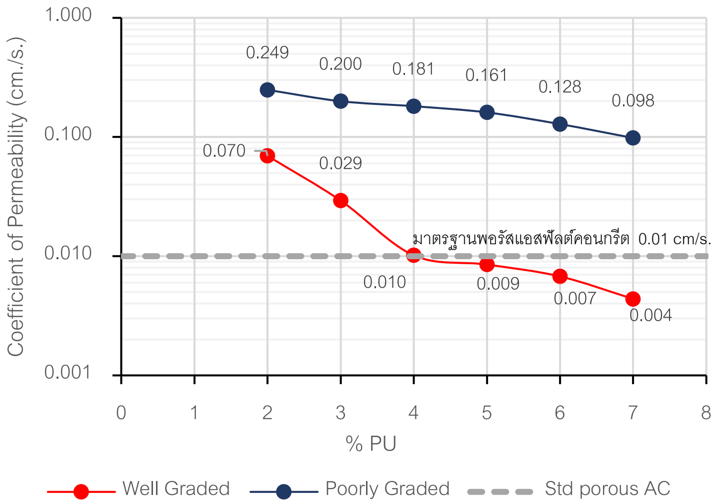


Fig. 5 Relationship between Coefficient of Permeability (k) and %PU

ผลการทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อโดยวิธี Wheel Tracking Test แบบเปียก

การทดสอบนี้ใช้อัตราส่วน PU ที่ 6% จากการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ โดยเครื่องทดสอบจะทำการอ่านค่าระยะการยุบตัวแต่ละตำแหน่งดัง Fig. 6 จนครบ 10,000 รอบ ระยะการยุบตัวสุดท้ายแสดงใน Table 5

ชุดตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยการยุบตัวที่ 0.385 มม.และ 0.213 มม. ผ่านมาตรฐาน ERSA Wheel Tracking Testing for Rutting and Stripping (TRC201): Arkansas State Highway and Transportation Department ที่กำหนดว่าเมื่อเครื่อง Wheel Tracker เคลื่อนที่ครบ 10,000 รอบ จะต้องมีค่าการยุบตัวไม่เกิน 10 มม. ถือว่าสามารถต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดี

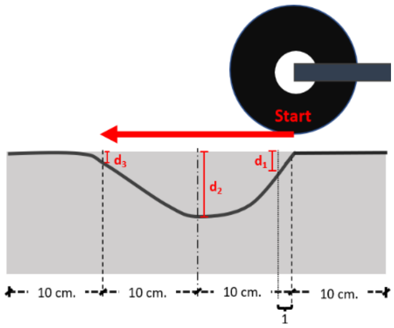


Fig. 6 Position and deformation of Wheel tracking test

Table 5 Position and vertical deformation after Wheel tracking test

Position	Vertical deformation (mm.)	
	Well graded sample	Poor grade sample
d_1	0.438	0.242
d_2	0.411	0.202
d_3	0.306	0.194
Average	0.385	0.213

ค่าความต้านทานแรงกดโดยการทดสอบ Compressive Strength Test

ผลการทดสอบตัวอย่างชุดที่ 1 และ 2 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 25.01, 22.07 ksc. ผ่านมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่กำหนดไว้ 17.5 ksc. ที่ 7 วัน ก้อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีลักษณะตาม Fig. 7 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้แสดงใน Table 6 เมื่อทำการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าหนึ่ง ค่ากำลังรับแรงอัดจะคงที่ประมาณ 5 วินาทีก่อนที่ค่าจะลดลงและเกิดการวิบัติ หลังทดสอบก้อนตัวอย่างสามารถคืนรูปกลับมาลักษณะเหมือนเดิมดัง Fig. 8

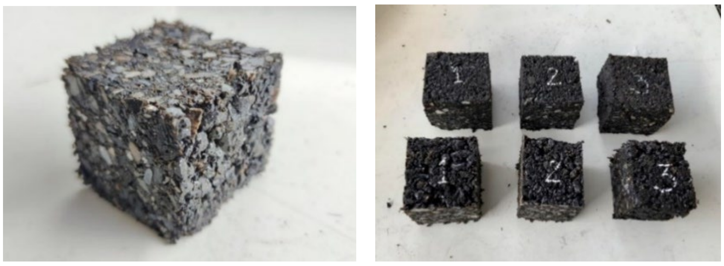


Fig. 7 Sample before testing

Table 6 Compressive strength of RAP + PU 6% Sample

Set	No.	Compressive strength (KSC.)	Average (KSC)
1 (Well graded sample)	1	25.63	
	2	22.18	25.01
	3	27.22	
2 (Poor graded sample)	4	22.48	
	5	23.55	22.07
	6	20.18	

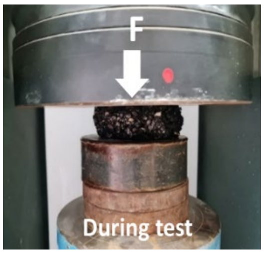


Fig. 8 Ductility characteristic of the specimen during the test and after completion.

ผลการเปรียบเทียบราคาต้นทุนวัสดุมวลรวม RAP ผสม PU กับวัสดุพื้นผิวอื่น

ผู้วิจัยได้ทำการประมาณราคาวัสดุตามหลักเกณฑ์ของกรมบัญชีกลาง โดยคิดราคาต่อตารางเมตร ที่ความหนา 5.00 ซม. โดยไม่คิดราคามวลรวม RAP ค่างานต้นทุน RAP ผสม PU 2% (ทำแผ่นทางเท้า) ได้เท่ากับ 421.96 บาท/ตร.ม. ใช้ RAP เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ได้ค่างานต้นทุน 138.72 บาท/ตร.ม. ใช้ RAP เป็นวัสดุมวลรวมทำผิวจราจร AC ได้ค่างานต้นทุน 292.56 บาท/ตร.ม.

สรุป

วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (RAP) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากยังมีคุณสมบัติที่คล้ายกับหินคลุกปกติ เช่น ความถ่วงจำเพาะ,ค่าการดูดซึมของมวลรวม ขนาดคละของ RAP มีลักษณะใกล้เคียงกับขนาดคละของมวลรวมตามมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต แต่มีปริมาณฝุ่นน้อยกว่าหินคลุกปกติ เนื่องจากแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมได้ทำการยึดเกาะหินฝุ่นไว้ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หาก RAP มาใช้เป็นมวลรวมจะขาดวัสดุเชื่อมประสานในการยึดเกาะ

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ RAP ผสม PU ทั้ง 4 การทดสอบ สรุปได้ว่า ขนาดคละของวัสดุ RAP มีผลต่อค่าเสถียรภาพเป็นอย่างมาก ตัวอย่างที่มีขนาดคละดีกว่าจะให้ค่าเสถียรภาพสูงกว่า เนื่องจากมีช่องว่างอากาศภายในก้อนตัวอย่างน้อยกว่า เมื่อถูกแรงกระทำจึงสามารถต้านทานการเสียรูปได้ดีกว่า โดยตัวอย่างชุดที่ 1 และ 2 สามารถผ่านมาตรฐานงานโพลีเมอร์มอดิฟายด์แอสฟัลต์ (ค่ามาตรฐานสูงสุด) ที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดได้ทั้งหมด ที่อัตราส่วน RAP ผสม PU 5–6% โดยน้ำหนัก ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ตัวอย่างชุดที่ 2 (Poor graded sample) สามารถผ่านมาตรฐาน Japan Road Assoc B012 ได้ทุกอัตราส่วนผสม แต่ตัวอย่างชุดที่ 1(Well graded sample) สามารถผ่านได้ที่อัตราส่วนผสม RAP ผสม PU 2–4% เท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดคละของก้อนตัวอย่าง การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อพบว่า ตัวอย่างทั้ง 2 ชุด สามารถต้านทานการเกิดร่องล้อได้เป็นอย่างดี มีระยะการยุบตัวน้อยไม่แตกต่างกัน เนื่องจาก PU ทำหน้าที่เคลือบผิวมวลรวมไว้

หนาพอที่จะต้านทานการขัดสีในขณะที่ล้อวิ่งผ่าน สังเกตจากรอบฉีกขาดของ PU บริเวณที่ล้อวิ่งผ่าน การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง พบว่าชุดที่ 1 มากกว่าตัวอย่างชุดที่ 2 เล็กน้อยเป็นผลมาจากขนาดคละของก้อนตัวอย่าง เมื่อเกิดการวิบัติก้อนตัวอย่างจะไม่แตกออกจากกัน จะยังคงจับตัวกันเป็นก้อนเนื่องจากมี PU ทำหน้าที่เชื่อมประสานมวลรวมไว้เข้าด้วยกัน และยังมีความเหนียวสูง มีคุณสมบัติยืดหยุ่น สามารถคืนตัวหลังรับแรงกดได้

คุณสมบัติต่างๆ จากการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น วัสดุ RAP+PU มีแนวโน้มที่จะใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมงานทางได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน สามารถระบายน้ำออกจากผิวหน้าได้ ป้องกันการเกิดน้ำขัง ต้านทานการเกิดร่องล้อได้ ดี เมื่อเกิดการวิบัติจะไม่แตกแยกตัวออกจากกันในทันทีเหมือนวัสดุผสมคอนกรีตทั่วไป ข้อแนะนำการนำไปใช้ หากใช้เป็นวัสดุพื้นผิวที่รับน้ำหนักและต้องการคุณสมบัติด้านการระบายน้ำ ควรใช้อัตราส่วนผสมที่ PU 4–6% โดยน้ำหนัก หากนำเป็นวัสดุปูผิวพื้นทางเท้าที่ไม่ได้รับน้ำหนักมาก อาจลดอัตราส่วนผสม PU ลง แต่อย่างไรก็ตามราคา PU ตามท้องตลาดยังมีราคาสูงกว่าวัสดุอื่นๆ ในอนาคต เมื่อ PU มีราคาถูกลง ก็อาจเป็นทางเลือกหนึ่งของการเลือกใช้วัสดุในงานวิศวกรรมงานทางได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนากรมทางหลวงชนบท ที่อนุเคราะห์ข้อมูล, สถานที่ สำหรับการศึกษาวิจัย และความอนุเคราะห์จากหลายๆบุคคล รวมทั้งอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำรวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องจนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กฤษณะ จันทรโชติ. 2559. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตระหว่างวัสดุมวลรวมแบบข้อกำหนดขอบบนและขอบล่างที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์. วิศวกรรมสาร มก.: 11–22.

จิระยุทธ สืบสุข, คมกร ไชยเดชาธร, ภานุพงศ์ พันพิพัฒน์, ธนากร ภูเงินขำ. 2559. กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้วัสดุรีไซเคิลจากขยะผิวทางเป็นมวลรวมหยาบ. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 11: 125–132

ชลัท ทิพากรเกียรติ. 2562. คุณสมบัติของวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ในการออกแบบพาราสเลอรี่ซีล. วารสารวิศวกรรมเกษมบัณฑิต 9: 183–200

กรมทางหลวงชนบท. 2545. การหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมมวลรวม มทช. (ท). 101.4-5/2545.

กรมทางหลวงชนบท. 2545. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต มทช. (ท). 105.1-2545

กรมทางหลวงชนบท. 2545. วิธีการทดสอบหาส่วนคละของวัสดุมวลรวม มทช. (ท). 501.8/2545.

กรมทางหลวงชนบท. 2545. การทดสอบแอสฟัลต์ติกคอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ มทช. (ท). 607-2545.

Akshay, G. 2014 Use of Micro-Mechanical Models to Study the Mastic Level Structure of Asphalt Concretes Containing Reclaimed Asphalt Pavement. Ph.D. thesis, Graduate school, Arizona State University. Arizona State, USA

Bijlsma, E. 2010. Polyurethane Bonded Aggregate revetments design manual. 102.

Hall, K.D., Williams, S.G., Gudapati, R. 2005. ERSA wheel track testing for rutting and stripping. Department of Civil Engineering University of Arkansas, Arkansas State, pp 3.

Rodrigues, P.C. 2005. Polyaniline/polyurethane networks. II. A spectroscopic study. Polymer 7: 2285–2296

Zhang, Z., Sun, J., Jia, M. 2020. Study on a thermosetting polyurethane modified asphalt suitable for bridge deck pavements: Formula and properties. Constr. Build Mater. 41: 118–122. doi.org/10.1016/j.conbuildmat .2020.118122

Deformation of sheet-pile walls as supporting system for excavation in soft Bangkok clay

Pachara Khunawong*, Pongpipat Anantanasakul

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pachara.khn@student.mahidol.edu

Abstract

Sheet-pile walls are commonly used as temporary supporting systems for excavations in soft Bangkok clay, in which excavation depths are less than about 6 m. Insight into the load-deflection and stability characteristics is essential to the effective design and analysis of such retaining structures. The present study aims to facilitate the design process of sheet-pile walls as part of excavation projects, particularly in soft Bangkok clay. A numerical parametric study of excavation is performed using nonlinear finite element analysis (PLAXIS 2D). A plane-strain finite element model with a realistic staged construction sequence is set up. Numerical analyses with regard to both deformation and stability responses at different depths of excavation, depths of wall embedment, and locations of struts are performed. The soft Bangkok clay is numerically represented in the finite element analysis by the critical state-based Modified Cam Clay model. Actual instrumented excavation projects are simulated by the finite element model, and the numerical predictions are compared with the corresponding field monitoring results. The obtained numerical results are compiled and analyzed, and simple design charts are created for excavations in soft Bangkok clay with sheet pile walls. Such design charts will allow engineers to determine maximum wall deflections, bending moments, and strut forces.

Keywords: Bangkok clay, Design chart, Modified Cam Clay model, Plaxis 2D, Sheet pile

Introduction

Bangkok, Thailand. The foundation system or other underground structures are being built. There is a limit in the working area. The bracing system that must be constructed using a retaining wall system depends on the excavation depth, working area, cost, and type of retaining wall (temporary or permanent). The temporary retaining structure that is commonly used is a sheet pile wall, which is a retaining system that can be reused and is suitable for depths of around 5–6 m. that has different sizes and lengths according to the construction. Sheet pile walls use the moment stability method, but it is not possible to tell the deflections and bending moments of sheet piles. Therefore, in this paper, the nonlinear finite element analysis method is used, which can determine the maximum displacement and maximum bending moment by specifying variables such as excavation depths, sheet pile cross-sections, sheet pile lengths, distributed load sizes at the ground surface, and strut sizes. The soil models used are the modified cam-clay model for weathered clay and soft clay and the hardening soil model with small strain for soft clay and stiff clay, which is suitable for Bangkok clay conditions at shallow depths. The result can be a design chart for sheet pile walls that are suitable for the central region of Thailand.

Bangkok subsoils

Bangkok is located in the Lower Central Plain of Thailand. The formation and stratification of the city's subsoil deposits relevant to common geotechnical engineering activities has primarily been resulted from the interplay of historic fluvial and deltaic activities of the Chaphraya River and seawater of the Gulf of Thailand since the late Pleistocene. The typical subsoils of the Bangkok area, as shown in Fig. 1, consist of (1) a soft to medium marine clay deposit 10–18 m thick, (2) a stiff clay layer 10-15 m in thickness, and (3) a dense to very dense sand layer 10-15 m thick. Below them, an alternate sequence of stiff clay and dense sand layers can be explored further to great depth. The top three soil layers are commonly referred to as "soft Bangkok clay," "stiff Bangkok clay," and "first sand layer," respectively. A 1–2 m-thick weathered clay layer or crust is generally present in the uppermost portion of the soft clay layer. The materials in this part are mainly overconsolidated clay, sometimes mixed with fill materials. Such a crust has been formed by human activities and seasonal fluctuations in moisture in the soft clay layer close to the ground surface.

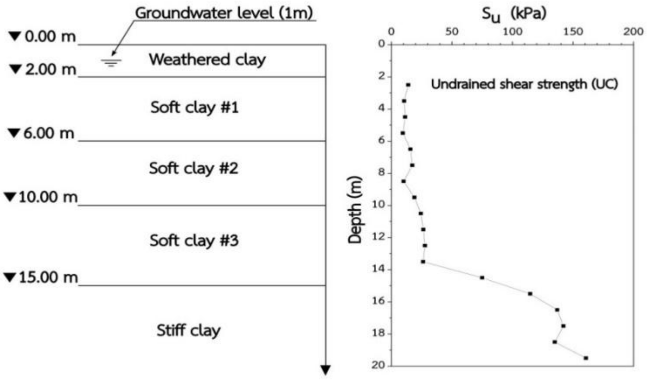


Fig. 1 Typical soil profile of Bangkok subsoils (Likitlersuang et al., 2013)

Excavation with sheet pile walls

Interlocking sheet pile walls have been used rather extensively as part of the temporary shoring systems for excavation works in the greater Bangkok area, owing to their good workability and cost effectiveness. A typical layout of excavation with sheet pile walls is presented in Fig. 2. In general, excavation depths with this type of flexible retaining wall are no greater than 6 m, while wall embedment depths rarely exceed 18 m. Bracing walls and struts are commonly employed to provide lateral support and limit wall deflections. Excavators with telescopic booms are often employed for soil removal when struts are tightly spaced. Excavations with sheet pile walls in the Bangkok area are made essentially entirely in the soft and stiff clay layers, whose permeability values are relatively low. Therefore, seepage of ground water into the excavation is irrelevant for such short-term constructions, and dewatering is, in general, not performed for this kind of excavation project.

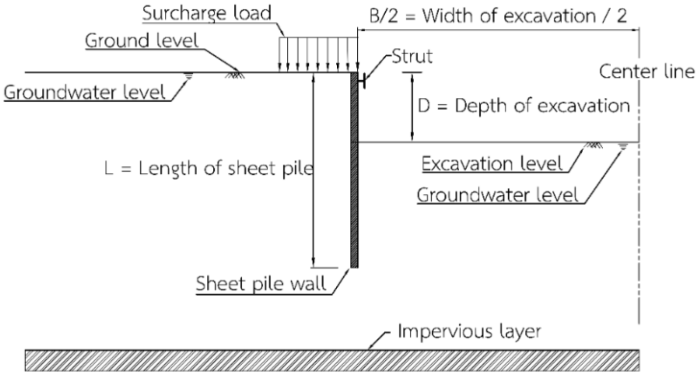


Fig. 2 Model layout

Design of braced sheet pile walls for excavation in soft clay, in local practice, involves stability analysis of "kick-in" and "basal heave" failure modes. The former deals with the force and moment equilibrium of the active and passive earth pressures acting on the wall, while the latter considers the bearing-capacity type of failure of the soil at the excavation grade (Terzaghi 1943; Eide et al. 1972). Factors of safety for successively deeper excavation stages in excess of 1.2 to 1.5 are generally required for an acceptable design. The forces used for sizing the wales and struts can be further obtained based on assumed pressure envelopes (Terzaghi and Peck 1963).

Finite element analysis

Finite element model

The finite element software PLAXIS 2D Version 21 was employed in the present numerical parametric study. The plane strain finite element model as shown in Fig. 3 consists of a sheet pile wall embedded in five soil layers so as to best simulate the actual ground conditions. The model is 25 m deep and extends 20 m from the sheet pile wall to the left boundary. The distance from the wall to the right boundary, which is also the axis of symmetry, measures half the width of the excavation. The provided distances from the excavation are sufficiently large to avoid interference between the development of zones of intense shearing and the left and

bottom boundaries of the finite element model. The sheet pile wall is modeled using elastic-plastic plate elements. The top soil layer, 2 m thick, represents the crust, while the soft clay is divided into three layers with thicknesses of 4 m, 4 m, and 5 m, respectively. Finally, the stiff clay is represented by the bottom layer, which is 10 m thick. Isoparametric 15-noded triangular finite elements are used in the meshing of the soil layers. Fixed displacement boundary conditions are provided at the vertical sides and bottom of the model geometry.

Simulation of staged excavation

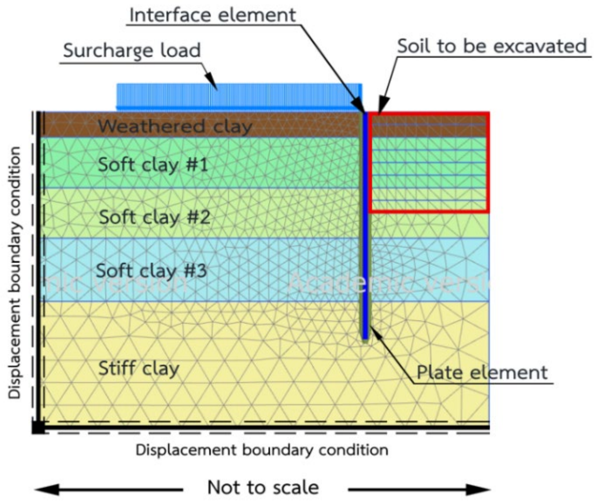


Fig. 3 The plane strain finite element model

The so-called procedure is used to compute the initial or geostatic effective stresses of the soil mass. Excavation is made in increments of 1 m until the target excavation depth is reached. Excavations both with and without strut bracing are performed in the present study. For the latter case, a strut in the form of a fixed-end anchor is provided at 1 m below the ground surface. It should be noted that such a strut installation depth follows the construction practice adopted by the local excavation contractors. It is noteworthy that one half of the excavation width is taken as the equivalent length of the strut in the calculation of its axial stiffness.

Soil constitutive models

The critical-state-based Modified Cam Clay Model (Roscoe and Burland 1968) that is suitable for soft to medium clays was used to simulate the stress-strain and strength behavior of the crust and soft Bangkok clay layers. As shown in Fig. 4, the Modified Cam Clay model assumes an elliptical yield surface in the Cambridge p-q stress space where and Expansion of the yield surface is controlled by an isotropic hardening law that relates a change in preconsolidation pressure to the corresponding change in plastic volumetric strain.

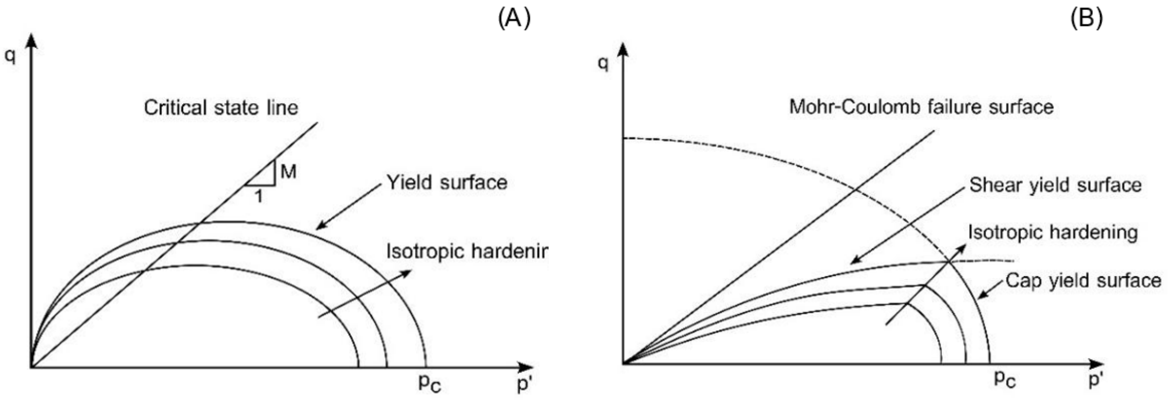


Fig. 4 (A) The critical-state based Modified Cam Clay model and (B) The elastoplastic Hardening Soil model

Calibration of model parameters

The Modified Cam Clay and Hardening Soil models employ five and twelve parameters in prediction of the stress-strain and strength behavior of soils. For the present study, the results of one-dimensional consolidation tests and consolidated-undrained (CU) and drained (CD) triaxial tests on intact specimens of the weathered clay, soft clay and stiff clay layers retrieved from several locations in the greater Bangkok area, i.e., AIT, Chulalongkorn University, Mahidol University, Suvarnabhumi Airport and several other MRT underground stations (Balasubramaniam and Waheed-Uddin 1977; Balasubramaniam and Chaudhry 1978; Balasubramaniam and Hwang 1980; Kim et al. 1997; Seah and Lai 2003; Pongsakorn 2011; Surarak et al. 2012; Likitlersruang et al. 2013; Chaosittichai and Anantanasakul 2018) were used to calibrate for the parameter values of the two constitutive models.

The calibration procedure for the Modified Cam Clay model as described by Kirby (1977) was followed. The values of critical state parameters e_0, λ and κ were determined from the results of 1-D consolidation tests with unload-reload cycles, while M was computed from the stress ratios (q/p') at failure of the drained and undrained triaxial tests. The value of Poisson's ratio υ was obtained from the volume change-strain relations during unload-reload cycles of drained triaxial tests (Chaosittichai and Anantanasakul 2018).

Table 1 Best fit parameters for Weathered clay and Soft clay

Parameter	Symbol	Weathered clay	Soft clay 1	Soft clay 2
Swelling index in e-ln p space	k	0.12	0.091	0.07
Compression index in e-ln p space	λ	0.51	0.51	0.31
Slope of critical state line in p'-q space	M	0.93	1.05	1.29
Poisson's ratio	υ'	0.25	0.3	0.3
Initial void ratio in e-ln p space	e_0	2.69	2.4	1.96

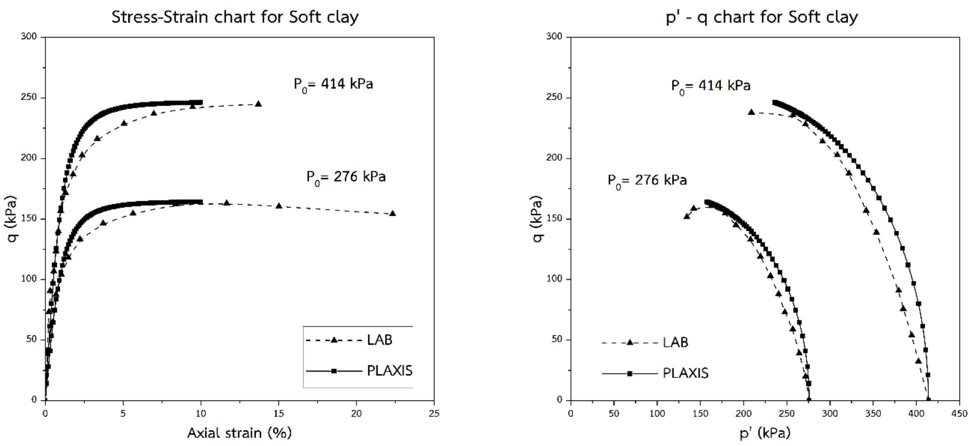


Fig. 5 Stress-Strain chart and p' – q chart for Soft clay

For the case of Hardening Soil model, the parameter E_{oed}^{ref} is determined from the results of consolidation tests, while E_{50}^{ref} values are calibrated from the primary stress-strain relations of the CD triaxial tests. The results of unload-reload cycles of the drained triaxial tests are used to determine the E_{ur}^{ref} and υ_{ur} values. The values of φ', c' and ψ are calibrated from the stresses and volume changes at failure of the triaxial tests. The asymptotic strength ratio R_f of 0.9 is generally assumed. The exponent m value of 0.5 has been recommended by Schanz et al. 1999 for stiff soils. In the present study, the coefficient of lateral earth pressure K_0^{NC} is determined from the effective friction angle as $K_0^{NC} = 1 - sin\, sin\, \varphi'$. The small-strain stiffness parameters $\gamma_{0.7}$ and G_0^{ref} are determined as per the recommendations of (Likitlersruang et al., 2018). The parameter values of the two models that result in best simulation of the calibration test results for the five soil layers are summarized in Tables 1 and 2.

Table 2 Hardening soil model parameters for Soft clay and Stiff clay

Parameter	Symbol	Soft clay 3	Stiff clay
Effective friction angle (deg)	ϕ'	27	28
Angle of dilatancy at failure (deg)	ψ	0	0
Effective cohesion (kN/m^2)	c'	11.5	11.5
Reference secant modulus of triaxial compression test (kN/m^2)	E_{50}^{ref}	800	9500
Reference tangent modulus of primary oedometer loading (kN/m^2)	E_{ode}^{ref}	850	12000
Reference unload-reload modulus of triaxial compression test (kN/m^2)	E_{ur}^{ref}	8000	30000
Failure ratio	R_f	0.9	0.9
Exponent of stress-level dependency of modulus	m	1	1
K_0-value for normal consolidation (default $K_0^{nc} = 1 - sin\, sin\, \varphi$)	K_0^{nc}	0.546	0.5
Poisson's ratio determined from unload-reload cycle	υ_{ur}	0.2	0.2
Threshold shear strain	$\gamma_{0.7}$	0.0365	0.0512
Reference small strain shear modulus (kN/m^2)	G_0^{ref}	48,000	48,000

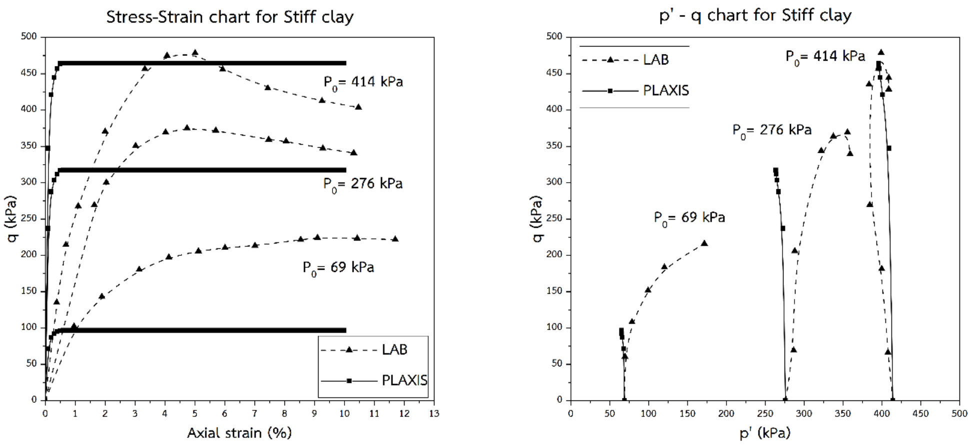


Fig. 6 Stress-Strain chart and p' – q chart for Stiff clay

Numerical parametric study and development of design charts

A numerical parametric study was carried out using the already discussed finite element model, the constitutive models, and their calibrated parameter values. In the present study, excavation depths of 3, 4, and 5 m were tried with sheet-pile embedded lengths of 8, 10, 12, 14, 16, and 18 m. Surcharge loads of 10, 15, and 20 kN/m^2 were considered. Two commonly used sizes of sheet piles, i.e., SP-III and SP-IV, with different nominal yield strengths of SY295 (295 ksc) and SY390 (390 ksc) were included, and H-shaped strut sections, namely H300X300 and H350X350, were analyzed (TIS 1390–1996). It should be noted that due to space limitations, only an excavation width of 10 m was considered herein. The effect of variation on the sheet pile deformations is therefore beyond the scope of this study.

Validation with field monitoring results

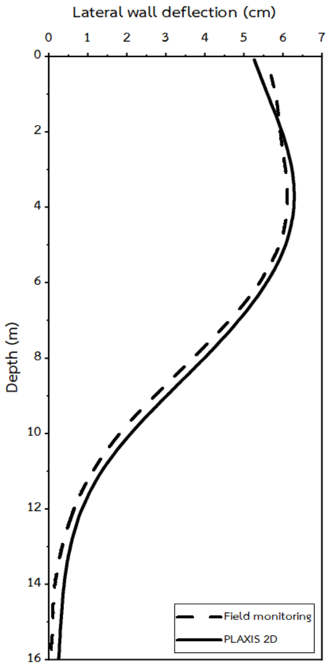


Fig. 7 The numerical results so obtained are compared with the inclinometer results

The simulative capability of the present finite element analysis is validated with the monitoring results of an actual excavation project in soft Bangkok clay. Such a project is part of the foundation work of a high-rise residential building in Bangna District of Bangkok. The excavation depth and width are 5.4 m and 101.3 m, respectively. The sheet-pile depth of embedment is 16 m. SP-IV and SY390 sheet piles were used, along with H300x300 struts installed in a single level 1.1 m below ground. The excavation was done in four steps of about 1.3 meters each. At the time of the field monitoring, it was carefully estimated that the surcharge load was close to 5 kN/m^2. The corresponding wall deflections were tracked using an inclinometer. A finite element analysis with the excavation geometry and sheet-pile and strut properties was performed. The numerical results so obtained are compared with the inclinometer results in Fig. 7. The numerical wall deflections are in excellent agreement with the inclinometer results. This suggests that the finite element analysis with the soil constitutive models and their parameter values is capable of simulating the actual wall behavior during excavation in soft Bangkok clay with good accuracy.

Conclusions

The parameters from the Modify Cam-Clay model for soft clay and the Hardening Soil model for stiff clay are used in this study to analyze sheet pile deformation. It can represent the behavior of the clay in the field. The struts are installed at a depth of 1 m below the ground surface, and two strut cross-sections, i.e., H300x300 and H350x350, are employed. The sheet pile sizes used in this study are SP-III and SP-IV. The two strut sizes and two sheet-pile sizes are often used in excavations in Bangkok subsoils. It can be observed that the maximum deformation of the sheet pile varies with excavation depth. Moreover, the maximum bending moments occur at the excavation depths of approximately 5 m for sheet-pile walls with embedment depths ranging from 8–18 m, and the maximum displacement occurs at a location close to the excavation depth, which is similar to the data obtained from field testing.

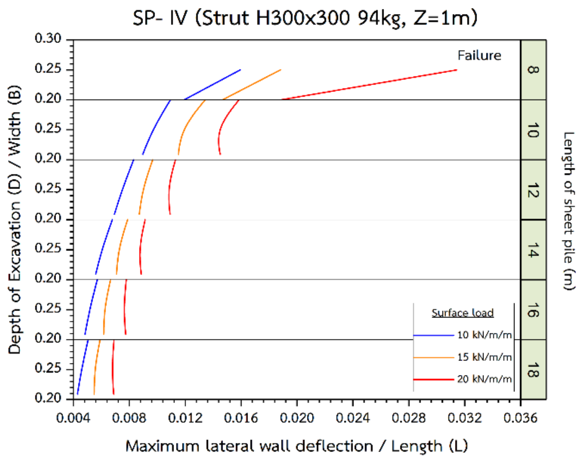


Fig. 8 Maximum lateral walls deflection of sheet pile SP-IV (Strut at Z=1m, H300)

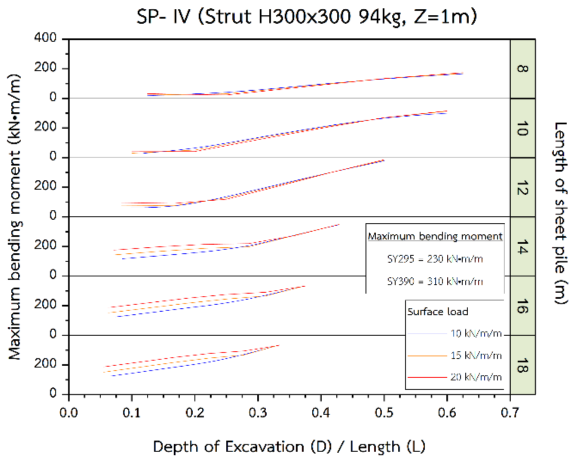


Fig. 9 Maximum bending moment of sheet pile SP-IV (Strut at Z=1m, H300)

Acknowledgement

The first author received a scholarship from Mahidol University's Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering. The first author would like to thank Prof. Pongpipat Anantanasakul for his advice. The authors wish to thank Dr. Siriwan Waichita of Altemtech for supplying information on sheet pile movement at the Bang Na site.

References

Balasubramaniam, A.S. 1977. Deformation characteristics of weathered bangkok clay in triaxial extension. Geotechnique 27: 75–92.

Balasubramaniam, A.S., ASCE, M., Chaudhry, A.R. 1978. Deformation and strength characteristics of soft bangkok clay. Geotech. Eng. 1153–1168.

Bergado, D. 1995. FE analysis of grid reinforced embankment system on sotf bangkok clay. Comput. Geotech. 17, 447–471.

Likitlersuang, S., Chheng, C., Surarak C., Balasubramaniam, A.S. 2018. Strength and stiffness parameters of bangkok clays for finite element analysis. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 49: 150–156.

Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A.S., Oh, E., Guan, H. 2012. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff bangkok clays. Soils Found. 682–697.

Ukritchon, B., Whittle, J.A., Scott, S.W. 2002. Undrained stability of braced excavations in Clay. J. Geotech. Geoenviron. 129: 738–755. doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(738)

การกอบกู้วัสดุก่อสร้างในระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน: กรณีศึกษาอาคารพาณิชยกรรมในประเทศไทย

Salvaging building materials: Case study of commercial building in Thailand

ธิดารัตน์ มีศรีดี*, **ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**

Thidarat Misridee*, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Structural Technology for the Built Environment, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thidarat.mis@ku.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาเมืองทำให้บริบทการใช้สิ่งปลูกสร้างโดยเฉพาะอาคารพาณิชยกรรมริมถนนหลายสายในกรุงเทพมหานครต้องปรับเปลี่ยนไป จึงอาจมีการรื้อถอนเกิดขึ้นมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณของวัสดุโครงสร้างในอาคารเก่าที่มีอยู่เดิมที่สามารถกอบกู้นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยศึกษาจากกรณีศึกษาอาคารพาณิชยกรรม 4 ชั้น 8 คูหา ขนาดพื้นที่ใช้สอย 1,280 ตารางเมตร โดยการสร้างแบบจำลองโมเดลสามมิติ ด้วยโปรแกรม Autodesk Revit เพื่อคำนวณหาปริมาณวัสดุ และเงื่อนไขในการพิจารณาตัดแยกโครงสร้างออกเพื่อนำกลับมาใช้ พบว่าสามารถกอบกู้เสาและคานได้ คิดเป็นร้อยละ 21 และ ร้อยละ 20 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นมูลค่าวัสดุก่อสร้าง เท่ากับ 362,128 บาท และสามารถลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนเทียบเท่าจากการผลิตวัตถุดิบคอนกรีตและเหล็กเสริมใหม่ ได้ 76,327.55 tonCo_2eq./unit ตามลำดับ

คำสำคัญ: การกอบกู้วัสดุก่อสร้าง, การนำกลับมาใช้ใหม่, อาคารพาณิชยกรรม, การพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืน

Abstract

Urban development changes the way people utilize the existing constructed facilities especially shophouses along the Bangkok roads. This research aims to identify quantity of structural members which can be salvaged. The 4-floor and 8-row shophouse with usable space of 1,280 sq.m. is used as a case study. 3-D model was developed using Autodesk Revit in order to calculate quantity of materials and identification of demolition method. It was found that columns and beams can be salvaged at 21% and 20% respectively. This can save 362,128 Baht of construction costs and 76,327.55 tonCO_2eq./unit.

Keywords: Reuse, Salvage construction materials, Shophouse, Sustainable urban development

คำนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นอุตสาหกรรมที่สร้างของเสียมากที่สุดในโลก ในประเทศที่พัฒนาแล้วอย่าง จีน สหรัฐอเมริกา และสหภาพยุโรป (EU) สร้างขยะจากการก่อสร้างและรื้อถอน (Construction and Demolition Waste, CDW) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.13 พันล้านตัน/ปี, 534 ล้านตัน/ปี, และ 333 ล้านตัน/ปี ตามลำดับ (USEPA, 2016; Eurostat, 2017; Menegaki, 2018; Kabirifar et al., 2021) และคาดว่าประมาณ 35% ของปริมาณของเสีย จากการก่อสร้างและรื้อถอน ได้ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ โดยไม่มีการบำบัด (Menegaki, 2018) โดยวัสดุที่ได้จากการรื้อถอนส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคอนกรีต เหล็ก และอิฐ ซึ่งในบางครั้งศักยภาพของวัสดุเหล่านี้ ยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้

ปัจจุบันกรุงเทพมหานคร มีอาคารพาณิชย์/ตึกแถว ที่ตั้งอยู่ริมแนวถนนสายหลักเป็นจำนวนมาก วัตถุประสงค์เดิม ของการใช้งานอาคารเหล่านี้ เป็นไปเพื่อการพาณิชยกรรม ค้าขาย และอยู่อาศัยเป็นหลัก แต่ในปัจจุบัน บริบทที่เปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม อาทิ การปรับเปลี่ยนผังเมือง การมาถึงของรถไฟฟ้าสื่อสารมวลชน ทำให้มีความต้องการปรับเปลี่ยนการใช้งานพื้นที่ตลอดแนวถนน โดยการแทนที่ด้วยอาคารสูง อาคารสำนักงาน คอนโดมิเนียม หรือห้างสรรพสินค้า จึงเป็นผลให้ต้องมีการปรับปรุงพื้นที่ โดยรื้อถอนอาคารที่มีอยู่เดิมเพิ่มมากขึ้น โดยที่ศักยภาพของวัสดุโครงสร้างประกอบอาคารที่ต้องรื้อถอนนี้ ยังไม่หมดอายุการใช้งาน

ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณวัสดุโครงสร้างอาคารที่มีอยู่เดิม ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของวัสดุโครงสร้างและทรัพยากรที่มีอยู่แล้วในระบบให้สามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุดและลดการสร้างของเสียให้น้อยที่สุด

การนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reused)

ข้อมูลจาก The World Economic Forum (2022) พบว่า วัสดุ 4 ประเภท ที่มีการปล่อยมลพิษ มากกว่า 60% ของภาคอุตสาหกรรม คือ เหล็ก, ซีเมนต์ อลูมิเนียม และเคมีภัณฑ์ โดยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดซ์ออกไซด์ (carbon dioxide, CO2) รวม 7.1 GT/ปี ซึ่งความต้องการเหล็ก และซีเมนต์ ของภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง คิดเป็น 56% และ100% ตามลำดับ

ใน Fig. 1 แสดงการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ของการผลิตวัสดุก่อสร้างคอนกรีตผสมเสร็จใหม่ กับ คอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled) และคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ซ้ำ (Reused) เปรียบเทียบคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ 3 (Recycled3) กับคอนกรีตผสมเสร็จใหม่ จะเห็นว่าการใช้วัตถุดิบหลัก ในคอนกรีต Recycled3 ลดลง 50% แต่ค่าพลังงานไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่คอนกรีตที่นำกลับมาใช้ซ้ำ (Reused) พลังงานมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled) อยู่ระหว่าง 92–97% ซึ่งค่าพลังงานนี้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (Glias, 2013).

จากข้อมูลข้างต้น จะแสดงให้เห็นว่าหากวัสดุก่อสร้างสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reused) ได้โดยตรง โดยไม่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล (Recycled) จะสามารถช่วยลดต้นทุนทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างมาก

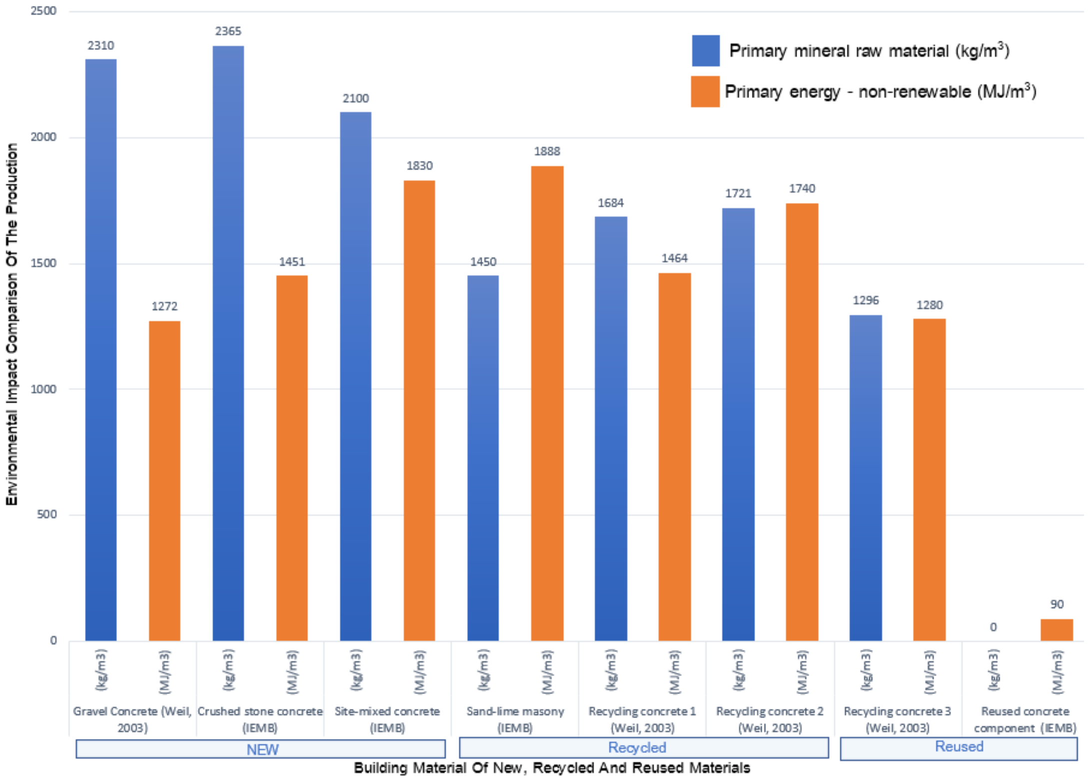


Fig. 1 Environmental impact comparison of the production (up to the factory gate) of a cubic meter of building material of new, recycled, and reused materials (Glias A, 2013)

ระเบียบวิธีการวิจัย

การศึกษานี้ ดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณและพลังงานของคอนกรีต และเหล็กเสริม ในอาคารที่มีอยู่เดิม เปรียบเทียบกับปริมาณวัสดุและพลังงานที่กอบกู้ได้ หากรื้อถอนและนำชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารเดิมกลับมาสร้างอาคารใหม่ โดยศึกษาจากอาคารกรณีศึกษา ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองโมเดล 3D ด้วยโปรแกรม Autodesk Revit แสดงแผนผังการศึกษาดังรูป Fig. 2

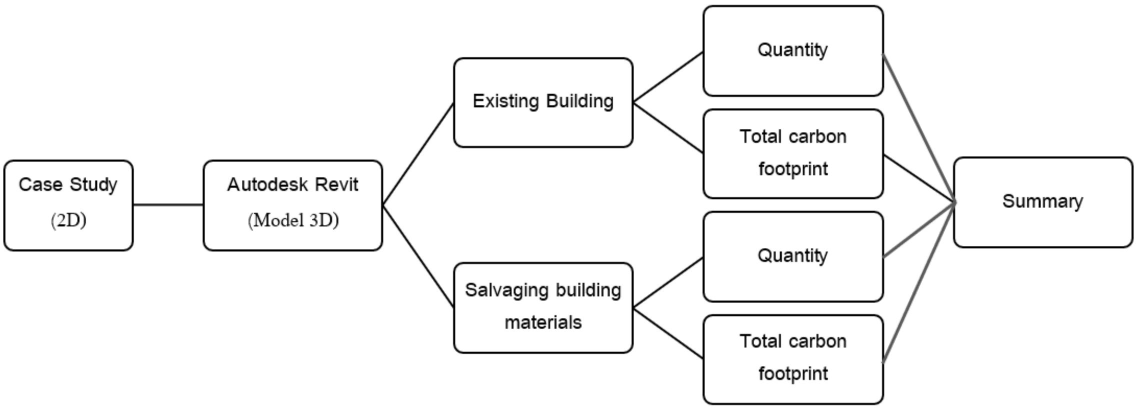


Fig. 2 Outline of the research methods.

Fig.3 แสดงแปลน 2D ของอาคารกรณีศึกษา อาคารพาณิชยกรรม 4 ชั้น 8 คูหา ขนาดพื้นที่ใช้สอย 1,280 ตารางเมตร และ Fig.4 เป็นการสร้างแบบจำลองโมเดล 3D ด้วยโปรแกรม Autodesk Revit โดยเป็นการจำลองกิจกรรมเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การวิเคราะห์ปริมาณคอนกรีต และเหล็กเสริม ที่ใช้ในอาคารเดิม และปริมาณวัสดุที่สามารถถกอบกู้ได้

2. การวิเคราะห์เงื่อนไข ในรูปแบบจำลองโมเดล 3D เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกิจกรรม ของโครงสร้างอาคารเดิม โดยใช้พิจารณาชิ้นส่วน ที่สามารถ ตัด-แยกโครงสร้าง แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้

3. ติด Label เพื่อคัดแยกองค์ประกอบที่นำกลับมาใช้ซ้ำ (Reused)

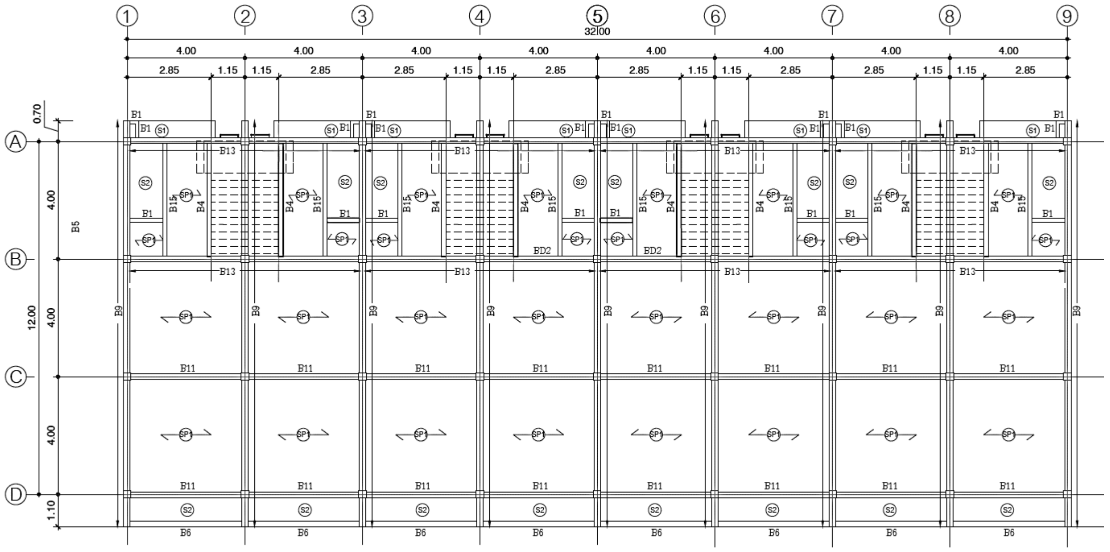


Fig. 3 2D Plan

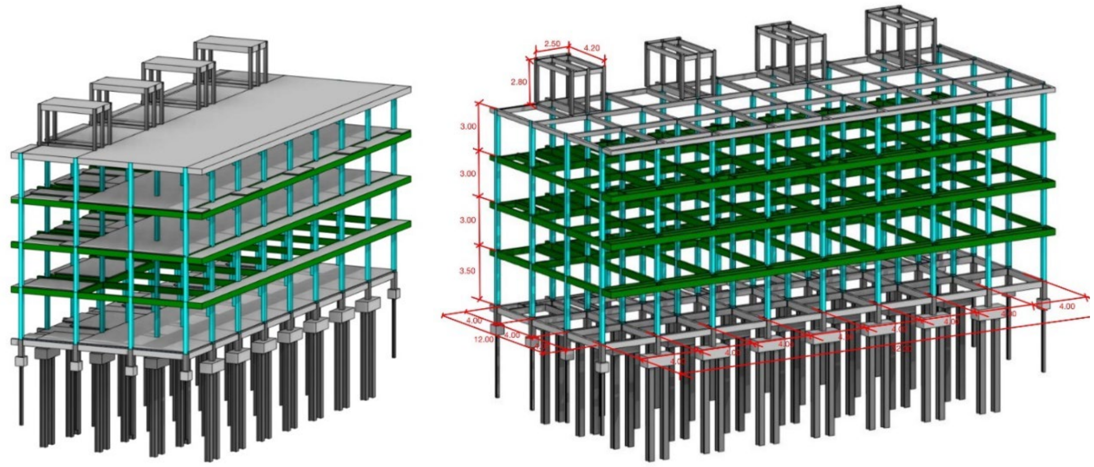


Fig. 4 3D Model

จากรูป Fig.4 3D Model แสดงให้เห็นสีของชิ้นส่วน (Label) เป็นการคัดแยกวัสดุ ที่จะนำกลับมาใช้ซ้ำได้ทั้งชิ้น กับวัสดุที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำทั้งชิ้นส่วนได้ ในการศึกษานี้เลือกศึกษาวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ทั้งชิ้น และเลือกใช้ชิ้นส่วนที่ได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกน้อยที่สุด เพื่อพิจารณาชิ้นส่วนที่มีสภาพสมบูรณ์ที่สุด จึงเลือกพิจารณาชิ้นส่วนที่อยู่ในชั้น 2 ถึง ชั้น 4 เนื่องจากเป็นช่วงที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมน้อย ในขณะที่ชิ้นส่วนโครงสร้าง บริเวณชั้น 1 และชั้นหลังคา จะสัมผัสความชื้นและคลอไรด์มากกว่า จึงไม่พิจารณาใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากยังต้องมีการประเมินสภาพความสมบูรณ์ของโครงสร้างเพิ่มเติมก่อน ในส่วนของพื้น เป็นพื้นสำเร็จรูป Solid Plank การรื้อถอนเพื่อกอบกู้นำกลับมาใช้ซ้ำ จำเป็นต้องใช้เทคนิคในการรื้อถอนเพื่อให้พื้นเดิมอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ ซึ่งยังต้องมีการศึกษาถึงแนวทางการรื้อถอน และการประเมินสภาพของพื้นสำเร็จรูปหลังการรื้อถอน การศึกษานี้จึงเลือก

ศึกษา ในส่วนของ เสา และคาน ซึ่งเป็นเฟรมโครงสร้างของอาคาร ที่ตัด-แยก ชิ้นส่วนออกมา และสามารถนำไปประกอบเป็นอาคารใหม่ได้ ในรูปแบบคล้ายเลโก้ (Lego)

Table 1 The quantity of materials salvaging building materials.

Structural Parts	Existing Building		Salvaging building materials	
	Concrete (ton)	Rebar (ton)	Concrete (ton)	Rebar (ton)
Footing	212.32	1.78	-	-
Column	81.48	6.61	66.07	5.26
Beam	267.17	17.83	174.10	4.23
Slab	473.76	5.09	-	-
Stair	95.90	15.14	-	-
Total	1,130.64	46.45	240.17	9.49
% Salvaging building materials			21%	20%

จาก Table 1 จะเห็นว่า สามารถกู้คืนคอนกรีตและเหล็กเสริม ของโครงสร้างอาคารเดิม ได้ 21% และ 20% ของปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมทั้งหมดของอาคารเดิม ตามลำดับ และหากสามารถนำพื้นสำเร็จรูป ในชั้น 2 ถึงชั้น 4 กลับมาใช้ซ้ำได้ การกู้คืนคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นอีกราวๆ 7%ของปริมาณคอนกรีตอาคารเดิม Table 2 แสดงราคากลางของค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน อ้างอิงจากบัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน ประจำปี พ.ศ.2565 ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (OBEC) และ Table 3 แสดงให้เห็นถึงราคาวัสดุก่อสร้างที่สามารถกู้คืนได้ ประมาณ 362,128 บาท หากนำวัสดุที่กอบกู้นี้ไปใช้ซ้ำได้โดยตรง

Table 2 Prices of construction materials and labor costs in 2022 (OBEC)

Material	Unit	Material cost (Bath)	Labour cost (Bath)
Concrete 240 ksc	m^3	2261.00	485.00
Rebar			
- RB6	Per 10 m.	57.00	10.00
- DB12	Per 10 m.	217.00	30.00
- DB16	Per 10 m.	383.00	53.00
- DB20	Per 10 m.	599.00	72.00
- WIRE MESH Ø 4.0 mm.0.20 x 0.20 m.	m^2	30.00	5.00

Table 3 Compare the quantity of materials and prices of new construction and salvaging building materials.

Case Study	Concrete (ton)	Rebar (ton)	Cost (Bath)
Existing Building	1,130.64	46.45	3,184,355.52
Salvaging building materials	240.17	9.49	362,128.47
%Save raw materials and Cost	21%	20%	11%

Table 4 และ Table 5 เป็นการแสดงค่าปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ และการขนส่งคอนกรีตและเหล็กเสริม ใช้การอ้างอิงจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (2565).

Table 4 Calculation of carbon footprint during raw material acquisition.

Carbon Footprint: Raw Material				Existing Building	Salvaging Building
Compound	Existing Building Quantity(ton)	Salvaging Building Quantity (ton)	Emission Factor ($kgCo_2eq./unit$)	Carbon Footprint ($tonCo_2eq./unit$)	Carbon Footprint ($tonCo_2eq./unit$)
Concrete 240 ksc	1,130.64	240.17	317.00	358,411.66	76,133.26
Rebar	46.45	9.49	1.7600	81.74705	16.71
Total Carbon Footprint				358,493.41	76,149.97

Table 5 Calculation of the carbon footprint during transportation

Carbon Footprint: Transportation								Existing Building	Salvaging Building
Compound	Vehicle	Existing Building Quantity (ton)	Salvaging Building Quantity (ton)	Distance (km)	Vehicle maximum load (ton)	Emission Factor ($kgCo_2eq./unit$) Departure	Return	Carbon Footprint ($tonCo_2eq./unit$)	Carbon Footprint ($tonCo_2eq./unit$)
Concrete 240 ksc	10-wheeler cement truck 100% Loading	1,130.64	240.17	15.00	12.00	0.0471	0.632	2,214.07	144.40
Rebar	6-wheel truck 75% Loading	46.45	9.49	15.00	12.00	0.0768	0.4926	99.57	33.19
Total Carbon Footprint								2,313.64	177.59

Table 6 Summary carbon footprint of concrete, reinforced and total cost salvaging of carbon credit

Compound	Existing Building Carbon Footprint ($tonCo_2eq./unit$)	Salvaging Building Carbon Footprint ($tonCo_2eq./unit$)	Salvaging Building Carbon Credit Price (Baht/tonCo2eq.)
Concrete 240 ksc	360,625.73	76,277.65	5,871,853.65
Rebar	181.32	49.90	3,841.23
Total Carbon Footprint	360,807.05	76,327.55	
Total Cost Salvaging of Carbon Credit			5,875,694.89

*Carbon Credit Price 76.98 Baht/tonCo2eq. Available Source: http://carbonmarket.tgo.or.th/

จาก Table 6 จะพบว่า หากสามารถนำชิ้นส่วนโครงสร้างคาน-เสา ของอาคารเดิมที่มีอยู่แล้วในระบบ กลับมาใช้ซ้ำได้โดยตรง จะสามารถลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ของทั้งกระบวนการผลิตและขนส่ง ของคอนกรีตและเหล็กเสริม ได้ 76,277.65 และ 49.90 $tonCo_2eq./unit$ ตามลำดับ และหากได้รับใบอนุญาตปล่อยก๊าซเรือนกระจก (allowance) จะสามารถขายคาร์บอนเครดิตที่กอบกู้กลับมาได้นี้ มีมูลค่า 5,875,694.89 บาท ซึ่งจากข้อมูลราคา ซื้อ-ขาย คาร์บอนเครดิตในตลาดคาร์บอน (อบก.) ปี 2565 ราคาเฉลี่ยอยู่ที่ 76.98 บาท/$tonCo_2eq.$

สรุป

จากผลการศึกษาปริมาณและพลังงาน ของคอนกรีตและเหล็กเสริมในอาคารที่มีอยู่เดิม เปรียบเทียบกับปริมาณและพลังงานของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่สามารถนำชิ้นส่วนโครงสร้างเดิมกลับมาใช้ซ้ำ ในโครงสร้างอาคารเดิมประกอบด้วย ปริมาณคอนกรีต 1,130 ตัน และเหล็กเสริม 46.45 ตัน จะสามารถนำชิ้นส่วนโครงสร้างเดิมกลับมาใช้ซ้ำ โดยจะกอบกู้คอนกรีตได้ 240.17 ตัน และเหล็กเสริม 9.49 ตัน หรือคิดเป็น 21%และ 20% ตามลำดับ จากปริมาณทั้งหมดในโครงสร้างอาคารเดิม ซึ่งคิดเป็นมูลค่าวัสดุก่อสร้าง เท่ากับ 362,128 บาท และสามารถลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ จากการผลิตวัตถุดิบคอนกรีตและเหล็กเสริมใหม่ ได้ 76,277.65 และ 49.90 $tonCo_2eq./unit$ ตามลำดับ และมูลค่าการขายคาร์บอนเครดิตที่ได้นี้ มีมูลค่า 5,875,694.89 บาท

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ เป็นการพิจารณานำชิ้นส่วนของคาน และเสากลับมาใช้ซ้ำ เนื่องจากการศึกษาการรื้อถอน และการประกอบพื้นโครงสร้างเดิมหลังจากการรื้อถอน และนำกลับมาใช้ซ้ำยังไม่มีการศึกษาที่แพร่หลายมากนัก จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านของแนวทางการใช้งานพื้นเดิม การรื้อถอน และการประกอบพื้นโครงสร้างเดิม เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ
2. ด้านการออกแบบโครงสร้างอาคาร ผู้ออกแบบควรหันมาพิจารณา การออกแบบเพื่อการถอดประกอบ (DFD) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานในอนาคต ไม่ว่าจะเป็นความต้องการปรับเปลี่ยนพื้นที่อาคารที่ยืดหยุ่นได้ หรือการรื้อถอนแล้วนำชิ้นส่วนกลับมาสร้างเป็นอาคารใหม่ เพื่อตอบสนองต่อความท้าทายทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ
3. การซื้อ-ขายคาร์บอนเครดิตในประเทศไทย จะต้องขึ้นทะเบียนโครงการและได้รับการรับรองคาร์บอนเครดิต โดยการประเมินจากองค์การบริการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) สามารถติดต่อขอคำแนะนำเพิ่มเติม ได้ที่ https://ghgreduction.tgo.or.th

เอกสารอ้างอิง

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2565. คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ http://carbonmarket.tgo.or.th/, 29 พฤศจิกายน 2565.

Akanbi et al., 2018. Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. University of the West of England, UK.

European Commission. 2022. Circular economy action plan. Available Source https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en, 29 September 2022.

Eurostat. 2023. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE. Rev. 2 activity. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en, 25 January 2023

Glias, A. 2013. The 'Donor Skelet': Designing with re-used structural concrete elements. M.s. Thesis. Delft University of Technology, Netherlands. pp. 18

Kabirifar et al., 2021. A systematic review of construction and demolition waste management in Australia: Current Practices and Challenges. University of New South Wales, Australia.

Menegaki, M., 2018. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. National Technical University of Athens, Greece.

The World Economic Forum. 2022. Circular economy for net-zero industry transition, the future of industry is circolar. https://www.weforum.org/circular-economy-for-net-zero, 29 September 2022.

การตรวจสอบพฤติกรรมเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์สำหรับประยุกต์ใช้งานก่อสร้าง

Investigation on mechanical behaviors of concrete reinforced with sisal fiber for construction applications

ณัฐวัฒน์ เสาะสูงเนิน[a], **จักษดา ธำรงวุฒิ**[a,*], **คีตาญชลี ชายทวีป**[a], **ภัทรดนัย โพธิ์ลา**[a], **ชาญชัย เงาะปก**[a], **กรกต เลิศชัยพงศ์**[b]

Nattawat Sohsoongnoen[a], Jaksada Thumrongvut[a,*], Keetalchalee Chaytaweep[a], Pattaradanai Phola[a], Chanchai Ngohpok[a], Korakot Lerdchaipong[b]

[a]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

[a]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

[b]สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

[b]Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: jaksada.th@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ปริมาณของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ใช้เสริมกำลังมีค่าเท่ากับ 0.5% 1.0% และ 1.5% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตแบบปกติ (ไม่เสริมเส้นใย) คุณสมบัติเชิงกลที่ทดสอบประกอบด้วย กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงผ่าซีก และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่เสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ คอนกรีตที่เสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงผ่าซีกและกำลังรับแรงดัด ปริมาณเส้นใยเหมาะสมต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์คือ 1.0% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สุดท้ายการประยุกต์ใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นวิธีการทางเลือกหนึ่งที่มีผลเชิงบวกในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, กำลังรับแรงดึงผ่าซีก, คอนกรีตเสริมเส้นใย, เส้นใยป่านศรนารายณ์

Abstract

In this study, the investigation of the mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete (SFRC) was reported. Sisal fibers were added to the mix at percentages of 0.5% 1.0% and 1.5% by weight of cement and were compared with conventional concrete. The mechanical properties reported are compressive strength, split tensile strength, and flexural strength. From the study, it was concluded that the sisal fiber mixed concrete increased the compressive strength of the concrete. The sisal fiber-reinforced concrete also improved the split tensile strength and flexural strength of concrete. The recommended optimum mix based on the mechanical properties in this study is 1.0% sisal fiber addition. Finally, sisal fiber is recommended as the alternate method for economic and environmental aspects.

Keywords: Compressive strength, Fiber-reinforced concrete, Flexural strength, Sisal fiber, Split tensile strength

บทนำ

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าคอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังอัดที่สูง ในทางกลับกันคอนกรีตมีข้อด้อยในด้านความสามารถต้านทานแรงดึงที่ต่ำ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ahmed et al., 2021) นอกจากนี้ข้อเสียของคอนกรีตอีกประการหนึ่งคือการเกิดรอยแตกร้าวได้ง่าย รอยแตกร้าวดังกล่าวอาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเกิดจากการหดตัวหรือเกิดจากเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิและความชื้น การแตกร้าวของคอนกรีตในลักษณะนี้แม้ไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างในระยะเริ่มต้น แต่อาจส่งผลต่อโครงสร้างคอนกรีตในระยะยาวด้านความแข็งแรง โดยเมื่อเกิดการแตกร้าวในบริเวณพื้นที่รับแรงดึง (tension zone) รอยร้าวเหล่านี้อาจเป็นช่องทางทำให้ความชื้นหรือสารเคมีเข้าทำปฏิกิริยาต่อเหล็กเสริมภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดเป็นสนิม (Almusallam, 2001) ส่งผลให้ชิ้นส่วนโครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับแรง

ที่ผ่านมามีนักวิจัยได้ให้ความสนใจและแก้ปัญหาดังกล่าว หนึ่งในแนวทางแก้ปัญหาได้แก่การใช้เส้นใยผสมในส่วนผสมของคอนกรีต การใช้เส้นใยผสมกระจายในเนื้อคอนกรีตถูกเรียกว่า คอนกรีตเสริมเส้นใย (fiber-reinforced concrete, FRC) (Torres and Lantsoght, 2019) การเพิ่มเส้นใยในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้คุณสมบัติกำลังรับแรงดึง โมดูลัสการแตกร้าว ความเหนียว และการดูดซึมพลังงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Kang et al., 2016) โดยความสามารถในการรับแรงดึงหรือแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยขึ้นกับชนิด รูปร่าง ขนาด ปริมาณของเส้นใย และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ (Reis, 2006) ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติโดยการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ (sisal fiber) เป็นส่วนผสม เส้นใยป่านศรนารายณ์มีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ พื้นผิวไม่เรียบ ทนทานภายใต้ความชื้น และมีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าเส้นใยจากพืชชนิดอื่น (Acosta-Calderon et al., 2022; Beskopylny et al., 2022) Fig. 1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยป่านศรนารายณ์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเน้นศึกษากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ รวมถึงศึกษาผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยจะช่วยส่งเสริมให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยและสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานงานก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง (Thumrongvut et al., 2022)

Fig. 1 Physical characteristics of sisal fiber

อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ศึกษา

1) คอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ordinary Portland cement, OPC) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 30 MPa (ประมาณ 300 kg/cm^2) ของแท่งทรงกระบอกมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 m สูง 0.20 m ที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นกำลังรับแรงอัดในช่วงใช้งานและมักใช้ก่อสร้างอาคารในประเทศไทย

2) มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำล้างสะอาดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.53 ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.32

3) มวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีตเป็นหินปูน (limestone) ที่มีขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว (20 mm) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.33% ค่าหน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นของมวลรวมหยาบเท่ากับ 1,573 kg/m^3

4) น้ำประปาสะอาด

5) เส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ใช้จากอำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ศึกษาเป็นคอนกรีตที่ออกแบบตามปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัย (ultimate compressive strength) ที่ต้องการเท่ากับ 30 MPa ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ตัวแปร ได้แก่ (1) ความยาวของเส้นใยป่านศรนารายณ์มี 3 ขนาด ได้แก่ 20 mm 40 mm และ 60 mm และ (2) ปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์ในส่วนผสมคอนกรีต 3 ค่า ได้แก่ 0.5% 1.0% และ 1.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยทั้งหมดจะถูกเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย (control concrete) Table 1 แสดงปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีก และการทดสอบกำลังรับแรงดัด

Table 1 Mix proportions of concrete reinforced with sisal fiber

Compressive Strength f_c', (MPa)	Portland Cement (kg)	Water (kg)	Fine Aggregate (kg)	Coarse Aggregate (kg)	Water/ Cement ratio	Sisal Fiber Content (% wt.)
30	370	205	758	1,056	0.55	0, 0.5, 1.0, 1.5

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีจำนวนทั้งหมด 81 ตัวอย่างถูกทดสอบเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลกับคอนกรีตปกติ (ไม่เสริมเส้นใย) จำนวน 9 ตัวอย่าง การตั้งชื่อตัวอย่างทดสอบใช้สัญลักษณ์ดังแสดงใน Fig. 2 โดยมีหลักการดังต่อไปนี้ X หมายถึง ลักษณะการทดสอบมี 3 การทดสอบ ได้แก่ C แทน การทดสอบกำลังรับแรงอัด F แทน การทดสอบกำลังรับแรงดัด และ T แทน การทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีก AA หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยขอคอนกรีตในหน่วย MPa YY หมายถึง ความยาวของเส้นใยป่านศรนารายณ์ในหน่วย mm ZZ หมายถึง ปริมาณของเส้นใยป่านศรนารายณ์ในส่วนผสมในหน่วยร้อยละ

XAA-YY-ZZ

Fig. 2 Type specimen designation

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้ถูกเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน การเตรียมคอนกรีตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C39 ASTM C496 และ ASTM C78 สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีก และทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามลำดับ เมื่อผสมเสร็จตรวจสอบค่าการยุบตัว (slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 โดยผลสอบค่าการยุบตัวมีค่าอยู่ในช่วง

ระหว่าง 75–120 mm และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยุบตัวมีค่าลดลง จากนั้นนำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อ เมื่อหล่อตัวอย่างทดสอบเรียบร้อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกและบ่มด้วยการใช้แผ่นพลาสติกหุ้ม เมื่อครบตามอายุบ่ม 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบวัดขนาด ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบตามมาตรฐานที่กล่าวมาข้างต้น

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ดังแสดงใน Fig. 3 พบว่าคอนกรีตที่เสริมปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงสุด ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างทดสอบ C30-20-1.0 C30-40-1.0 และ C30-60-1.0 มีกำลังรับแรงอัดคอนกรีตเท่ากับ 36.2 MPa 35.4 MPa และ 34.7 MPa ตามลำดับ รองลงมาคือ ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 0.5% และ 1.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bharathi et al. (2021) ซึ่งทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดในคอนกรีตกำลังปกติและกำลังสูงพิเศษ (ultra-high strength concrete) นอกจากนี้ส่วนผสมที่มีปริมาณของเส้นใยป่านศรนารายณ์เกินกว่า 1.5% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตแห้งต่ำกว่าความข้นเหลวที่เหมาะสมและส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้ (workability) (Sivakandhan et al., 2019)

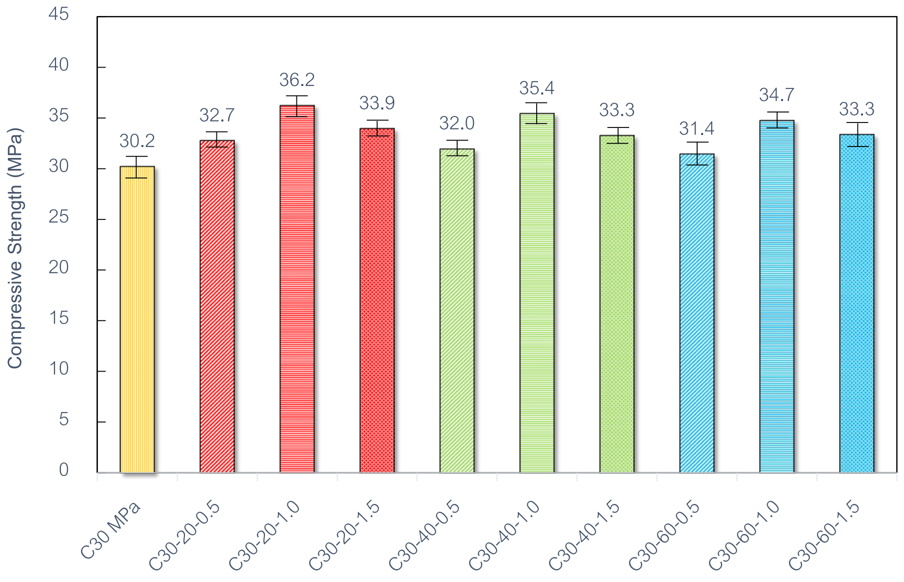


Fig. 3 Relationship between compressive strength and sisal fiber content

ในส่วนผลกระทบของความยาวเส้นใยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพบว่า ความยาวที่สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดคอนกรีตได้มากที่สุด คือความยาวเท่ากับ 20 mm รองลงมา ความยาวเส้นใยเท่ากับ 40 mm และ 60 mm ตามลำดับ โดยสาเหตุเมื่อคอนกรีตผสมเส้นใยที่มีความยาวเท่ากับ 40 mm และ 60 mm มีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากภายใต้กระบวนการผสมเส้นใยลงในเนื้อคอนกรีต เส้นใยดังกล่าวจะเกิดการจับกลุ่มเป็นก้อนและกระจายตัวในคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ (Al-Tamimi et al., 2020) ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตเกิดช่องว่างระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม จึงทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดลดลง

กำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ดังแสดงใน Fig. 4 พบว่าคอนกรีตที่เสริมปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตสูงสุด ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างทดสอบ T30-20-1.0 T30-40-1.0 และ T30-60-1.0 มีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกคอนกรีตเท่ากับ 12.9 MPa 13.3 MPa และ 12.5 MPa ตามลำดับ รองลงมาคือ ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 0.5% และ 1.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Okeola et al. (2018) ซึ่งใช้ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 0% 0.5% 1.0% 1.5% และ 2.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

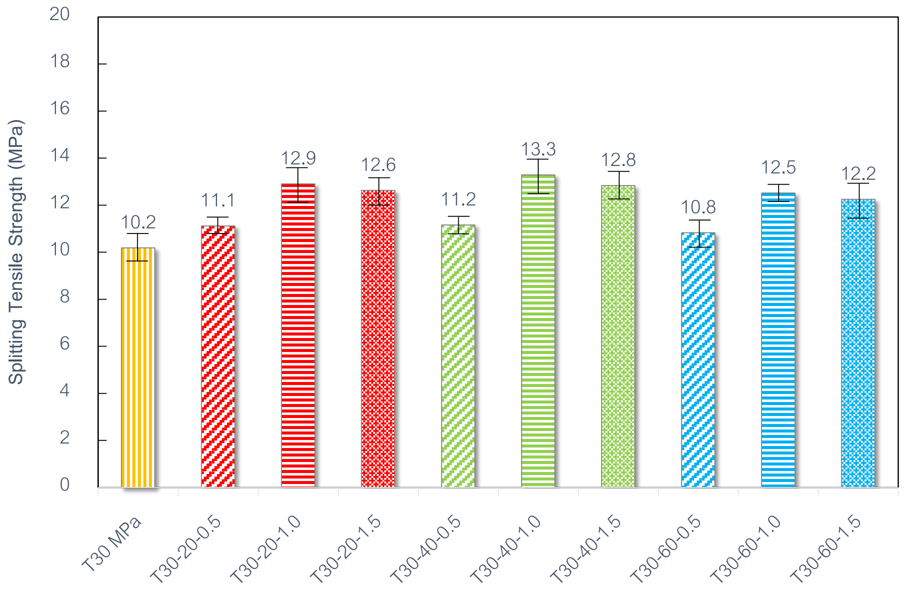


Fig. 4 Relationship between splitting tensile strength and sisal fiber content

ผลกระทบของความยาวเส้นใยที่มีผลต่อกำลังรับแรงดึงผ่าซีกพบว่า ความยาวที่สามารถพัฒนากำลังรับแรงดึงผ่าซีกคอนกรีตได้สูงสุด คือความยาวเท่ากับ 40 mm รองมาเป็นความยาวเส้นใยเท่ากับ 20 mm และ 60 mm ตามลำดับ โดยสาเหตุเมื่อคอนกรีตผสมเส้นใยที่มีความยาวเท่ากับ 20 mm และ 60 mm มีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกลดลง เนื่องจากเส้นใยความยาวเท่ากับ 20 mm ในส่วนผสมมีความยาวไม่เพียงพอสำหรับการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวเนื้อคอนกรีต และเส้นใยความยาวเท่ากับ 60 mm เกิดการจับกลุ่มเป็นก้อนและกระจายตัวในคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตเกิดช่องว่างระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมและทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกลดลง (Prakash et al., 2021)

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดหรือโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture) ของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ดังแสดงใน Fig. 5 พบว่าคอนกรีตที่เสริมปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตสูงสุด ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างทดสอบ F30-20-1.0 F30-40-1.0 และ F30-60-1.0 มีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกคอนกรีตเท่ากับ 9.7 MPa 10.0 MPa และ 9.4 MPa ตามลำดับ รองมาเป็นปริมาณเส้นใยเท่ากับ 0.5% และ 1.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Al Rawi and Al Khafagy (2011) ซึ่งศึกษาปริมาณเส้นใยเท่ากับ 0%

0.5% 1.0% และ 1.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผลกระทบของความยาวเส้นใยที่มีผลต่อกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพบว่า ความยาวที่สามารถพัฒนากำลังรับแรงดึงผ่าซีกคอนกรีตได้สูงสุด ได้แก่ ความยาวเท่ากับ 40 mm รองมาคือความยาวเส้นใยเท่ากับ 20 mm และ 60 mm ตามลำดับ โดยสาเหตุเมื่อคอนกรีตผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีความยาวเท่ากับ 20 mm และ 60 mm มีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกลดลง เนื่องจากเส้นใยความยาวเท่ากับ 20 mm ในส่วนผสมมีความยาวไม่เพียงพอสำหรับการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวเนื้อคอนกรีต ซึ่งคล้ายคลึงกับกำลังรับแรงดึงผ่าซีก นอกจากนี้ เส้นใยความยาวเท่ากับ 60 mm เกิดการจับกลุ่มเป็นก้อนและกระจายตัวในคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตเกิดช่องว่างระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม (Ahmad et al., 2022)

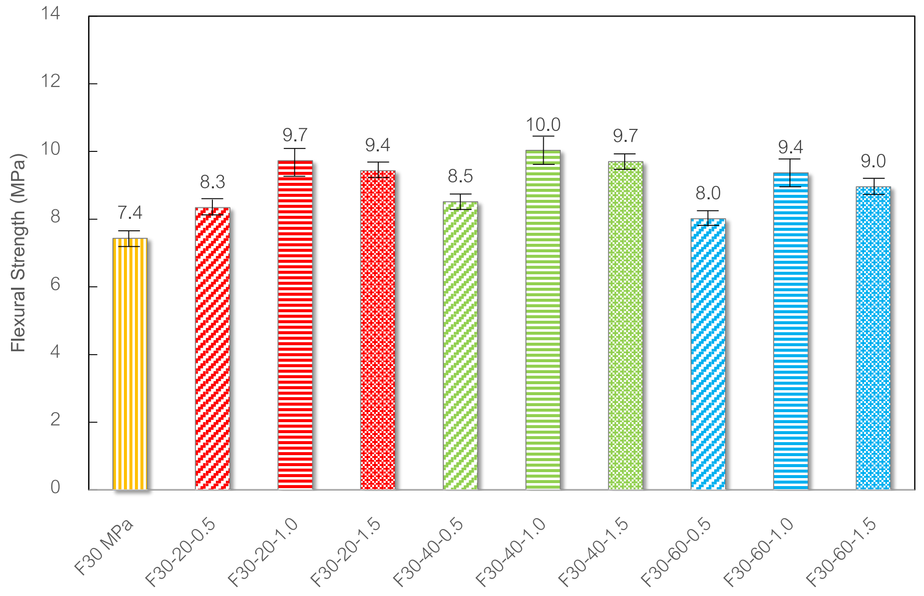


Fig. 5 Relationship between splitting tensile strength and sisal fiber content

สรุปผล

1) กำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์เกิดขึ้นที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และความยาวเส้นใยเท่ากับ 20 mm การเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดประมาณ 19.9% นอกจากนี้ส่วนผสมที่มีปริมาณของเส้นใยป่านศรนารายณ์เกินกว่า 1.5% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตแห้งต่ำกว่าความข้นเหลวที่เหมาะสมและส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้

2) กำลังรับแรงดึงผ่าซีกที่เหมาะสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์เกิดขึ้นที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และความยาวเส้นใยเท่ากับ 40 mm ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตสูงสุดเท่ากับ 13.3 โดยคอนกรีตผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีความยาวเท่ากับ 20 mm และ 60 mm มีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกลดลง

3) กำลังรับแรงดัดที่เหมาะสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์เกิดขึ้นที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และความยาวเส้นใยเท่ากับ 40 mm ซึ่งมีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมากที่สุดเท่ากับ 10.0 MPa โดยคอนกรีตผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีความยาวเท่ากับ 20 mm และ 60 mm มีกำลังรับแรงดัดลดลงเช่นเดียวกับกำลังรับแรงดึงผ่าซีก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

ACI. 2009. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI 211.1–91. ACI Committee 211.

Acosta-Calderon, S., Gordillo-Silva, P., García-Troncoso, N., Bompa, D.V., Flores-Rada, J. 2022. Comparative evaluation of sisal and polypropylene fiber reinforced concrete properties. Fibers. 10: 31.

Ahmad, J., Majdi, A., Deifalla, A.F., Ben Kahla, N., El-Shorbagy, M.A. 2022. Concrete reinforced with sisal fibers (SSF): Overview of mechanical and physical properties. Crystals 2022. 12: 952.

Ahmed, H.U., Faraj, R.H., Hilal, N., Mohammed, A.A., Sherwani, A.H. 2021. Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review, Compos. B. Eng. 215: 108769.

Al Rawi, K.H., Al Khafagy, M.A.S. 2011. Effect of adding sisal fiber and Iraqi bauxite on some properties of concrete. Journal of Techniques. 24: 58–73.

Almusallam, A.A. 2001. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. Constr Build Mater. 15: 361–368.

Al-Tamimi, G.K.A.A., Ragunath, S., Arunvivek, G.K. 2020. Feasibility study on utilization of sisal fiber and crushed tile in concrete utility block. International Journal of Innovations in Scientific and Engineering Research. 7: 189–195.

ASTM C143. 2020. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM C39. 2021. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM C496. 2017. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM C78. 2021. Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading). ASTM International, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

Beskopylny, A.N., Stelmakh, S.A., Shcherban, E.M., Mailyan, L.R., Meskhi, B., Shilov, A.A., Beskopylny, N., Chernilnik, A. 2022. Enhanced performance of concrete dispersedly reinforced with sisal fibers. Appl. Sci. 12: 9102.

Bharathi, S.V., Vinodhkumar, S., Saravanan, M.M. 2021. Strength characteristics of banana and sisal fiber reinforced composites. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1055: 012024.

Kang, S.T., Choi, J.I., Koh, K.T., Lee, K.S., Lee, B.Y. 2016. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. Compos. Struct. 145: 37–42.

Okeola, A.A., Abuodha, S.O., Mwero, J. 2018. Experimental investigation of the physical and mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete. Fibers 6: 53.

Prakash, R., Thenmozhi, R., Raman, S.N., Subramanian, C., Divyah, N. 2021. Mechanical characterisation of sustainable fibre-reinforced lightweight concrete incorporating waste coconut shell as coarse aggregate and sisal fibre. IJEST18: 1579–1590.

Reis, J.M.L. 2006. Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. Constr. Build Mater. 20: 673–678.

Sivakandhan, C., Murali, G., Tamiloli, N., Ravikumar, L. 2019. Studies on mechanical properties of sisal and jute fiber hybrid sandwich composite. Mater. Today: Proceedings. 21: 404–407.

Thumrongvut, J., Seangatith, S., Phetchuay, C., Suksiripattanapong, C. 2022. Comparative experimental study of sustainable reinforced Portland cement concrete and geopolymer concrete beams using rice husk ash. Sustainability. 14: 9856.

Torres, J.A., Lantsoght, E.O.L. 2019. Influence of fiber content on shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams. Fibers 7:102.

ผลกระทบจากการใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

Effects of using reclaimed asphalt pavement on compressive strength of concrete

บุญญฤทธิ์ ทองบ่อ[a], **จักษดา ธำรงวุฒิ**[a,*], **ศิริวุฒิ อนุศาสนรักษ์**[a], **พงศ์ธาดา กาตาสาย**[a],
เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[a], **นำชัย จ้อยสูงเนิน**[b]
Boonyarit Thongbo[a], Jaksada Thumrongvut[a,*], Siriwut Anusasnarak[a], Pongtada Katasai[a],
Cherdsak Suksiripattanapong[a], Namchai Joysoongnern[b]
[a]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000
[a]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
[b]วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000
[b]College of Innovative Skills, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: jaksada.th@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (reclaimed asphalt pavement, RAP) แทนที่มวลรวมหยาบในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1 มีค่าเท่ากับ 25 MPa 32 MPa และ 40 MPa ที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นมวลรวมหยาบถูกเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ จากการทดสอบพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ขึ้นกับปริมาณการแทนที่ RAP โดยกำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณ Coarse RAP ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นมวลรวมหยาบที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ จะถูกเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติเพื่อนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นมวลรวม โดยสมการคณิตศาสตร์ถูกนำเสนอเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติและปริมาณการแทนที่ RAP
คำสำคัญ: มวลรวมหยาบ, กำลังรับแรงอัด, การออกแบบส่วนผสมวัสดุ, ผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่

Abstract

This research looks at the compressive strength of concrete utilizing reclaimed asphalt pavement (RAP) as a coarse aggregate substitute at 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, and 50% by weight. The compressive strengths of concrete are designed according to the ACI 211.1 standard for 25 MPa, 32 MPa, and 40 MPa at 28 days of curing. The compressive strengths of concretes produced using coarse RAP as aggregate are compared to those of comparable concretes with natural coarse aggregate. According to the test findings, the compressive strength of concrete is influenced by the coarse RAP replacement in the mix proportions. The test results also revealed a systematic decrease in compressive strengths with increasing coarse RAP content. In addition, the concrete using coarse RAP as coarse aggregate with different replacement ratios is compared with those of similar concrete using natural aggregate to propose the compressive strength prediction equation for concrete using coarse RAP as aggregate. The mathematical equation for the relation between normalized compressive strength and coarse RAP replacement ratios is provided.
Keywords: Coarse aggregate, Compressive strength, Mix design proportion, Reclaimed asphalt pavement

บทนำ

ถนนผิวทางแอสฟัลต์ (asphalt pavement) เป็นที่นิยมใช้สำหรับถนนสายหลักและสายรองในประเทศ เนื่องจากมีต้นทุนก่อสร้างต่ำและสามารถบำรุงรักษาซ่อมแซมได้สะดวกและรวดเร็วเมื่อเทียบกับผิวทางคอนกรีต (Tarsi et al., 2020) ปัจจุบันมีการปรับปรุงผิวทางที่ชำรุดโดยการลอกผิวทางเดิมส่งผลให้เกิดขยะผิวทางแอสฟัลต์จำนวนมาก (Huang et al., 2005) โดยผิวทางแอสฟัลต์ดังกล่าวมักถูกกองไว้กลายเป็นขยะของเสียที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ หากในแต่ละปีมีถนนผิวทางแอสฟัลต์ได้รับการซ่อมแซมโดยรื้อผิวทางทิ้งเป็นระยะทางหลายพันกิโลเมตร จะส่งผลให้ปริมาณขยะผิวทางแอสฟัลต์เพิ่มขึ้นและเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา (Mills-Beale and You, 2010; Ossa et al., 2016; Kukielka et al., 2021)

การนำวัสดุผิวทางเดิมที่ถูกรื้อนำกลับมาใช้ใหม่ถูกเรียกว่า วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (reclaimed asphalt pavement, RAP) จากผลการวิจัยที่ผ่านมา วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่สามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต โดยแทนที่บางส่วนหรือการแทนที่ทั้งหมด (Al-Oraimi et al., 2009; Getahun et al., 2018) คอนกรีตที่ใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่แทนมวลรวมหยาบเป็นมวลรวมเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพที่ดีในการเพิ่มความเหนียว (ductility) (Mahmoud et al., 2013) อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่แทนในส่วนผสมของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินปูนธรรมชาติ (limestone) (Chaidachatorn et al., 2019) นอกจากนี้งานปรับปรุงพื้นทาง ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ในงานชั้นทางไม่ควรเกินร้อยละ 50 ของปริมาณวัสดุทั้งหมด (Suebsuk et al., 2014) จากปัญหาที่กล่าวมาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (หิน) ที่ปริมาณต่าง ๆ โดยน้ำหนัก และศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่แทนที่มวลรวมหยาบ (coarse RAP) สุดท้ายการเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ในงานก่อสร้างจะทำให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนชนิดใหม่ให้มีศักยภาพสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Bokkhunthod et al., 2022; Thumrongvut et al., 2022)

อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ศึกษา

1) คอนกรีตที่ใช้ศึกษามีกำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมายเท่ากับ 25 MPa 32 MPa และ 40 MPa (ประมาณ 250 kg/cm^2 320 kg/cm^2 และ 400 kg/cm^2 ตามลำดับ) ของแท่งทรงกระบอกมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 m สูง 0.20 m ที่อายุบ่ม 28 วัน

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15-2524

3) มวลรวมละเอียดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ล้างน้ำสะอาดและตากให้แห้งก่อนนำไปผสมคอนกรีต

4) มวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีตเป็นหินปูน (limestone) ที่มีขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว (20 mm)

5) วัสดุผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลที่นำมาแทนมวลรวมหยาบและมีขนาดโตสุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว ดังแสดงใน Fig. 1

6) น้ำประปาสะอาด

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย โมดูลัสความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และปริมาณยางแอสฟัลต์ ดังแสดงใน Table 1 ในส่วนการทดสอบหาปริมาณของแอสฟัลต์ (asphalt content) ถูกทดสอบตามมาตรฐาน มทช. 607-2545

Fig. 1 Reclaimed asphalt pavement (RAP) and limestone

Table 1 Mechanical properties of aggregates

Mechanical properties	Sand	Limestone	Coarse RAP
Fineness Modulus, *FM*	2.40	3.18	3.53
Specific Gravity, G_s	2.62	2.70	2.31
Unit Weight (kg/m^3)	1,680	1,600	1,288
Water Absorption (*WA*, %)	1.20	0.34	0.51
Asphalt Content (*AS*, %)	-	-	4.82

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ศึกษาเป็นคอนกรีตที่ออกแบบตามปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัย 25 MPa 32 MPa และ 40 MPa และมีการแทนที่มวลรวมหยาบบางส่วนด้วยวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบธรรมชาติดังแสดงใน Table 2 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่แทนที่มวลหยาบ (coarse RAP) จะนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ

ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดโดยใช้สัญลักษณ์ CXX-YY ตามหลักการดังต่อไปนี้ CXX หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ coarse RAP มีกำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมายเท่ากับ 25 MPa 32 MPa และ 40 MPa และ YY หมายถึง ปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบโดย coarse RAP ในหน่วยร้อยละ ตัวอย่างเช่น C25-50 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ coarse RAP แทนที่มวลหยาบมีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 25 MPa และใช้ coarse RAP แทนที่มวลหยาบร้อยละ 50 ของน้ำหนัก

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้ถูกเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน การเตรียมคอนกรีตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C39 เมื่อผสมเสร็จตรวจสอบค่าการยุบตัว (slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 จากนั้นนำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 m สูง 0.20 m บ่มด้วยการใช้แผ่นพลาสติกหุ้ม เมื่อครบตามอายุนำตัวอย่างวัดขนาด ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39

Table 2 Mix proportions

Sample ID	Cement (kg)	Water (kg)	Sand (kg)	Limestone (kg)	Coarse RAP (kg)	w/C
C25-0	319	201	794	1,056.0	0	0.58
C25-5	319	201	794	1,003.2	52.8	0.58
C25-10	319	201	794	950.4	105.6	0.58
C25-15	319	201	794	897.6	158.4	0.58
C25-20	319	201	794	844.8	211.2	0.58
C25-25	319	201	794	792.0	264.0	0.58
C25-30	319	201	794	739.2	316.8	0.58
C25-35	319	201	794	686.4	369.6	0.58
C25-40	319	201	794	633.6	422.4	0.58
C25-45	319	201	794	580.8	475.2	0.58
C25-50	319	201	794	528.0	528.0	0.58
C32-0	378	201	744	1,056.0	0	0.49
C32-5	378	201	744	1,003.2	52.8	0.49
C32-10	378	201	744	950.4	105.6	0.49
C32-15	378	201	744	897.6	158.4	0.49
C32-20	378	201	744	844.8	211.2	0.49
C32-25	378	201	744	792.0	264.0	0.49
C32-30	378	201	744	739.2	316.8	0.49
C32-35	378	201	744	686.4	369.6	0.49
C32-40	378	201	744	633.6	422.4	0.49
C32-45	378	201	744	580.8	475.2	0.49
C32-50	378	201	744	528.0	528.0	0.49
C40-0	487	200	655	1,056.0	0	0.38
C40-5	487	200	655	1,003.2	52.8	0.38
C40-10	487	200	655	950.4	105.6	0.38
C40-15	487	200	655	897.6	158.4	0.38
C40-20	487	200	655	844.8	211.2	0.38
C40-25	487	200	655	792.0	264.0	0.38
C40-30	487	200	655	739.2	316.8	0.38
C40-35	487	200	655	686.4	369.6	0.38
C40-40	487	200	655	633.6	422.4	0.38
C40-45	487	200	655	580.8	475.2	0.38
C40-50	487	200	655	528.0	528.0	0.38

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ Coarse RAP

Fig. 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วันและปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย coarse RAP จากรูปพบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่ coarse RAP เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้ม

ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตทั้ง 3 ค่า (25 MPa 32 MPa และ 40 MPa) พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ coarse RAP เมื่อเทียบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ มีค่าลดลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 17.8, 20.2 และ 20.9 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากับ 25 MPa 32 MPa และ 40 MPa ตามลำดับ โดยคอนกรีตที่ใช้ coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตต่ำที่สุด ในทางตรงกันข้ามสำหรับการแทนที่มวลรวมหยาบในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตสูงสุด นอกจากนี้ปริมาณวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยกำลังอัดเฉลี่ยลดลงอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 4 ถึง 6 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ นอกจากนี้ ผลสอบค่าการยุบตัวมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 70-135 mm และเมื่อปริมาณการแทนที่ coarse RAPเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยุบตัวมีค่าสูงขึ้นด้วย

ดังนั้นการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย coarse RAP เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจาก Coarse RAP เพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมหลังจากคอนกรีตเริ่มก่อตัว (Sanchaiwut et al., 2022) รวมถึงการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลและวัสดุเชื่อมประสาน (Al-Oraimi et al., 2009) โดย Huang et al. (2005) พบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่มีประสิทธิภาพด้านความเหนียว ซึ่งเหมาะสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการความเหนียวและความสามารถดูดซึมพลังงาน (Brantley and Townsend, 1999) คอนกรีตที่ใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น บ้านพักอาศัยและอาคารพาณิชย์ในพื้นที่เสี่ยงต่อแผ่นดินไหว เป็นต้น

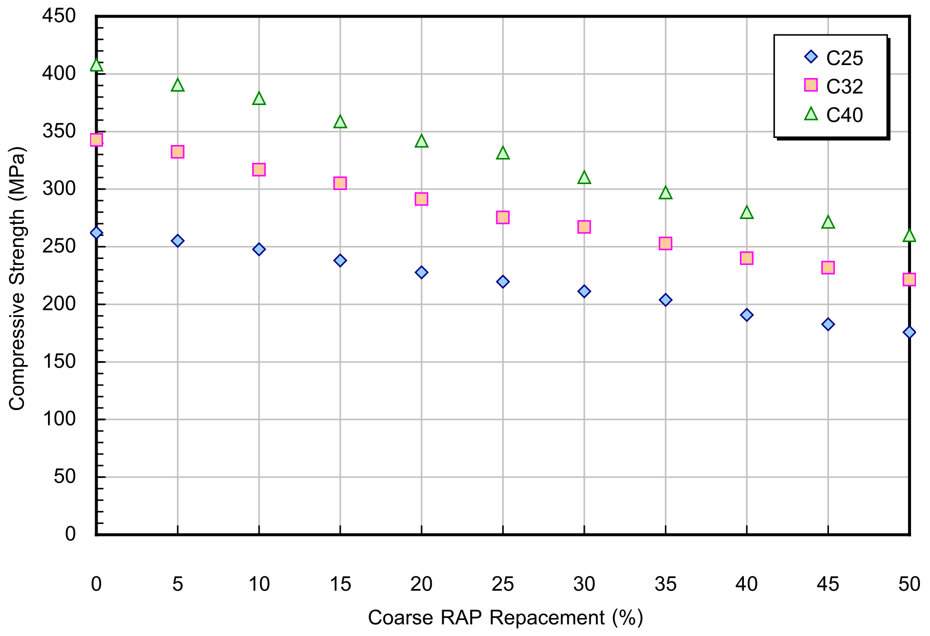


Fig. 2 Effect of coarse RAP content on 28-day compressive strength

สมการปรับแก้กำลังอัด

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ coarse RAP ต่อคอนกรีตอ้างอิง $(f'_{c,CRAP} / f'_c)$ และปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบในหน่วยร้อยละดังแสดงใน Fig. 3 จากรูปพบว่า การ Normalize ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ coarse RAP ต่อคอนกรีตอ้างอิงที่กำลังอัดประลัยทั้ง 3 ค่า ด้วยเทคนิค Regression Analysis สามารถหาความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของสมการฟังก์ชันเชิงเส้นตรง (linear) แสดงเส้นถดถอยของการสูญเสีย

กำลังอัดของคอนกรีตต่อปริมาณการแทนที่วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ Equation 1 แสดงการ Normalize ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ coarse RAP ต่อคอนกรีตอ้างอิงที่กำลังอัดประลัยต่าง ๆ โดยมีค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (R-Square) เท่ากับ 0.984

$$\frac{f'_{c,CRAP}}{f'_c} = 1 - 0.0072x \tag{1}$$

ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบภายใต้ขอบเขตที่ศึกษาสามารถคำนวณได้จาก Equation 2 โดยข้อจำกัดของสมการถูกทดสอบภายใต้การแทนที่ด้วยวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ปริมาณร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ และอัตราส่วน w/C ในช่วงระหว่าง 0.38–0.58

$$f'_{c,CRAP} = (1 - 0.0072x) f'_c \tag{2}$$

โดยที่ x คือ ปริมาณ การแทนที่มวลรวมหยาบด้วย coarse RAP ในหน่วยร้อยละ (%) และ f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติที่อายุ 28 วัน (MPa)

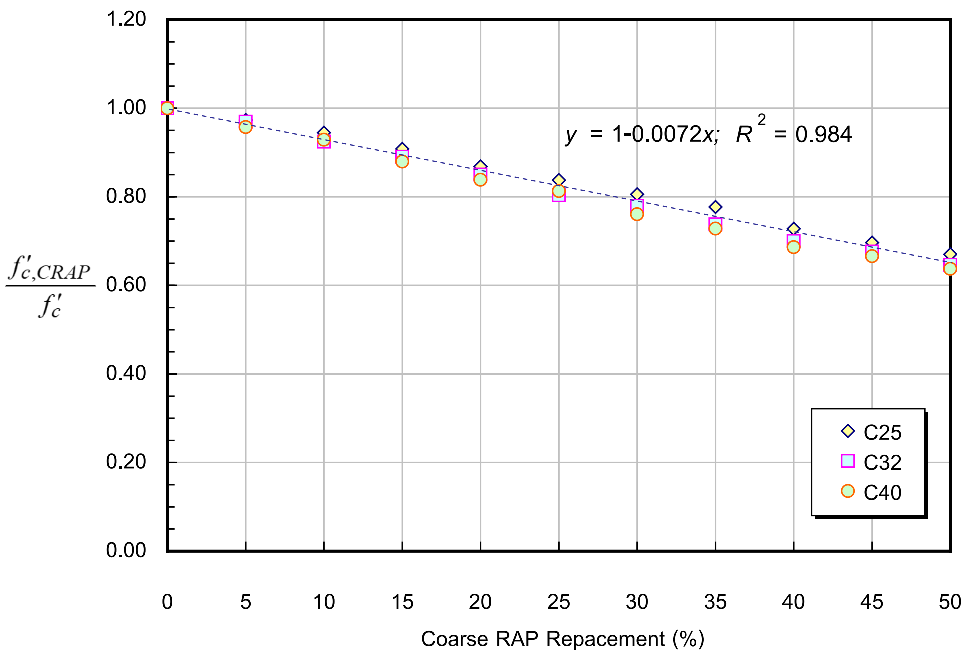


Fig. 3 Relationship between normalized compressive strength and Coarse RAP replacement ratios

สรุปผล

1) การแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง ปริมาณการแทนที่ผิวทางหยาบด้วยวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีตที่ใช้ผิวทางหยาบแอสฟัลต์รีไซเคิลที่อายุบ่ม 28 วัน มีกำลังอัดเฉลี่ยลดลงอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 4 ถึง 6 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ

2) สมการออกแบบกำลังอัดใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงระหว่าง 25 MPa ถึง 40 MPa ภายใต้ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม โดยมีค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (R-Square) เท่ากับ 0.984

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

ACI. 2009. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI 211.1–91. ACI Committee 211.

Al-Oraimi, S., Hossam, F., Hago, H.A. 2009. Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete. J. Eng. Res. 6: 37–45.

Bokkhunthod, N., Thumrongvut, J., Supromwan, J., Seangatith, S. 2022. Experimental study of cellular lightweight concrete-filled steel tube columns using hydraulic cement. Key Eng. Mater. 922: 147–152.

Brantley, A.S., Townsend, T.G. 1999. Leaching of pollutants from reclaimed asphalt pavement. Environmental Eng. Sci. 16: 105–116.

Chaidachatorn, K., Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A. 2019. Extended water/cement ratio law for cement mortar containing recycled asphalt pavement. Constr. Build. Mater.196: 457–467.

Getahun, M.A., Shitote, S.M., Gariy, Z.C.A. 2018. Experimental investigation on engineering properties of concrete incorporating reclaimed asphalt pavement and rice husk ash. Buildings 8: 115.

Huang, B., Shu, X., Li, G. 2005. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. Cem. Concr. Res. 35: 2008–2013.

Kukielka, J., Bankowski, W., Mirski, K. 2021. Asphalt-cement concretes with reclaimed asphalt pavement and rubber powder from recycled tire. Materials 14: 2412.

Mahmoud, E., Ibrahim, A., El-Chabib, H., Patibandla, V.C. 2013. Self-consolidating concrete incorporating high volume of fly ash, slag, and recycled asphalt pavement. IJCSM 7: 155–163.

Mills-Beale, J., You, Z. 2010. The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. Constr. Build. Mater. 24: 230–235.

Ossa, A., Garcia, J.L., Botero, E. 2016. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. J. Clean. Prod. 135: 379–386.

Sanchaiwut, M., Thumrongvut, J., Pantawee, S., Seangatith, S. 2022. Effects of substitution of fine aggregate with recycled asphalt pavement on compressive strength of normal concrete. Key Eng. Mater. 922: 163–168.

Suebsuk, J., Suksan, A., Horpibulsuk, S. 2014. Strength assessment of cement treated soil - reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture. Int. J. Geomate 6: 878–884.

Tarsi, G., Tataranni, P., Sangiorgi, C. 2020. The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. Mater.13: 4052.

Thumrongvut, J., Seangatith, S., Phetchuay, C., Suksiripattanapong, C. 2022. Comparative experimental study of sustainable reinforced Portland cement concrete and geopolymer concrete beams using rice husk ash. Sustainability 14: 9856.

ผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจน

Effect of C/N ratio on synthetic biofloc formation for inorganic nitrogen removal

ศาศวัต ญานกาย[a], **เพ็ญพิชา สท้านวัตร**[b,c], **วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี**[a,b], **สรวิศ เผ่าทองศุข**[b,c]
Sasawat Yankay[a], Penpicha Satanwat[b,c], Wiboonluk Pungrasmi[a,b], Sorawit Powtongsook[b,c]
[a] ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
[b] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเลทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
[c] กลุ่มวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพสัตว์น้ำแบบบูรณาการ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120
[a] Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
[b] Center of Excellence for Marine Biotechnology, Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
[c] Integrative Aquaculture Biotechnology Research Group, National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani, 12120, Thailand
*Coresponding author. E-mail address: 6370275221@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการกระตุ้นการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกสำหรับประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน ดำเนินการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน โดยในช่วงแรกทำการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เติมในระบบแตกต่างกัน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากกากน้ำตาล ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนส่งผลให้ปริมาณตะกอนในระบบสูงขึ้น ทั้งตะกอนแขวนลอยและตะกอนที่ตกลงสู่ก้นบ่อ โดยมีค่าแปรผันอยู่ในช่วง 314.3 – 620.0 มก./ล. และ 10.0 – 35.0 มล./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ตะกอนไบโอฟล็อกที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 15 วัน สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนไตรท์ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่การบ่มตะกอนที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 สามารถออกซิไดซ์ไนไตรท์ให้อยู่ในรูปของไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปริมาณไนไตรท์คงเหลือในระบบต่ำสุด (< 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล.) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่นๆ

คำสำคัญ: การกำจัดแอมโมเนีย, กระบวนการไนตริฟิเคชัน, ไบโอฟล็อก, สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

Abstract

This study investigated the appropriate carbon to nitrogen (C/N) ratio to induce synthetic biofloc production for inorganic nitrogen removal through nitrification process in a recirculating aquaculture system. Biofloc was acclimated for 30 days by varying the initial C/N ratio at 3 different levels as 5:1, 10:1, and 15:1 compared to the control set without molasses supplement as organic carbon source. The results showed that increasing the C/N ratio resulted in an increase in suspended solids and settled solids, as varied in the ranges of 314.3 – 620.0 mg/L and 10.0 – 35.0 ml/L, respectively. Moreover, the 15-day acclimated biofloc was able to complete ammonia oxidation to nitrite. While the biofloc acclimated at C/N ratio of 5:1 could effectively oxidize nitrite to nitrate with the lowest nitrite residual (< 0.5 mg-N/L) in comparison to other treatment sets.

Keywords: Biofloc, C/N ratio, Nitrification, TAN removal

คำนำ

ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture System; RAS) มีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากความต้องการแหล่งโปรตีนที่เพิ่มขึ้นของตลาดและผู้บริโภค โดยถูกพัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำภายในระบบให้เหมาะสมสำหรับรองรับการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูงเพื่อให้ได้ผลผลิตปริมาณมากในพื้นที่จำกัด และสามารถลดปริมาณการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม (Hisano et al., 2021) โดยทั่วไปของเสียที่เกิดขึ้นในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3) ไนไตรท์ (NO_2) และไนเตรท (NO_3) ซึ่งเกิดจากการขับถ่ายและการย่อยสลายอาหารที่เหลือจากการบริโภคของสัตว์น้ำ โดยหากแอมโมเนียและไนไตรท์สะสมที่ความเข้มข้นสูงกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะเริ่มส่งผลเสียต่อสุขภาพสัตว์น้ำ เนื่องจากจะไปยับยั้งอัตราการไหลเวียนออกซิเจนทำให้สัตว์น้ำสามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้น้อยลง นอกจากนี้จะเกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือด ส่งผลให้ค่าพีเอชในเลือดสูงขึ้น และยังมีผลต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของเอนไซม์ในสัตว์น้ำ (Timmons et al., 2002; Abakari et al., 2021) ในขณะที่ไนเตรทเป็นรูปของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำต่ำ โดยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปสามารถยอมให้ไนเตรทสะสมได้สูงสุดถึง 60 มก.-ไนโตรเจน/ล. (Alves Neto et al., 2019)

ปัจจุบันได้มีการผนวกเทคโนโลยีไบโอฟล็อก (Biofloc technology; BFT) เข้ากับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนเพื่อช่วยกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจน โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ที่มีบทบาทในการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชัน (Assimilation) เพื่อนำไปสร้างส่วนประกอบของเซลล์และเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนไบโอฟล็อก และกลุ่มออโตโทรฟ (Autotroph) ที่มีบทบาทในการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนไตรท์และไนเตรทผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) (Tzachi et al., 2019) ทั้งนี้ในช่วงแรกของการเดินระบบไบโอฟล็อกควบคู่กับการเลี้ยงสัตว์น้ำ จะมีการเติมสารอินทรีย์เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ ซึ่งมีความสำคัญในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมในช่วง 10:1–20:1 (Khanjani and Sharifinia, 2020; พัชราวลัย และคณะ, 2565) ดังนั้นกระบวนการกำจัดแอมโมเนียในช่วงนี้จึงเป็นผลมาการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ จากนั้นเมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน แบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่ากลุ่มแรกจะมีบทบาทในการออกซิไดซ์แอมโมเนียต่อผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nootong et al., 2011; Kunwong et al., 2022)

อย่างไรก็ตามรูปแบบการเดินระบบไบโอฟล็อกในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเป็นการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบโดยตรงเพื่อสร้างตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งแนวทางดังกล่าวอาจก่อให้เกิดการสะสมตัวของไนไตรท์ในช่วงที่ทำการปรับลดการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบ (Kunwong., 2022) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกก่อนเริ่มต้นเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยศึกษาผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการกระตุ้นตะกอนไบโอฟล็อกที่มีความพร้อมในการกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบไบโอฟล็อกแบบยั่งยืนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน

ทำการบ่มตะกอนไบโอฟล็อคในถังพลาสติกปริมาตร 2 ล. ที่มีการเติมน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงกุ้งปริมาตร 0.1 ล. (คิดเป็นร้อยละ 5 ของปริมาตรทั้งหมด) เติมสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 6.6 มล.-ไนโตรเจน/ล. และโซเดียมไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 3.3 มล.-ไนโตรเจน/ล. และเติมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูป

อาหารกุ้งบดละเอียดที่มีโปรตีนร้อยละ 38 เพื่อให้ได้ความเข้มข้น 0.54 มล.-ไนโตรเจน/ล. โดยแบ่งการเติมออกเป็น 3 ครั้ง ในช่วงสัปดาห์แรกของการเดินระบบ แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพื่อศึกษาผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน และชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) แตกต่างกัน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 ตามลำดับ ด้วยการเติมกากน้ำตาลทางการค้า โดยควบคุมกากน้ำตาลที่เติมในแต่ละชุดการทดลองให้เหมือนกัน และมีการเก็บตัวอย่างกากน้ำตาลส่งวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง CHNS/O elemental analyzer โดยมีองค์ประกอบคาร์บอนเฉลี่ยร้อยละ 46.9±0.1 เดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน ที่ความเค็ม 5 พีเอสยู โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้มีค่ามากกว่า 5 มก.-ออกซิเจน/ล. และควบคุมอัลคาลินิตี้ให้มีค่ามากกว่า 100 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตตลอดช่วงเวลาการทดลอง

การตรวจวิเคราะห์ตะกอนและพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

เก็บตัวอย่างไบโอฟล็อกเพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน ได้แก่ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที (Sludge Volume 30; SV30) เพื่อคำนวณค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge Volume Index; SVI) รวมถึงตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ตามวิธีมาตรฐาน (APHA, 2005) และพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่นๆ ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และอัลคาลินิตี้ เป็นต้น

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน

ผลการตรวจวัดคุณภาพตะกอนในช่วงแรกที่มีการเติมไนโตรเจนและคาร์บอนเข้าสู่ระบบในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่า C/N ratio 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 พบว่า มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นเท่ากับ 91.7±7.1, 83.3±0, 130.0±14.1 และ 170.0±14.1 มก./ล. ตามลำดับ (Fig 1(A)) โดยชุดทดลองที่มีค่า C/N ratio สูงสุด (15:1) มีปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 795.0±35.4 มก./ล. ในวันที่ 5 ของการทดลอง ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 5:1 และ 10:1 ตรวจพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยอย่างเห็นได้ชัดภายหลังจากวันที่ 10 ของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 307.5–352.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นผลมาจากการดูดซึมไนโตรเจนและคาร์บอนเข้าสู่เซลล์ผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชัน เพื่อนำไปสร้างส่วนประกอบของเซลล์และเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนไบโอฟล็อก (Abakari et al., 2021) โดยในแต่ละระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 277.5±17.1, 470.0±14.1, 314.3±17.4 และ 620.0±28.3 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่า C/N ratio แตกต่างกันมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 2.0±0, 4.0±0, 10.0±0 และ 20.0±0 มล./ล. ตามลำดับ (Fig 1(B)) โดยปริมาณตะกอนดังกล่าวในชุดควบคุมและชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 5:1 มีค่าอยู่ในช่วง 1.5–15.0 และ 3.0–15.0 มล./ล. ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 10:1 และ 15:1 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 8.0–35.0 และ 4.0–35.0 มล./ล.ตามลำดับ

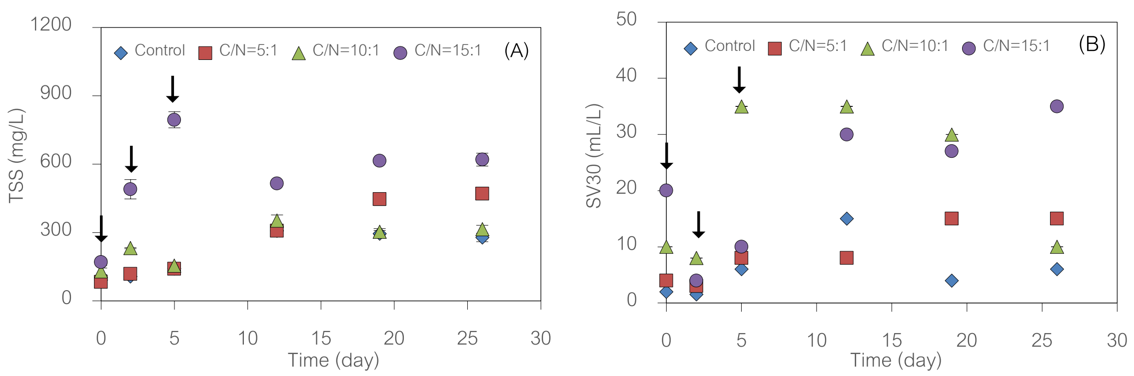


Fig. 1 Fluctuations in (A) total suspended solid (TSS) and (B) the 30-minute settled volume (SV30) during 30-days of synthetic biofloc production at different C/N ratios. Arrows (↓) indicate the addition of nitrogen and carbon sources in the experimental system.

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

ผลการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ พบว่าการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่า C/N ratio ทั้ง 3 ระดับ (5:1, 10:1 และ 15:1) มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เข้าสู่ระบบส่งผลให้แอมโมเนียมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 7.0±0.7, 6.0.±0.8, 9.6±2.0 และ 2.7±0.7 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (Fig 2(A)) ในช่วงแรกของการเริ่มสร้างตะกอนไบโอฟล็อก ปริมาณแอมโมเนียในแต่ละชุดการทดลองมีค่าแปรผันอยู่ในช่วง 3.3–12.0 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 12 ของการทดลอง ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 5:1 พบการกำจัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือในระบบต่ำกว่า 0.3 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 10:1 และ 15:1 มีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือเท่ากับ 1.2±0.7 และ 2.8±1.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ การกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกดังกล่าว คาดว่าเป็นผลมาจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชันร่วมกับการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Timmons et al., 2002) ซึ่งการลดลงของแอมโมเนียส่งผลเชื่อมโยงกับปริมาณไนไตรท์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้การเติมโซเดียมไนไตรท์เข้าสู่ระบบส่งผลให้ไนไตรท์ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่า C/N ratio ทั้ง 3 ระดับมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.3±0.2, 1.6±0.5, 2.8±2.9 และ 0.1±0 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (Fig 2(B)) และมีค่าแปรผันในช่วงสัปดาห์แรกของการทดลองเท่ากับ 0.1–2.2 มก.-ไนโตรเจน/ล. ต่อมาปริมาณไนไตรท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในชุดควบคุมพบการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์อย่างชัดเจนที่ 5.2±0.4 มก.-ไนโตรเจน/ล. (วันที่ 10) ในขณะที่ชุดทดลองที่มีการแปรค่า C/N ratio ทั้ง 3 ระดับตรวจพบการเพิ่มขึ้นของไนไตรท์อย่างเห็นได้ชัดในช่วง 6.5–3.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. (วันที่ 12) โดยการเพิ่มขึ้นของไนไตรท์ในช่วงเวลาที่สอดคล้องกับการลดลงของแอมโมเนียนี้ คาดว่าเป็นผลโดยตรงมาจากการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์จนอยู่ในรูปของไนไตรท์อย่างสมบูรณ์ การคงค้างของไนไตรท์พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.9–8.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. และตรวจพบการลดลงอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 26 ของการทดลอง ทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 5:1 พบการกำจัดไนไตรท์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีปริมาณไนไตรท์คงเหลือในระบบในวันสุดท้ายของการทดลองต่ำกว่า 0.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 10:1 และ 15:1 มีปริมาณไนไตรท์คงเหลือเท่ากับ 2.4±0.2 และ 4.4±1.1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้การกำจัดไนไตรท์ในระบบส่งผลเชื่อมโยงกับปริมาณไนเตรทที่เกิดขึ้น โดยมีค่าเริ่มต้นในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่า C/N ratio ทั้ง 3 ระดับ เท่ากับ 1.0±0.2, 5.3±1.3, 5.5±0.8 และ 7.3±0.7 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จนมีค่าในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 27.9±5.4, 44.2±10.5, 50.6±3.0 และ 45.4±3.4 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (Fig. 2C) อาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตะกอนไบโอฟล็อกที่สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนไตรท์และไนเตรต โดยเฉพาะชุดควบคุมและชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 5:1 ที่กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยพบการคงเหลือของไนไตรทในระบบต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชุดทดลองที่ C/N ratio เท่ากับ 10:1 และ 15:1 ในส่วนของปริมาณไนเตรทที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลองพบว่ายังคงมีค่าต่ำกว่า 60 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นระดับมาตรฐานสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความเค็มต่ำ (Alves Neto et al., 2019) อย่างไรก็ตามการเดินระบบในระยะยาวอาจส่งผลให้ไนเตรทมีค่าเพิ่มขึ้นและส่งกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ ดังนั้นอาจมีการพิจารณาเพิ่มเติมหน่วยบำบัดดีไนตริฟิเคชันเพื่อลดความเป็นพิษของไนเตรทในระบบ

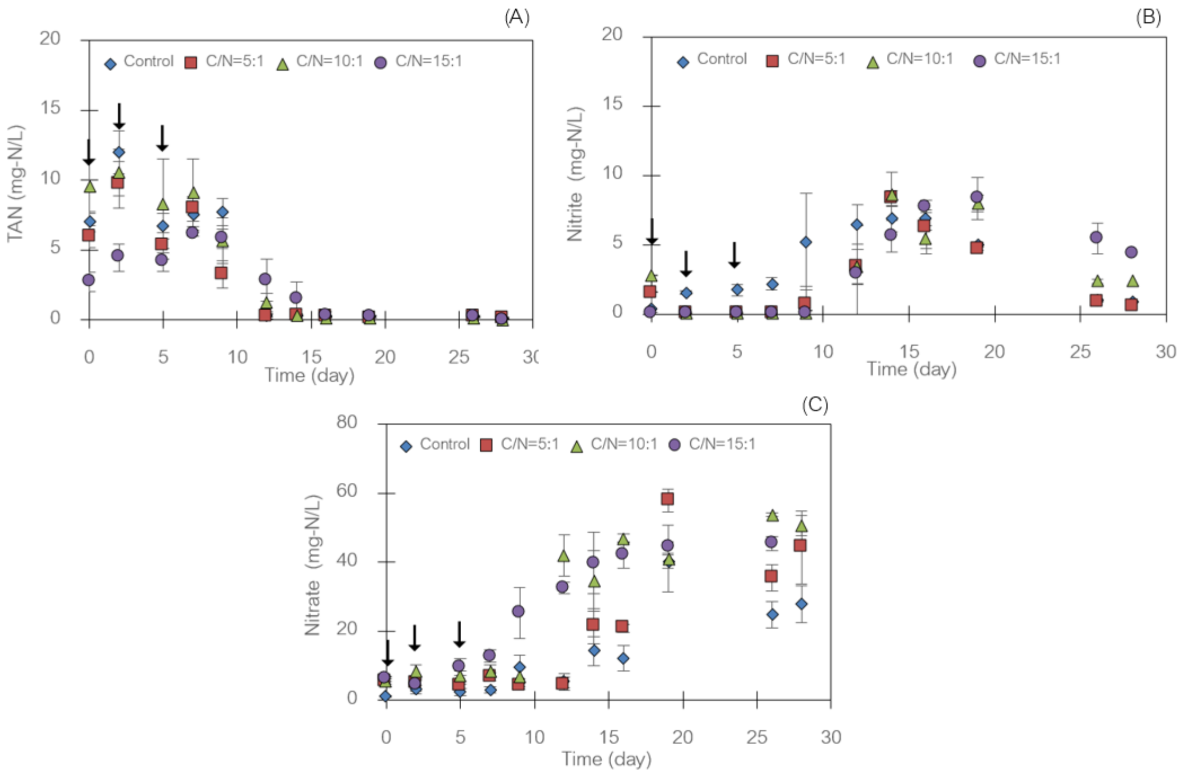


Fig. 2 Fluctuations in inorganic nitrogen compounds: (A) total ammonia nitrogen (TAN), (B) nitrite, and (C) nitrate during 30-days of synthetic biofloc production at different C/N ratios. Arrows (↓) indicate the addition of nitrogen and carbon sources in the experimental system.

สำหรับพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่นๆ ในระหว่างการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก (Table 1) พบว่าทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่า C/N ratio แตกต่างกัน 3 ระดับ (5:1, 10:1 และ 15:1) ทุกพารามิเตอร์มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดการทดลองสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟ โดยมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่า 6.4 มก./ล. ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.2–8.5 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 26.4–27.7 °C และค่าอัลคาลินิตี้อยู่ในช่วง 110–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.

Table 1 The water quality parameters during synthetic biofloc production at different C/N ratios

Parameters	Control	C/N=5:1	C/N=10:1	C/N=15:1
DO (mg/L)	7.4 ± 0.3	7.2 ± 0.3	7.4 ± 0.5	6.9 ± 0.5
	(6.8 – 8.0)	(6.9 – 7.8)	(6.6 – 8.1)	(6.4 – 7.5)
pH	8.4 ± 0.1	8.4 ± 0.1	8.4 ± 0.1	8.3 ± 0.1
	(8.2 – 8.5)	(8.2 – 8.5)	(8.3 – 8.5)	(8.2 – 8.4)
Temp (^{o}C)	27.1 ± 0.3	27.0 ± 0.3	27.0 ± 0.3	26.9 ± 0.4
	(26.7 – 27.5)	(26.4 – 27.6)	(26.5 – 27.7)	(26.3 – 27.5)
Alkalinity	138.8 ± 18.1	140.0 ± 13.1	141.3 ± 13.6	145.0 ± 10.7
(mg-$CaCO_3$/L)	(110 – 150)	(120 – 150)	(120 – 150)	(120 – 150)

สรุป

การเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกล่วงหน้าก่อนการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการกระตุ้นด้วยสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการช่วยควบคุมปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้ ทั้งนี้การเติมกากน้ำตาลเพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในระหว่างการบ่มเชื้อจะกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียและรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อก โดยปริมาณตะกอนแขวนลอยมีค่าแปรผันตามสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ ทั้งนี้การเติมกากน้ำตาลที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นสัดส่วนที่เพียงพอในการสร้างตะกอนโอฟล็อก โดยพบว่าการกำจัดแอมโมเนียและไนไตรท์ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 30 วันของการบ่มตะกอน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU_FRB65_food (18)_165_21_31) ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย และเอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมีตลอดจนคำแนะนำในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

พัชราวลัย ศรียะศักดิ์, สุพันธ์ณี สุวรรณภักดี, ณัทธิยา ชำนาญค้า, พรพิมล พิมลรัตน์. 2565. แหล่งคาร์บอนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อก. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 14: 117–125.

พรรณภัทร สิทธิ์พลางกูร. 2555. ประสิทธิภาพการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนของตะกอนชีวภาพจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบไบโอฟล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

APHA, AWWA, WEF. 2005. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. American Public Health Association, Washington DC

Abakari, G., Luo, G., Kombat., E. 2021. Dynamics of nitrogenous compounds and their control in biofloc technology (BFT) systems: A review. Aquac. Fish. 6: 441–447.

Alves Neto, I., Brandão, H., Furtado, P.S., Wasielesky Jr, W. 2019. Acute toxicity of nitrate in Litopenaeus vannamei juveniles at low salinity levels. Cienc. Rural. 49: doi.org/10.1590/0103-8478cr20180439

Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., Vestraete., W. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. Aquaculture 356–357: 351–356.

Hisano, H. Barbosa, P.T.L., Arruda Hayd, L. 2021. Comparative study of growth, feed efficiency, and hematological profile of Nile tilapia fingerlings in biofloc technology and recirculating aquaculture system. Trop. Anim. Health Prod. 53: 60.

Khanjani, M.H., Sharifinia, M. 2022. Biofloc technology with addition molasses as carbon sources applied to *Litopenaeus vannamei* junenile production under the effects of different C/N ratios. Trop. Anim. Health Prod. 30: 383–397.

Kunwong, S. Satanwat, P., Powtongsook, S., Pungrasmi, W., and Nootong, K. 2021. Evaluation of modified biofloc system with filtration unit in controlling suspended solids and inorganic nitrogen concentrations in a recirculating aquaculture system. J. Chem. Technol. Biotechnol. 97: 924–932.

Nootong, K. Pavasant, P., Powtongsook, S. 2011. Effects of Organic Carbon Addition in Controlling Inorganic Nitrogen Concentrations in a Biofloc System. JWAS 42: 339–346.

Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton F.W., Summerfelt, S.T., Vincii, B.J. 2002. Recirculating Aquaculture System. 2nd ed. New York: Northeastern Regional Aquaculture Center: Aquaculture. 176: 227–235.

การศึกษาเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ผสมร่วมกับขยะพลาสติกทั่วไปและขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง

Comparative determining of heating value from Napier grass with general plastic waste and high-density polyethylene (HDPE) waste

<u>ปณิตา กุลวรานิธิ</u>, พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ*

<u>Panita Kulvaraniti</u>, Peerakarn Banjerdkij*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail Address: pbanjerdkij@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ร่วมกับขยะพลาสติกทั่วไปและขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง โดยทำการทดลองหาค่าความร้อนของหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60, 75 และ 90 วัน ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ จากนั้นทดลองเพื่อศึกษาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ร่วมกับขยะพลาสติกทั่วไป และร่วมกับขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า ค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60 วัน ที่ความชื้น 8.10% ร่วมกับขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนร้อยละ 15 ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด เท่ากับ 4,787.96±13.27 แคลลอรีต่อกรัม เมื่อทำการเปรียบเทียบ เชื้อเพลิงผสมขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงกว่า 8.96% เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงผสมขยะพลาสติกทั่วไป โดยที่ค่าพลังงานความร้อนแปรผันตามอัตราส่วนของขยะพลาสติกเช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: ขยะพลาสติก, พลังงานความร้อน, พอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง, หญ้าเนเปียร์

Abstract

This research objectives to study the heating value from Napier grass mixing with the general plastic waste and the high-density polyethylene (HDPE). The experimental data were tested and collected to determine the primary heating value of Napier grass (Pak Chong 1) at the harvest life of 60, 75 and 90 days via Bomb Calorimeter. After the experimental of Napier grass mixing with general plastic waste and with the high-density polyethylene (HDPE) type at portion of 5, 10 and 15% respectively were tested. The experimental results showed the maximum heating value from Napier grass at the harvest life of 60 days and 8.10% of moisture content level with plastic waste HDPE type at portion of 15% which heat were released of 4,787.96±13.27 Cal/g. A comparative of heating value, Napier grass with plastic waste HDPE type is higher than 8.96% compare with general plastic waste that the potential it rising vary according to heating value when increased the portion of plastic wastes.

Keywords: HDPE, Heating value, Napier grass, Plastic waste

คำนำ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่สำคัญของการพัฒนาประเทศ แต่จากในสถานการณ์ปัจจุบันที่มีอัตราและความต้องการพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่แหล่งพลังงานที่ผลิตได้เองในประเทศไทยยังคงเท่าเดิม ส่งผลกระทบให้เกิดวิกฤติปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงมีความจำเป็นต้องนำเข้าจากแหล่งพลังงานต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการศึกษาพลังงานทางเลือกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งภายนอกประเทศได้ ซึ่งพลังงานชีวมวลถือเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย รวมทั้งเป็นการช่วยกำจัดของเหลือจากภาคการเกษตร นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าจากของเสียแล้วยังเป็นการช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรและชุมชน (นิภัทร, 2563) โดยปัจจุบันหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) เป็นหนึ่งในพืชพลังงานที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตพลังงานชีวมวลที่เหมาะสมกับประเทศไทย เนื่องจากเป็นหญ้าเขตร้อน เป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตและมีคุณค่าทางอาหารสูง การปลูกต่อครั้งสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นาน 6-7 ปี เกษตรกรนิยมนำมาปลูกสำหรับเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง (ไกรลาส, 2556) ซึ่งหากนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของเหลือจากการนำไปเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ และเป็นพลังงานทางเลือกให้แก่โรงงานชีวมวลอีกด้วย

นอกจากนี้ของเสียจากภาคการเกษตรที่สามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานได้แล้วนั้น ของเสียที่ถือเป็นปัญหาสำคัญระดับโลกในปัจจุบัน คือ ขยะพลาสติก จากการศึกษาองค์ประกอบขยะมูลฝอยของสำนักงานสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร พบว่า ของเสียประเภทเศษอาหารพบมากที่สุดที่ รองลงมาคือขยะพลาสติกที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ และเป็นขยะจากกระดาษที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ จะเห็นได้ว่าประเภทขยะที่ไม่สามาถย่อยสลายไปเองตามธรรมชาติได้ที่พบมากที่สุดในกรุงเทพมหานคร คือขยะพลาสติกที่รีไซเคิลไม่ได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) ซึ่งคุณสมบัติของพลาสติกคือ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี การนำพลาสติกไปกำจัดโดยวิธีการเผาไหม้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการจัดการของเสีย โดยการนำขยะพลาสติกมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้จะต้องคัดแยกพลาสติกประเภทพีวีซี (PVC; Poly vinyl chloride) ออกจากพลาสติกอื่นๆ เนื่องจากคลอรีนซึ่งเป็นองค์ประกอบของพลาสติกพีวีซีจะถูกปล่อยออกมาในรูปของกรดอะซีติก สารพิษไดออกซิน และสารประกอบอินทรีย์คลอรีน ซึ่งเกิดเป็นสารก่อมะเร็ง (นภารัตน์, 2562)

จากความสามารถในการผลิตพลังงานของหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 และขยะพลาสติก ประกอบกับความต้องการพลังงานทดแทนที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิง จากการทดสอบหญ้าเนเปียร์ที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน โดยทำการเลือกอายุการเก็บเกี่ยวของหญ้าเนเปียร์ที่ 60 วันขึ้นไปมาทำการทดลอง เนื่องจากในช่วงอายุของหญ้าที่ 45-60 วัน มักถูกนำมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ เพื่อหาค่าพลังงานความร้อนจากหญ้าเนเปียร์อายุที่เหมาะสมที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงผสมกับขยะพลาสติกทั่วไปและขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง หาค่าพลังงานความร้อนและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้หญ้าเนเปียร์ผสมกับขยะพลาสติกมาเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม และสำหรับเป็นแนวทางในการจัดการขยะอย่างมีประสิทธิภาพและการใช้พลังงานชีวมวลร่วมกับของเสียอย่างคุ้มค่า

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและอุปกรณ์

1. หญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 อายุการเก็บเกี่ยว 60, 75 และ 90 วัน จากแปลงปลูกพืชไร่ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

2. ขยะพลาสติกทั่วไปและขยะพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เก็บรวบรวมจากถังขยะมูลฝอยในเขตพื้นที่ กทม.

3. เครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน (Bomb calorimeter) ยี่ห้อ Parr Instrument Company รุ่น Calorimeter assembly (6100)

การเตรียมตัวอย่างและวิธีการ

นำหญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 มาผ่านเครื่องบดอัดเพื่อรีดน้ำออก จากนั้นนำมาตัดย่อยให้มีขนาดเล็กลง แล้วตากแห้งบนแผ่นผ้าใบในพื้นที่โล่งแจ้งเป็นเวลา 5 วัน แสดงดัง Fig. 1 แล้วจึงทำการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ได้แก่ หาปริมาณความชื้น (Measurement of moisture content) โดยวัดจากการสูญเสียน้ำ ซึ่งการทดลองนี้ใช้วิธีไล่ความชื้นจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อน หาค่าพลังงานความร้อน (Heating value) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D5865 เป็นการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการเผาตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักในเครื่อง Bomb calorimeter ภายใต้สภาวะควบคุม คำนวณออกมาในหน่วยแคลอรีต่อกรัม หลังจากทราบค่าพลังงานความร้อนที่เหมาะสมแล้วจึงทำการเลือกอายุหญ้าเนเปียร์ดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ต่อ โดยนำมาผสมกับขยะพลาสติก แบ่งเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ ผสมกับขยะพลาสติกทั่วไปและผสมขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการลดขนาดโดยการตัดย่อยให้มีขนาดเล็กลง ในอัตราส่วนพลาสติกที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 (อธิภัทรและสุรชัย, 2558) แสดงดัง Table 1 นอกจากนี้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยนำขยะพลาสติกที่ได้จากการเก็บรวมรวม คัดแยกออกมาจำนวน 10 ตัวอย่าง เพื่อทำการทดลองหาค่าพลังงานความร้อนของแต่ละชนิด

Fig. 1 Napier grass (Pak Chong 1) was harvested at 60, 75 and 90 days has been compressed

Table 1 Napier grass (Pak Chong 1) and plastic waste ratio

Napier grass (%)	Plastic waste (%)
95	5
90	10
85	15

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 จากอายุการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 จากอายุการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ได้แก่ 60, 75 และ 90 วัน ในช่วงระยะเวลา 5 วัน มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 29.5-31.9 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความชื้นมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยวันที่ 5 ของการทดลอง หญ้าเนเปียร์ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60, 75

และ 90 วัน มีค่าความชื้นเฉลี่ยที่ 8.10, 6.29 และ 7.19 เปอร์เซ็น โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 0.71, 0.63 และ 0.60 ตามลำดับ

ส่วนค่าพลังงานความร้อนที่ได้แปรผกผันกับค่าความชื้น คือ เมื่อหญ้าเนเปียร์มีค่าความชื้นลดลงสามารถให้ค่าพลังงานความร้อนมากขึ้น เมื่อพิจารณาผลจากวันที่ 5 ของการทดลอง ซึ่งมีค่าความชื้นต่ำที่สุด หญ้าเนเปียร์ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60 วัน ให้ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยมากที่สุด คือ 3,963.23 แคลลอรีต่อกรัม รองลงมาเป็นอายุ 75 วัน ให้ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยที่ 3,827.04 แคลลอรีต่อกรัม และหญ้าเนเปียร์จากอายุการเก็บเกี่ยว 90 วัน ให้ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยที่ 3,757.93 แคลลอรีต่อกรัม โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 26.74, 25.61 และ 41.04 ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 2 จะเห็นได้ว่าแม้ค่าความชื้นของหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60 วันไม่ได้ต่ำที่สุด แต่สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนได้สูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของศิริขวัญ (2557) พบว่าค่าพลังงานจากหญ้าเนเปียร์ที่ความชื้น 8.75% สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนได้สูงถึง 5,893.28 แคลอรีต่อกรัม

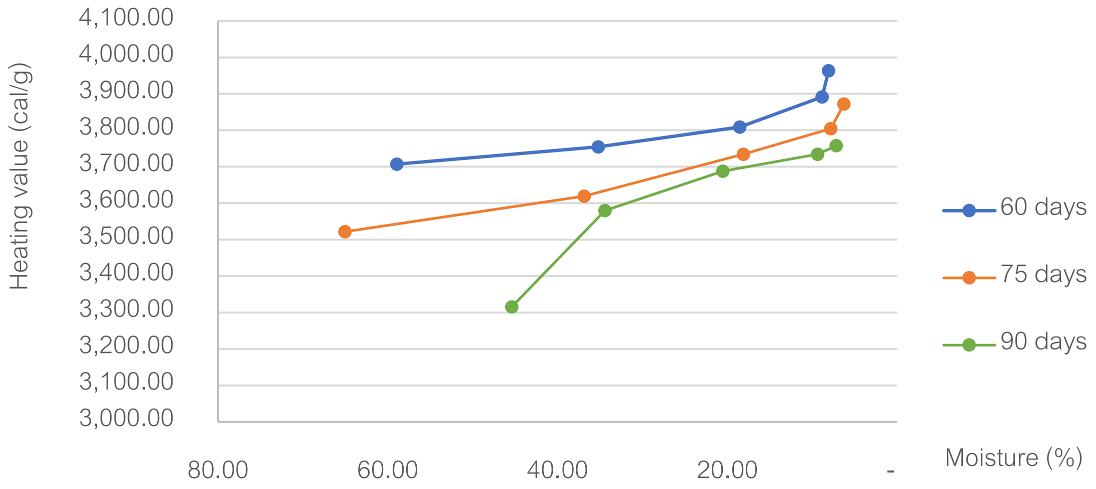


Fig. 2 Heating value of Napier grass (Pak Chong 1) was harvested at 60, 75 and 90 days

2. ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 ร่วมกับขยะพลาสติกทั่วไป

จาก Fig.2 จะเห็นได้ว่าหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60 วัน ในการทดลองของวันที่ 5 มีค่าความชื้นสูงกว่าที่อายุการเก็บเกี่ยว 75 และ 90 วัน แต่มีความสามารถในการให้ค่าพลังงานความร้อนได้สูงกว่า การทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อ จึงคัดเลือกหญ้าเนเปียร์ดังกล่าวมาเป็นเชื้อเพลิงผสมกับขยะพลาสติกทั่วไป ในอัตราส่วน 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็น ให้ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 3,984.12, 4,240.47 และ 4,394.10 แคลลอรีต่อกรัม โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 26.74, 25.61 และ 41.04 ตามลำดับ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าอัตราส่วนหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 กับขยะพลาสติกทั่วไปที่อัตราส่วน 85:15 ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงที่สุด ซึ่งเป็นอัตราส่วนสูงสุดของพลาสติกในการนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ได้ โดยไม่ส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพ (อธิภัทร, 2558)

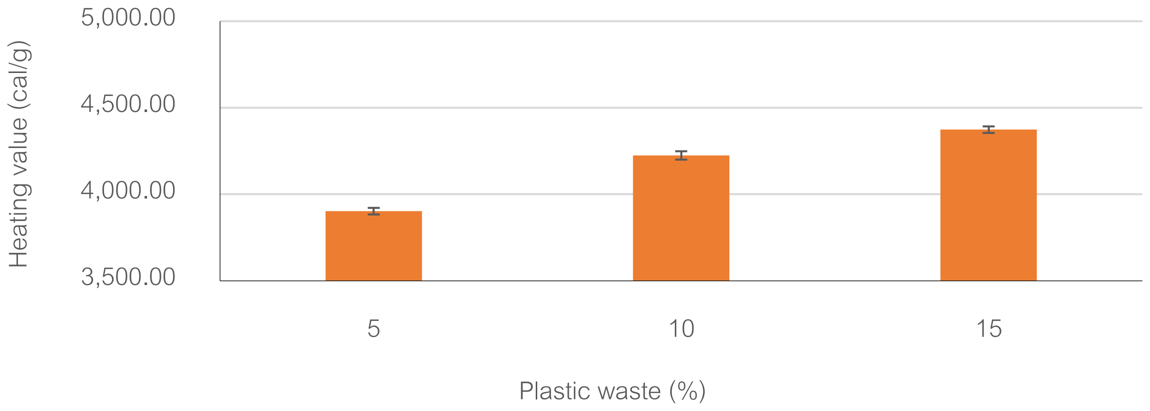


Fig. 3 Heating value of Napier grass (Pak Chong 1) with plastic waste

3. ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 ร่วมกับขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีน ความหนาแน่นสูง

ทำการทดลองโดยอ้างอิงจากการนำหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดมาทำการวิเคราะห์ต่อเนื่อง โดยนำมาผสมกับขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 ให้ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 4,085.49, 4,376.52 และ 4,787.96 แคลลอรีต่อกรัมตามลำดับ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 17.64, 32.49 และ 13.27 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 กับขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 85:15 ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดเช่นเดียวกับขยะพลาสติกทั่วไป แตกต่างที่ค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงผสมของขยะพลาสติกชนิดขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ให้พลังงานสูงกว่าขยะพลาสติกทั่วไป จากงานวิจัยค่าพลังงานความร้อนของพลาสติกจำนวน 7 ชนิด พบว่าขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงที่สุดที่ 11,559.2 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (Manoj et al., 2020)

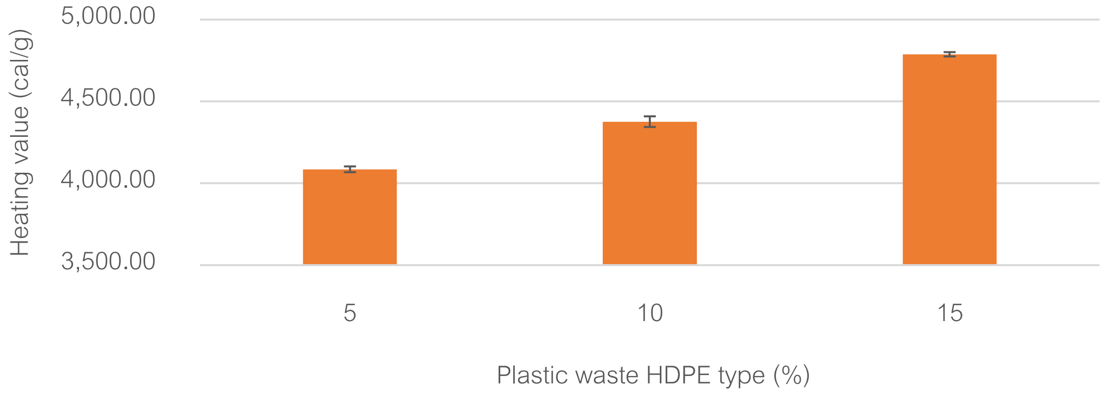


Fig. 4 Heating value of Napier grass (Pak Chong 1) with plastic waste HDPE type

สำหรับศักยภาพในการนำหญ้าเนเปียร์ผสมขยะพลาสติกไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่า เมื่ออัตราส่วนขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูงที่ผสมในเชื้อเพลิงสูงขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าพลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราส่วนผสมของขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูงในเชื้อเพลิงแข็งทำได้สูงสุดที่ร้อยละ 15 อ้างอิงจากงานวิจัยของอธิภัทรและสุรชัย (2558) หากอัตราส่วนขยะพลาสติกสูงเกินกว่าร้อยละ 15 จะส่งผลกระทบต่อการเกิดความดันลดภายในเตาเผาสูงเกินไป เป็นเหตุให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถป้อนอากาศเข้าสู่

เตาเผาได้ และทำให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแข็งภายในเตาไหลลงไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากความหนาแน่นพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง สูงถึง 965 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย, 2013) ในขณะที่ความหนาแน่นของหญ้าเนเปียร์มีความหนาแน่นเพียง 39.46 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (ก่อ และคณะ, 2558) เท่านั้น ซึ่งมีความแตกต่างกันถึง 24.46 เท่า ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนของขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูงในระบบที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการป้อนเชื้อเพลิงในระบบเตาเผา ทำให้กระบวนการเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพ

ดังนั้นเชื้อเพลิงทางเลือกจากหญ้าเนเปียร์ผสมขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง มีศักยภาพในการนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงเผาขยะ ทั้งนี้การนำไปประยุกต์ใช้ทางภาคอุตสาหกรรมหรือใช้ในเชิงพาณิชย์ จำเป็นต้องพิจารณาและศึกษาถึงผลกระทบด้านมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการกระบวนเผาไหม้ โดยจากงานวิจัยของอธิภัทรและสุรชัย (2558) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง CH4, CO และ N2 มีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่ CO2 และ H2 มีแนวโน้มต่ำลง ซึ่งต้องมีการควบคุมและป้องกันการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงวิเคราะห์และประเมินผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

สรุป

หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงที่สุดที่ 3,827.04±26.74 แคลอรีต่อกรัม คือหญ้าเนเปียร์ที่อายุการเก็บเกี่ยว 60 วัน ในวันที่ 5 ของการทดลอง รองลงมาเป็นหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่อายุการเก็บเกี่ยว 75 วัน และ 90 วัน โดยให้ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยที่ 3,827.04 และ 3,757.93 แคลลอรีต่อกรัม ตามลำดับ จากนั้นคัดเลือกหญ้าเนเปียร์จากอายุการเก็บเกี่ยวที่ 60 วัน นำมาผสมกับขยะพลาสติกทั่วไป ให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนร้อยละ 15 ให้ค่าพลังงานความร้อนที่ 4,394.10±18.90 แคลอรีต่อกรัม และเมื่อผสมขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 15 เปอร์เซ็น ให้ค่าพลังงานความร้อนที่ 4,787.96±13.27 แคลอรีต่อกรัม จากการเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อน จะพบว่าเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ผสมขยะพลาสติกชนิดพอลีเอทีลีนความหนาแน่นสูงให้ค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงผสมขยะพลาสติกทั่วไป คิดเป็น 8.96% มีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นต้นแบบหรือทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงให้เตาเผาขยะได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรกานต์ บรรเจิดกิจ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นายกันต์ ยิ้มแย้ม (นิสิตปริญญาเอก) รวมทั้งคณาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่อนุเคราะห์ให้คำปรึกษาและติดตามการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมทั้งภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนวัตถุดิบในการทดลองสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Suthat, M., Lata, N., Nagar, B. 2020. Plastic waste as an alternate fuel. IJERT. 9: 1254–1261. doi: 10.17577/IJERTV9IS070572

ไกรลาส เขียวทอง. 2556. คู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา. https://pvlo-uta.dld.go.th/webnew/images/stories/pagrad/napear1.pdf, 16 ตุลาคม 2565.

กรมควบคุมมลพิษ. 2565. การศึกษาองค์ประกอบขยะมูลฝอย ปี 2564. https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2022/08/pcdnew-2022-08-09_08-58-28_103322.pdf, 16 ตุลาคม 2565.

ก่อ ทวีเงิน, ชัยยันต์ จันทร์ศิริ, กิตติพงษ์ ลาลุน. 2558. คุณสมบัติทางกายภาพบางประการ ของหญ้าเนเปียร์ก่อนสับ และหลังสับ เพื่อผลิตเป็นชีวมวลอัดเม็ด. ใน: การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, หน้า 34–43.

นภารัตน์ ขนันทัย, 2562. คู่มือปฏิบัติงานการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ โดยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์. คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

นิภัทรา นาคสิงห์, 2563. การลงทุนในพลังงานสะอาดและการเติบทางเศรษฐกิจของประเทศในทวีปเอเชีย. https://www.sdgmove.com/2017/12/08/sustainableenergyforall/, 25 ตุลาคม 2565

ศิริขวัญ กาศเกษม, ธิติพร เจาะจง. 2557. เชื้อเพลิงอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์และหญ้าแฝก. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ “พิบูลสงครามวิจัย” และนิทรรศการ “การพัฒนาศักยภาพการท่องเที่ยว” จากท้องถิ่นสู่อาเซียน. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, พิษณุโลก, หน้า 70–74.

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย. 2013. ผลิตภัณฑ์พลาสติก HDPE. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. http://recycle.dpim.go.th/wastelist/waste-detail.php?id=8, 17 มกราคม 2566.

อธิภัทร ทวิชศรี, สุรชัย สนิทใจ. 2558. การศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกโดยเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงขนาดเล็ก. ใน: การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 62–65.

ประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในน้ำผิวดินโดยชั้นกรองถ่านชีวภาพแกลบกาแฟสำหรับการผลิตน้ำประปา

Removal efficiency of microplastics in surface water by coffee husk biochar filter for potable water production

<u>ชัญญานุช รุ่งชัยวัฒนกุล</u>, นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, เจนยุกต์ โล่ห์วัชรินทร์*

<u>Chanyanut Rungchaiwattanakul</u>, Narapong Hongprasith, Jenyuk Lohwacharin*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: 6370065821@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากลไกการกำจัดไมโครพลาสติกในน้ำผิวดินโดยชั้นกรองถ่านชีวภาพสำหรับผลิตน้ำประปา ศึกษาถ่านชีวภาพที่เตรียมจากแกลบกาแฟโดยตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิวและรูพรุน สมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าพีเอชที่ประจุบนผิวเป็นศูนย์ หมู่ฟังก์ชัน และองค์ประกอบธาตุ การศึกษานี้ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติก รูปร่างแบบชิ้นส่วนของระบบ โดยทดสอบจำนวนไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำพบว่าที่จำนวน 10 และ 100 ชิ้นต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 47% และ 83% ตามลำดับ และทดสอบชนิดของไมโครพลาสติกพบว่าพอลิเอทิลีนและพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 83% และ 94% ตามลำดับ จากผลการศึกษาบ่งบอกได้ว่าลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟเหมาะสมต่อการกำจัดไมโครพลาสติก ซึ่งจำนวนและสภาพขั้วของไมโครพลาสติกที่ชนิดต่างกันมีผลต่อกลไกการกำจัดไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำของระบบชั้นกรองถ่านชีวภาพนี้ด้วย

คำสำคัญ: การกรองด้วยถ่านชีวภาพ, แกลบกาแฟ, ชิ้นส่วน, น้ำประปา, ไมโครพลาสติก

Abstract

This research investigates the removal mechanisms of microplastics in surface water by biochar filter for potable water production. The biochar prepared from coffee husks was examined for physical properties such as surface area, and porosity and chemical properties such as pH at the point of zero charge (pH_{pzc}), functional group, and elemental composition. These properties affect the adhesion mechanism between biochar and microplastics. This study tested the fragment-shaped microplastic removal efficiency of the biochar filter, by testing the number of microplastics contaminated in synthetic water. It was found that 10 and 100 microplastics per liter of synthetic surface water had removal efficiency of 47% and 83% respectively. And testing different types of microplastics contaminated in synthetic water. It was found that polyethylene (PE) and polyethylene terephthalate (PET) had removal efficiency of 83% and 94% respectively. The results showed that the physical and chemical characteristics of biochar from coffee husks were suitable for the removal of microplastics contaminated in surface water. In addition, the number of microplastics contaminated in the water and their polarity also affected the microplastic removal mechanisms of the biochar filter system.

Keywords: Biochar filter, Coffee husk, Fragment, Microplastics, Potable water

คำนำ

ไมโครพลาสติกคือพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร สามารถแพร่กระจายในธรรมชาติได้ง่าย เป็นวัสดุตัวกลางในการสะสมสารมลพิษอื่น ๆ และอาจสะสมในห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดความกังวลว่าอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของ ผู้ที่ได้รับสัมผัส ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ไมโครพลาสติกได้กลายเป็นสารมลพิษที่กำเนิดใหม่นำมาซึ่งความกังวลในผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากขยะพลาสติกจำนวนมากในสิ่งแวดล้อมถูกย่อยสลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กลงด้วยกระบวนการต่างๆ ตามธรรมชาติ ทำให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำและยังเกิดการปนเปื้อนไมโครพลาสติกจากน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรม จึงมีรายงานการตรวจพบไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา จากงานวิจัยต่าง ๆ พบปริมาณไมโครพลาสติกปนเปื้อนในแหล่งน้ำผิวดินประมาณ 10–100 ชิ้นต่อลิตร ซึ่งปัจจุบันระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนและกรองทราย ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกที่จำกัด โดยงานวิจัยของ Kankanige and Babel (2021) พบประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในกระบวนการตกตะกอนเพียง 26–37% ส่วนกระบวนการกรองทราย พบประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกเพียง 30-35% ด้วยเหตุนี้จึงควรมีการนำเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการกำจัดไมโครพลาสติก เช่น การกรองด้วยเมมเบรน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ แต่ระบบเหล่านี้ยังมีข้อจำกัด ด้านค่าบำรุงรักษาและความต้องการใช้พลังงาน

ระบบกรองด้วยถ่านชีวภาพ (Biochar filter) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุน พื้นที่ผิวขนาดใหญ่ มีกลุ่มฟังก์ชันและแร่ธาตุต่าง ๆ ทำให้มีศักยภาพในการดูดซับและกักเก็บสารมลพิษ รวมถึงไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำได้ ถ่านชีวภาพถูกผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบกาแฟ โดยปัจจุบัน เมล็ดกาแฟนิยมนำมาผลิตเพื่อใช้ในการบริโภค จึงทำให้แกลบกาแฟเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในประเทศไทยเป็นปริมาณมากและหาได้ง่าย (17,028 ตันต่อปี) (Maleangpoothong et al., 2013) เมื่อนำชีวมวลเหล่านี้มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจึงทำให้เกิดต้นทุนในการผลิตที่ต่ำและสามารถนำไปใช้ในระบบผลิตน้ำประปาของชุมชนขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบการกรองด้วยถ่านชีวภาพนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของถ่านชีวภาพและกลไกการดักจับกันระหว่างไมโครพลาสติกและถ่านชีวภาพ โดยชนิดของไมโครพลาสติกมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เนื่องจากไมโครพลาสติกแต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะตัว อาทิ โครงสร้างโมเลกุล ประจุบนพื้นที่ผิว สมบัติเหล่านี้จะส่งผลทำให้ความแรงของขั้วไมโครพลาสติกแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการเกาะติดกับอนุภาคอื่น ๆ จึงเป็นที่น่าสนใจว่าชนิดของไมโครพลาสติกที่ปะปนกันอยู่ในน้ำจะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยชั้นกรองถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ ปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ยังส่งผลต่อการเกาะติดระหว่างไมโครพลาสติกและถ่านชีวภาพด้วยเช่นกัน เช่น ค่าพีเอชของสารละลาย และไอออนต่าง ๆ ในน้ำ (Tang et al., 2021) โดยที่ผ่านมายังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำประปาด้วยถ่านชีวภาพที่จำกัด

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพที่เตรียมจากแกลบกาแฟ รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในระบบการกรองด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบกาแฟ โดยข้อมูลที่ได้จะนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านชีวภาพให้เหมาะสมและเข้าใจกลไกการดักจับไมโครพลาสติกด้วยถ่านชีวภาพเพื่อใช้ในการประเมินและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$), แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็น L.R. Grade ส่วนโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl), ไฮโดรคลอริก (HCl), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) เป็น A.R. Grade

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองโดยใช้คอลัมน์แบบกะ (batch column experiment) ที่บรรจุถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟขนาด 0.3–0.4 มิลลิเมตร ออกแบบให้มีความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 15 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์เท่ากับ 2.0 เซนติเมตร แสดงดัง Fig. 1 โดยป้อนน้ำเข้าระบบที่ปริมาณการกรองเท่ากับ 50 เท่าของ Bed volume ทำการทดลองด้วยการป้อนน้ำผิวดินสังเคราะห์สู่คอลัมน์ น้ำผิวดินสังเคราะห์เตรียมโดยใช้สาร $NaHCO_3$, KCl, $CaSO_4$ และ $MgSO_4$ มีสมบัติแสดงดัง Table 1 ซึ่งน้ำจะมีการปนเปื้อนไมโครพลาสติกชนิด Polyethylene (PE) และ Polyethylene terephthalate (PET) ที่มีรูปร่างแบบชิ้นส่วน (Fragment) และมีขนาด 40–50 ไมโครเมตร มีลักษณะการกรองแบบไหลขึ้น (upflow) และใช้อัตราการกรองเท่ากับ 4.8 เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการกรองที่ใช้ทั่วไปสำหรับระบบกรองทรายเร็ว (Tchobanoglous and Schroeder, 1985)

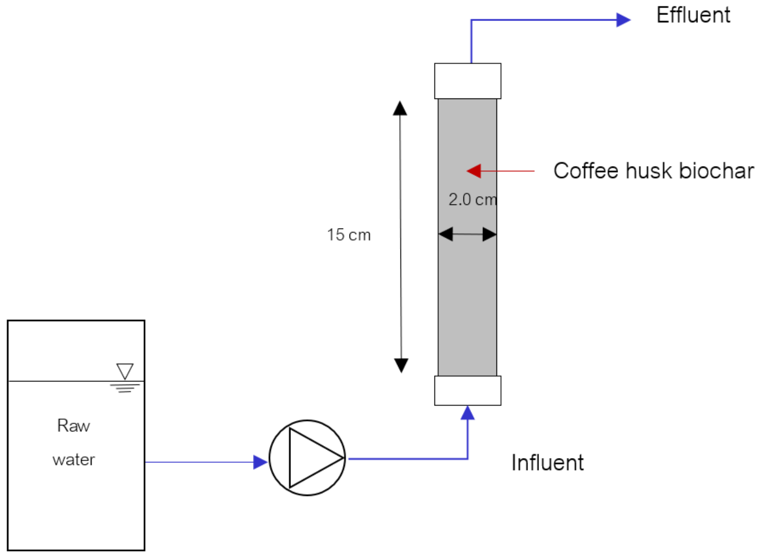


Fig. 1 Batch column experiment

Table 1 Properties of synthetic surface water

Parameter	Properties
pH	7.2
Electrical conductivity (EC)	310 µS/cm
Ionic strength	0.02 M

การทดลองที่ 1 การเตรียมและศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบกาแฟด้วยวิธีการเผาแบบไพโรไลซิส

ทำการศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบกาแฟ โดยนำแกลบกาแฟ 10 กิโลกรัม มาทำการเผาแบบไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส (Abdoul Magid et al., 2021) ผ่านเตาเผาแบบ pilot scale และตรวจสอบสมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าพีเอชที่ประจุบนผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) และหมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิวและรูพรุน

การทดลองที่ 2 ทำการเดินระบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติก

เบื้องต้นกำหนดให้น้ำสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีปริมาณไมโครพลาสติก 10 และ 100 ชิ้นต่อลิตร และทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกชนิด PE และ PET ด้วยระบบ Biochar filter โดยใช้ค่าพีเอช (pH) ของน้ำผิวดินทั่วไป อยู่ที่ประมาณ 7.2 (EPA, 2002) และใช้ระบบบัฟเฟอร์ฟอสเฟตควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลอง แล้วทำการตรวจสอบลักษณะของถ่านชีวภาพ โดยพื้นที่ผิวและรูพรุนใช้เทคนิค Brunauer Emmett *Teller* (BET) หมู่ฟังก์ชันใช้เทคนิค FTIR spectroscopy การเกาะติดของไมโครพลาสติกในคอลัมน์ใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy with Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM/EDS analysis) และตรวจวัดปริมาณไมโครพลาสติกในน้ำออก

ประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติก

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกจากปัจจัยที่แตกต่างกัน ได้แก่ จำนวนไมโครพลาสติกและชนิดของไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกสามารถหาได้จาก Equation 1

$$\text{Removal (\%)} = [(C_0-C_e)/ C_0] \times 100 \quad (1)$$

โดย C_0 คือ จำนวนของไมโครพลาสติกเริ่มต้นที่เข้าสู่ระบบ (ชิ้นต่อลิตร)

C_e คือ จำนวนของไมโครพลาสติกสุดท้ายที่ออกจากระบบ (ชิ้นต่อลิตร)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพที่เตรียมจากแกลบกาแฟ โดยการนำแกลบกาแฟไปเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส พบว่าได้สมบัติแสดงดัง Table 2

Table 2 Properties of coffee husk biochar

Coffee husk biochar	Properties
pH point of zero charge (pH_{pzc})	9.7
Surface area	72.4 m^2/g
Pore volume	4.7×10^{-8} m^3/g

ผลจากการศึกษาสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ พบว่ามีค่าพีเอชที่ประจุบนผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ประมาณ 9.7 จะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟนี้มีค่า pH_{pzc} ที่สูงกว่าค่าพีเอชของน้ำผิวดินทั่วไป (ประมาณ 7.2) ทำให้ประจุบนผิวของถ่านชีวภาพเป็นบวก ในขณะที่ไมโครพลาสติกมีค่า pH_{pzc} ประมาณ 4 (Wang et al., 2021) ซึ่งต่ำกว่าค่าพีเอชของน้ำผิวดินที่ป้อนเข้า ทำให้ผิวของไมโครพลาสติกมีประจุเป็นลบ การที่พื้นผิวของวัสดุทั้งสองมีประจุเป็นบวกและลบทำให้วัสดุสามารถเกาะติดกันได้ด้วยแรงดึงดูดทางประจุ นอกจากนี้ ยังได้ทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ

พบว่าถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบส ได้แก่ กลุ่มฟีนอล เป็นองค์ประกอบ ซึ่งกลุ่มฟีนอลมีค่า pK_a ที่สูง จึงส่งผล ทำให้ค่า pH_{pzc} ของถ่านชีวภาพสูงดังที่กล่าวข้างต้น

เมื่อนำถ่านชีวภาพไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพพบว่าพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ด้วยวิธี BET มีค่าเท่ากับ 72.4 ตาราง-เมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 4.7×10^{-8} ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม และเมื่อทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยเครื่องมือ SEM/EDS analysis พบพื้นที่ผิวและความรูพรุนไม่โดดเด่น แสดงดัง Fig. 2 ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำมาศึกษากลไกการดักจับทางเคมีระหว่างถ่านชีวภาพและไมโครพลาสติกที่ต้องการศึกษาในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ จากการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ พบว่าพื้นผิวประกอบด้วยธาตุที่มีประจุบวกที่หลากหลาย เช่น แคลเซียม (Calcium), แมกนีเซียม (Magnesium) และโพแทสเซียม (Potassium) เป็นต้น ซึ่งธาตุเหล่านี้สามารถทำหน้าที่ เป็นสะพานไอออน (Ion bridging) เชื่อมระหว่างประจุลบบนพื้นผิวของวัสดุทั้งสองได้ ถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟจึงเป็นวัสดุชีวมวลที่มีความน่าสนใจในการนำมากำจัดไมโครพลาสติกในงานวิจัยนี้

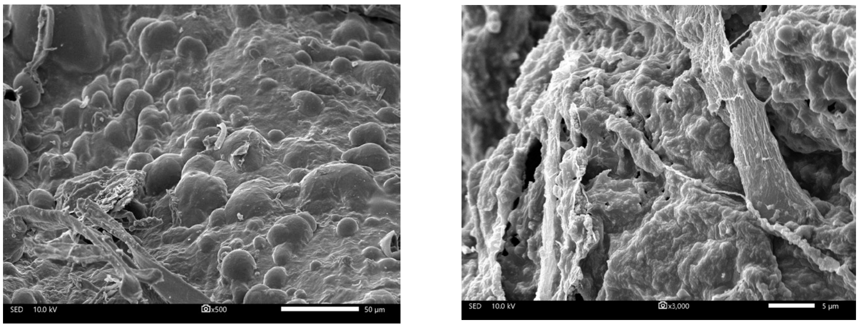


Fig. 2 Surface characteristics of coffee husk biochar examined by SEM/EDS analysis.

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ Biochar filter โดยใช้จำนวนไมโครพลาสติกที่ป้อนเข้าระบบแตกต่างกันพบว่า ที่ปริมาณไมโครพลาสติกป้อนเข้า 10 ชิ้นต่อลิตร และ 100 ชิ้นต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 47% และ 83% ตามลำดับ แสดงดัง Table 3 และเมื่อทดสอบประสิทธิภาพระบบ Biochar filter โดยใช้ชนิดไมโครพลาสติกที่แตกต่างกัน พบว่า ไมโครพลาสติกชนิด PE และ PET มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 83% และ 94% ตามลำดับ แสดงดัง Table 4 จากผลการทดลองสามารถบ่งบอกได้ว่าจำนวนและชนิดของไมโครพลาสติกส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกด้วยถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ

Table 3 The removal efficiency of biochar filter by testing influent microplastic number

Influent microplastics number (microplastic/L)	Removal efficiency (%)
10	47
100	83

Table 4 The removal efficiency of biochar filter by testing different microplastic types

Microplastic types	Removal efficiency (%)
PE	83
PET	94

ผลจากการศึกษาพบว่า การกำจัดไมโครพลาสติกด้วยชั้นกรองถ่านชีวภาพที่เตรียมจากแกลบกาแฟ สามารถกำจัดไมโครพลาสติกได้ในประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำผิวดินสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบและชนิดของไมโครพลาสติก โดยไมโครพลาสติกแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ไมโครพลาสติกที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ PE และ PET ที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันอย่างชัดเจนส่งผลให้มีสภาพขั้วที่แตกต่างกันด้วย จาก Table 4 จะเห็นได้ว่า PET มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่า PE อาจเป็นเพราะ PET มีสภาพขั้วที่แรงกว่า PE เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อนกว่า จึงเป็นผลทำให้ไมโครพลาสติกชนิด PET ถูกกักกรองด้วยถ่านชีวภาพได้มากกว่า

ระบบชั้นกรองถ่านชีวภาพดังกล่าว มีวัตถุประสงค์ในการนำไปพัฒนาระบบกรองในกระบวนการผลิตน้ำประปา อัตราการกรองและขนาดของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการเดินระบบเหมาะสมในการใช้งานกับชั้นกรอง (Tchobanoglous and Schroeder, 1985) อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเพื่อการดูดซับมลสารได้ เพราะฉะนั้น ในการที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ (regenerate) ไม่ใช่เพียงการล้างด้วยน้ำเพื่อปรับสภาพชั้นกรอง แต่ต้องพิจารณาถึงการใช้สารเคมีเพื่อให้เกิดการหลุดออกมาจากกลไกการดูดซับดังกล่าวด้วย

ปัจจุบันระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนและกรองทราย ซึ่งการตกตะกอนไม่สามารถแยกไมโครพลาสติกออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไมโครพลาสติกมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำและสามารถหลุดรอดออกจากระบบการตกตะกอนได้ ส่วนระบบการกรองทราย ผิวทรายไม่ได้เอื้อต่อการดักจับไมโครพลาสติก แต่ถ่านชีวภาพจะมีพื้นที่ผิวที่เหมาะสมกว่า ถ่านชีวภาพจะมีโครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นผิวที่มีความหลากหลาย (heterogenity) จึงสามารถเกาะติดกับไมโครพลาสติกได้ดี (Wang et al., 2020) ส่งผลให้การกรองด้วยชั้นกรองถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกที่ดีกว่าการกรองทราย นอกจากนี้ การนำถ่านชีวภาพมาใช้ในการกำจัดไมโครพลาสติกในน้ำประปาทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบที่ต่ำและเป็นการนำของเสียจากภาคเกษตรกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วย

สรุป

ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบกาแฟเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อกำจัดไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำ เนื่องจากปัจจุบันกาแฟเป็นที่นิยมในการผลิตเป็นเครื่องดื่ม จึงทำให้เกิดของเสียที่เป็นแกลบกาแฟจำนวนมากในประเทศไทย การนำแกลบกาแฟมาใช้ในระบบชั้นกรองถ่านชีวภาพจึงทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ต่ำ และจากการทดสอบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่เตรียมจากแกลบกาแฟด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง พบว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษากลไกการดักจับทางเคมีระหว่างถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟและไมโครพลาสติก โดยจากการทดสอบจำนวนไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำป้อนเข้า 10 และ 100 ชิ้นต่อลิตร พบประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 47% และ 83% ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณไมโครพลาสติกในน้ำผิวดินมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ และจากการทดสอบไมโครพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน (PE) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต (PET) พบประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 83% และ 94% ตามลำดับ เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของไมโครพลาสติกแต่ละชนิดจะส่งผลต่อสภาพขั้วของไมโครพลาสติก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกแตกต่างกัน โดยผลจากการศึกษาการกำจัดมลสารไมโครพลาสติกด้วยระบบ Biochar filter ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดินต่อไป นอกจากนี้ระบบ Biochar filter สามารถนำไปใช้เป็น single media filter และ dual media filter ในอัตราการกรองเร็วโดยใช้การล้างย้อน (Backwash) แบบทั่วไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของชั้นกรอง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

Abdoul Magid, A.S.I., Islam, M.S., Chen, Y., Weng, L., Li, J., Ma, J., Li, Y. 2021. Enhanced adsorption of polystyrene nanoplastics (PSNPs) onto oxidized corncob biochar with high pyrolysis temperature. Sci Total Environ. 784: 147115. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147115

EPA. 2002. Short-term methods for estimating the chronic toxicity of Effluents and receiving waters to freswater organisms. 4^{th} ed. United States Environmental Protection Agency office of water. Washington, DC.

Kankanige, D., Babel, S. 2021. Contamination by ≥ 6.5 um-sized microplastics and their removability in a conventional water treatment plant (WTP) in Thailand. JWPE 40. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101765

Maleangpoothong, J., Photha, P,. Siriwongyotha, C,. Paksa, W,. Rommanee, W,. Taweesuk, D,. Srichoo, C. 2013. Thailand experiences from the grassroots: Value chain finance best practices, initiatives, strategies and trends in agriculture. Bangkok, Thailand: Asia-Pacific Rural and Agricultural Credit Association.

Tang, Y., Zhang, S., Su, Y., Wu, D., Zhao, Y., Xie, B. 2021. Removal of microplastics from aqueous solutions by magnetic carbon nanotubes. J. Chem. Eng. 406. doi:10.1016/j.cej.2020.126804

Tchobanoglous, G., Schroeder, E.D. 1985. Water Quality: Characteristics, Modeling, Modification. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts, U.S.A.

Wang, Y., Wang, X., Li, Y., Li, J., Liu, Y., Xia, S., Zhao, J. 2021. Effects of exposure of polyethylene microplastics to air, water and soil on their adsorption behaviors for copper and tetracycline. J. Chem. Eng. 404. doi:10.1016/j.cej.2020.126412

Wang, Z., Sedighi, M., Lea-Langton, A. 2020. Filtration of microplastic spheres by biochar: Removal efficiency and immobilisation mechanisms. Water Res. 184: 116165. doi:10.1016/j.watres.2020.116165

การกำจัดไมโครพลาสติกประเภทพอลิสไตรีนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ในห้องปฏิบัติการ
Removal of polystyrene microplastic in a Laboratory-Scale SBR wastewater treatment process

สุชีลา พลเรือง, พิมพ์ชนก วงษ์ไทยผดุง*, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์
Sucheela Polruang, Pimchanok Wongthaiphadung*, Varinporn Asokbunyarat
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: pimchanok.wongt@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดไมโครพลาสติกประเภทพอลิสไตรีนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเตรียมไมโครพลาสติกประเภทพอลิสไตรีน (Polystyrene หรือ PS) จากบรรจุภัณฑ์ใส่อาหารชนิดโฟม (PS 1) และชนิดกล่องใส (PS 2) ขนาด 2×2 mm โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ บรรจุภัณฑ์ใหม่ และ บรรจุภัณฑ์เสื่อมสภาพที่ผ่านกระบวนการ Photo-oxidation โดยผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา เป็นเวลา 15 d หลังจากนั้นนำไมโครพลาสติกมาใส่ในระบบเอสบีอาร์ โดยแต่ละชุดข้อมูลจะทำซ้ำอย่างละ 2 Batch จากการศึกษาพบว่าการกำจัดไมโครพลาสติกทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกัน โดยพบว่าหลังการบำบัดน้ำเสียจะพบ PS 1 ในน้ำทิ้ง ในขณะที่ PS 2 ไม่ได้ปนมาในน้ำทิ้งแต่จะสะสมตัวอยู่ในสลัดจ์เป็นส่วนใหญ่ เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกจะพบว่าระบบ SBR นั้นสามารถกำจัดไมโครพลาสติก PS 2 ใหม่ ได้มากที่สุด 94% รองลงมาเป็น PS 2 เก่า 81.5%, PS 1 เก่า 11% และ PS 1 ใหม่ 6.5%

คำสำคัญ: พอลิสไตรีน, เอสบีอาร์, ไมโครพลาสติก

Abstract

This research studies the removal of polystyrene microplastics in the SBR wastewater treatment system in the laboratory. By preparing polystyrene microplastics (PS) from foam food packaging (PS 1) and clear box type (PS 2), size 2×2 mm, which is divided into 2 types: new packaging and deterioration packaging that has been photo-oxidation through UV radiation for 15 d. After that, microplastics were then put in the SBR systems. Each data set will be repeated 2 batches. The study found that the removal of both microplastics is different. It was found that after wastewater treatment, PS 1 will be found in effluent, while PS 2 is not contaminated in effluent, but will accumulate mostly in Sludge. When accounting for the efficiency of microplastic removal, it is found that the SBR system can remove the new PS 2 microplastics at most. 94%, followed by 81.5% old PS 2, 11% old PS 1 and 6.5% new PS 1.

Keyword: Microplastics, Polystyrene, SBR

คำนำ

ในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมาขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นประมาณ 12% หรือประมาณปีละ 2 Mt โดยขยะพลาสติกเหล่านี้ถูกนำไปรีไซเคิลเพียงประมาณปีละ 25% หรือประมาณ 0.5 Mt ส่วนที่เหลืออีก 75% ส่งไปกำจัดอย่างถูกวิธีและบางส่วนคาดว่าสะสมตัวอยู่ในสิ่งแวดล้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) ซึ่งมีการคาดการณ์ว่ามีการตกค้างอยู่ในทะเล 10–15% จากปริมาณขยะพลาสติกทั้งหมด ขยะพลาสติกที่พบในสิ่งแวดล้อมในทะเลส่วนใหญ่จะเป็นถุงพลาสติก 80% ที่เหลือเป็นแก้วพลาสติก หลอด ฝาพลาสติก และภาชนะบรรจุอาหาร 20% และจากผลสำรวจบริเวณชายหาด แนวปะการัง และป่าชายเลน ในพื้นที่ 24 จังหวัด ในประเทศไทยพบว่ามีขยะพลาสติกตกค้างทั้งสิ้น 33 t โดย 10 อันดับขยะพลาสติกที่พบมากที่สุด ได้แก่ ถุงพลาสติกอื่นๆ ขวดพลาสติก ถุงก๊อบแก๊บ ถ้วย/จานโฟม ขวดเครื่องดื่มแก้ว ห่อ/ถุงอาหาร หลอด/ที่คนเครื่องดื่ม เศษโฟม กล่องอาหาร (โฟม) และแก้วพลาสติก และขยะพลาสติกมีแนวโน้มจะมีปริมาณมากขึ้นในอนาคตตามความต้องการในการใช้งานของมนุษย์ ซึ่งจากรายงานขยะพลาสติกในปี 2563 พบว่าขยะพลาสติกมีปริมาณมากถึง 6,300 t/d เพิ่มขึ้นจากปี 2562 15% (เดิมมีขยะพลาสติกประมาณ 5,500 t/d) (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) โดยขยะพลาสติกที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอาจจะมาจากการแพร่ระบาดของโรคติดต่อเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ด้วยทำให้ประชาชนต้องกักตัวอยู่บ้าน และทำให้ประชาชนหันมาสั่งสินค้าและอาหารผ่านทางระบบออนไลน์เพิ่มมากขึ้น มีการงดรับภาชนะใส่อาหารที่นำมาเอง เพื่อเป็นการป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อ

ขยะพลาสติกที่สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน จะแตกตัวเป็นพลาสติกขนาดเล็ก หรือที่เรียกว่าไมโครพลาสติก หมายถึงพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 mm โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน และการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นต้น (Wang et al., 2016) การแตกตัวของพลาสติกอาจจะสังเกตได้จากรอยแตกขนาดเล็กและการหลุดลอกของเนื้อพลาสติก รวมถึงลักษณะรูปร่างของพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ไมโครพลาสติกถูกสร้างขึ้นเพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานในชื่อ ไมโครบีด (Microbeads) ไมโครสเฟียร์ (Microsphere) หรือเม็ดสครับ (Scrub) (UNEP, 2015) ไมโครพลาสติกประเภทไมโครบีด พบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดร่างกาย โดยทั่วไปไมโครพลาสติกเบาลอยน้ำ และแพร่กระจายได้ง่าย ทำให้หลุดออกไปจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พบไมโครพลาสติกตามแหล่งน้ำธรรมชาติ เมื่อไมโครพลาสติกสะสมตัวอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำและห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต

พลาสติกประเภทพอลิสไตรีน (PS) มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งบรรจุภัณฑ์ใส่อาหารชนิดโฟม และชนิดกล่องใส อีกทั้งยังกลายไปเป็นขยะตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก เมื่อขยะที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานานจะเกิดการแตกสลายตัวไปเป็นไมโครพลาสติก อาจมีการปนเปื้อนในน้ำเสียและถูกรวบรวมเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งการกำจัดไมโครพลาสติกสามารถทำได้ยาก เพราะมีขนาดเล็ก ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการกำจัดไมโครพลาสติกประเภทพอลิสไตรีน (Polystyrene หรือ PS) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor หรือ SBR) จำลองในห้องปฏิบัติการ เนื่องด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (SBR) เป็นระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (AS) ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งการนำระบบเอสบีอาร์มาใช้ในการกำจัดไมโครพลาสติกนั้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตะแกรงกรองละเอียด อันเนื่องมากจากเกิดการอุดตันจากเศษพลาสติกที่มีขนาดเล็กและช่วยทำให้พลาสติกบางชนิดที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยลดโอกาสการหลุดลอดของไมโครพลาสติกไปกับน้ำทิ้ง (Effluent) เนื่องจากมีสลัดจ์เกาะอยู่บนพื้นผิว และพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำระบบเอสบีอาร์ จะช่วยลดเวลาในการเกิดไบโอฟิล์มบนพื้นผิว ทำให้เกิดการจมตัวลงได้เร็วขึ้น ซึ่งเราจะทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกได้จากการดูการกักเก็บไมโครพลาสติกไว้ในระบบ (การสะสมตัวของไมโครพลาสติกในsludgeและในถังปฏิกิริยา) โดยใช้วิธีการทำ Mass Balanec จากการเก็บข้อมูลขาเข้าขาออกของไมโครพลาสติกในระบบเอสบีอาร์

และทำการศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยการสะสมของไมโครพลาสติกในสลัดจ์ (Sludge) และการปล่อยออกของไมโครพลาสติกในน้ำทิ้ง (Effluent)

อุปกรณ์และวิธีการ

ประเภทพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง คือ พอลิสไตรีน (Polystyrene หรือ PS) โดยได้จากผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่

1. บรรจุภัณฑ์ใส่อาหารชนิดโฟม (PS 1)
2. บรรจุภัณฑ์ใส่อาหารชนิดกล่องใส (PS 2)

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารอาหารหลักและสารอาหารรองสำหรับเลี้ยงตะกอนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ SBR

1. น้ำประปา (รองใส่ภาชนะและตั้งทั้งไว้อย่างน้อย 24 h เพื่อให้คลอรีนระเหยออกไป)
2. กลูโคส (Glucose: $C_6H_{12}O_6$) } สารอาหารหลัก
3. ยูเรีย (Urea: NH_2CONH_2) } สารอาหารหลัก
4. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer solution) } สารอาหารรอง
5. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium sulfate: $MgSO_4$) } สารอาหารรอง
6. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride: $CaCl_2$) } สารอาหารรอง
7. สารละลายเฟอริคคลอไรด์ (Ferric Chloride: $FeCl_3$) } สารอาหารรอง
8. หัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed) จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

1. การเตรียมไมโครพลาสติก

ไมโครพลาสติกที่ใช้ในการทดลองนำมาจากพลาสติกประเภทพอลิสไตรีน (PS) ที่ได้มาจากบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดโฟม (PS 1) และชนิดกล่องใส (PS 2) โดยบรรจุภัณฑ์ที่นำมาทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ บรรจุภัณฑ์ใหม่ และบรรจุภัณฑ์เสื่อมสภาพที่ผ่านกระบวนการ Photo-oxidation โดยการเตรียมไมโครพลาสติกแบบที่ 1จะใช้ภาชนะบรรจุอาหารชนิดโฟม (PS 1 ใหม่) และชนิดกล่องใส (PS 2 ใหม่) ขนาด 2×2 mm และแบบที่ 2 ใช้ภาชนะบรรจุอาหารชนิดโฟม (PS 1 เก่า) และชนิดกล่องใส (PS 2 เก่า) ตัดให้ได้ขนาด 2×2 mm นำไปผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน (Photo-oxidation) เป็นเวลา 15 d โดยมีการเก็บตัวอย่างชิ้นไมโครพลาสติกทุกๆ 7 d มาสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชิ้นไมโครพลาสติกด้วยตาเปล่าและกล้องจุลทรรศน์

2. การเตรียมสารอาหารสำหรับเลี้ยงตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์

1. การเตรียมสารอาหารหลัก

สำหรับ COD_{in} 300 mg/L : กลูโคส 2.1094 g และยูเรีย 0.1055 g ต่อน้ำ 5 L

2. การเตรียมสารอาหารรอง

ชนิดที่ 1 Phosphate buffer Solution : Monopotassium phosphate (KH_2PO_4) 8.5 g Dipotassium phosphate (K_2HPO_4) 21.75 g Disodium phosphate (Na_2HPO_4).7H_2O 33.4 g Ammonium Chloride (NH4Cl) 1.7 g ละลายในน้ำ DI แล้วทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1 L

ชนิดที่ 2 Magnesium sulfate ($MgSO_4$) Solution : Magnesium sulfate ($MgSO_4.7H_2O$) 22.5 g ละลายในน้ำ DI แล้วทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1 L

ชนิดที่ 3 Calcium Chloride ($CaCl_2$) Solutions : Calcium Chloride ($CaCl_2$) 27.5g ละลายในน้ำ DI แล้วทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1 L

ชนิดที่ 4 Ferric Chloride : Ferric Chloride ($FeCl_3.6H_2O$) 0.25 g ละลายในน้ำ DI แล้วทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1 L

3. การเลี้ยงตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์เพื่อนำไปใช้ในการจำลองระบบ SBR

1. กำจัดไมโครพลาสติกที่อาจปนเปื้อนในหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้รับจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนบางซื่อ โดยกรองหัวเชื้อผ่าน Aluminum sieve ขนาด 300 µm และ 75 µm จากนั้นนำหัวเชื้อที่ผ่าน sieve ขนาด 75 µm

2. เตรียมน้ำประปา 5 L เติมสารอาหารหลัก (กลูโคส 2.1094 g และยูเรีย 0.1055 g/น้ำ 5 L) และสารอาหารรอง (สารอาหารรอง 1 ml/น้ำ 1 L) โดยกำหนดให้ค่า COD ของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าเฉลี่ยประมาณเท่ากับ COD_{in} 300 mg/L จากนั้นเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศเป็น เวลา 24 h

3. เมื่อครบ 24 h หยุดการเติมอากาศ ปล่อยตกตะกอนเป็นเวลา 30 min หลังจากนั้นเปลี่ยนน้ำ โดยนำน้ำเหนือชั้นตะกอนออก

4. ทำการเลี้ยงตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยขั้นตอนที่ 2–3 จนได้ค่า MLSS เท่ากับ 2,000 mg/L

4. การดำเนินงานสำหรับกระบวนการจำลองระบบ SBR

การจำลองระบบ SBR แบ่งเป็น 2 แบบ คือ ไม่ใส่ชิ้นไมโครพลาสติก (without microplastics) และใส่ชิ้นไมโครพลาสติก (with microplastics) ซึ่งขั้นตอนของทั้ง 2 แบบ นี้จะแตกต่างกันตรงที่แบบใส่ชิ้นไมโครพลาสติกจะทำการป้อนชิ้นไมโครพลาสติกเข้าสู่ระบบ SBR ในทุกรอบของการเปลี่ยนน้ำ และการเก็บบันทึกปริมาณชิ้นไมโครพลาสติกในน้ำทิ้ง (แสดงดัง Fig. 1)

การจำลองระบบ SBR แบบป้อนไมโครพลาสติก

1. นำตะกอนหัวเชื้อที่ได้จากการเลี้ยงตะกอนหัวเชื้อมาจำลองระบบ SBR โดยกำหนดเกณฑ์การเดินระบบ SBR (Operation criteria) ดังนี้

ค่า Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) 2,000 mg/L ค่า Sludge Volume Index (SVI) ในช่วง 80–150 ml/g ค่า Chemical Oxygen Demand (COD) ในน้ำทิ้ง (COD_{eff}) <120 mg/L ค่าประสิทธิภาพการกำจัด Chemical Oxygen Demand (COD) ในน้ำทิ้ง $\eta_{COD\ removal}$ > 80% และค่า Suspended Solids (SS) ในน้ำทิ้ง SS_{eff} < 30 mg/L

2. จำลองระบบ SBR ที่มีระยะเวลาต่อรอบเท่ากับ 24 h และ Sludge Retention Time (SRT) 10 d ภายใต้เงื่อนไขการเดินระบบ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การเติมน้ำเสียสังเคราะห์ และไมโครพลาสติก (Fill) ใช้เวลา 0.5 h

ขั้นตอนที่ 2 : การทำปฏิกิริยา (React) ใช้เวลา 22 h

ขั้นตอนที่ 3 : การตกตะกอน (Settle) ใช้เวลา 0.5 h

ขั้นตอนที่ 4 : การถ่ายน้ำทิ้ง (Draw หรือ Decant) ใช้เวลา 0.5 h

ขั้นตอนที่ 5 : การพัก (Idle) ใช้เวลา 0.5 h

3. เริ่มป้อนไมโครพลาสติก 10 ชิ้น ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า COD ของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าเฉลี่ยประมาณเท่ากับ COD_{in} 300 mg/L เข้าสู่ระบบ SBR ในทุก ๆ รอบของการเติมน้ำเสียเข้าระบบ

4. บันทึกปริมาณไมโครพลาสติกในน้ำทิ้งทุก ๆ รอบของการปล่อยน้ำทิ้ง ปริมาณไมโครพลาสติกในสลัดจ์ทุก ๆ รอบของการปล่อยสลัดจ์ทิ้ง และจัดทำข้อมูล Mass Balance ของจำนวนชิ้นไมโครพลาสติก ดังนี้ จำนวนชิ้นไมโครพลาสติกทั้งหมดในน้ำเข้า (MPs_{total} ในน้ำเข้า) เท่ากับผลรวมของจำนวนชิ้นไมโครพลาสติกทั้งหมดในน้ำทิ้ง (MPs_{total} ในน้ำทิ้ง) จำนวนชิ้นไมโครพลาสติกทั้งหมดในสลัดจ์ที่ถ่ายทิ้ง (MPs_{total} ในสลัดจ์ที่ถ่ายทิ้ง) และจำนวนชิ้นไมโครพลาสติกทั้งหมดที่สะสมในสลัดจ์ (MPs_{total} ที่สะสมในสลัดจ์ที่ค้างในระบบ)

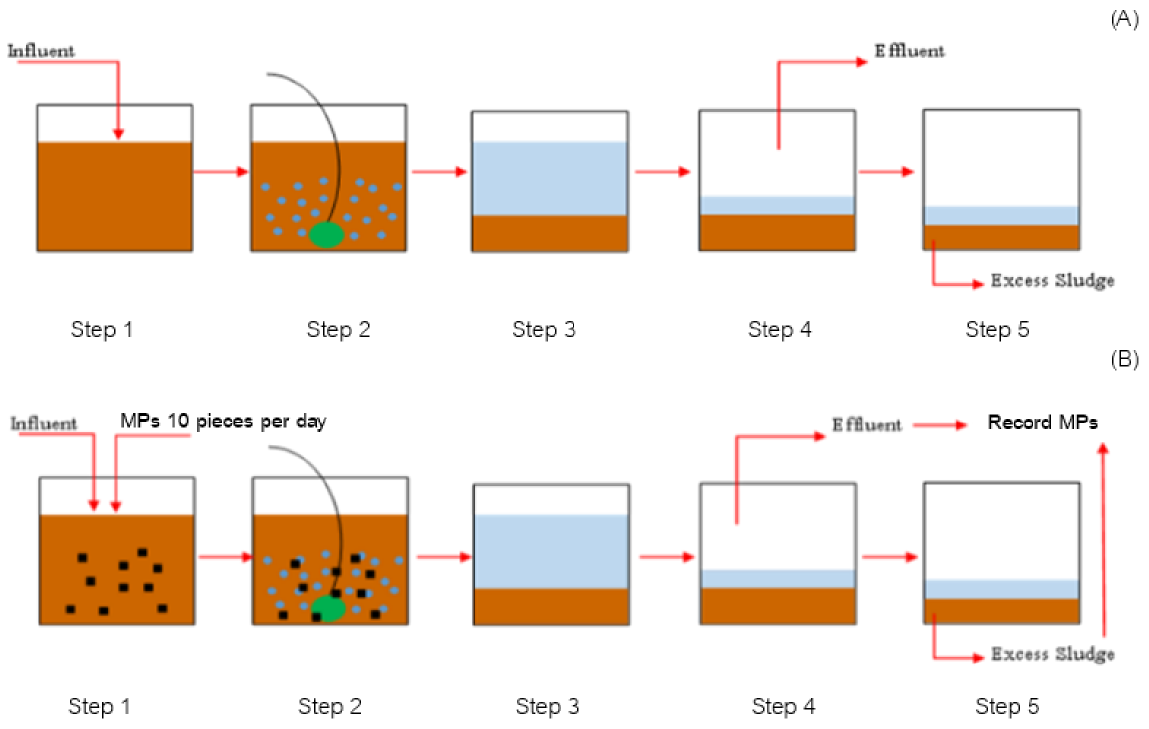


Fig. 1 SBR simulation process: (A) without microplastics (MPs); (B) with microplastics (MPs)

5. กระบวนการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกที่ได้จากกระบวนการจำลองระบบ SBR

การวิเคราะห์ไมโครพลาสติกที่ได้จากกระบวนการจำลองระบบ SBR แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การนับจำนวนชิ้นไมโครพลาสติก และการสังเกตพื้นผิวของชิ้นไมโครพลาสติก โดยการนำชิ้นไมโครพลาสติกที่เก็บได้ในแต่ละจุดจากการจำลองระบบ SBR (ในน้ำทิ้ง ในสลัดจ์ที่ถูกปล่อยออกจากระบบ และในสลัดจ์ที่สะสมอยู่ในระบบ) มานับจำนวนและจัดทำข้อมูล Mass Balance ของจำนวนชิ้นไมโครพลาสติก จากนั้นนำชิ้นไมโครพลาสติกที่ได้มาสังเกตลักษณะพื้นผิวภายนอกด้วยตาเปล่าและกล้องจุลทรรศน์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ลักษณะทางกายภาพของชิ้นไมโครพลาสติก

การศึกษาไมโครพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนที่ได้มาจากบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดโฟม (PS 1) และชนิดกล่องใส (PS 2) โดยบรรจุภัณฑ์ที่นำมาทดสอบ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1.บรรจุภัณฑ์ใหม่ 2.บรรจุภัณฑ์เสื่อมสภาพที่ผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ซึ่งลักษณะของ PS 1 ใหม่ จะมีสีขาวสว่าง เปราะบาง แตกหักง่าย น้ำหนักเบา สามารถลอยน้ำได้ PS 1 ที่ผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน มาเป็นเวลา 7 d เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากสีขาวเป็นสีขาวอมเหลือง ความหนาและการหลุดลอกของชิ้นไมโครพลาสติกเริ่มมีความเปลี่ยนแปลงบางเล็กน้อย และPS 1 ที่ผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน มาเป็นเวลา 15 d (PS 1 เก่า) จะสังเกตเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของ PS 1 ได้อย่างชัดเจน โดยมีการเปลี่ยนจากสีขาวสว่างเป็นสีเหลืองอย่างชัดเจน ความหนาของไมโครพลาสติกลดลงมากจากเดิม เปราะบางและแตกหักได้ง่ายมากกว่าปกติ มีการหลุดลอก ผุกร่อนอย่างชัดเจน (แสดงดัง Fig. 2) ส่วนลักษณะของ PS 2 ใหม่ จะมีความใส น้ำหนักเบา แต่ไม่ลอยน้ำเหมือน PS 1 ไม่แตกหักได้ง่าย เมื่อผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน พบว่าทั้ง 7 d และ 15 d (PS 2 เก่า) สี

ของชิ้นไมโครพลาสติก นั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดจากตอนแรก โดยจะเปลี่ยนสีเป็นใสอมเหลืองและเป็นสีเหลือง ตามลำดับ ส่วนที่เหลือไม่พบการเปลี่ยนแปลง (แสดงดัง Fig. 3) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการของ Kowalski et al. (2016) พบว่าสีของ PS เปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลืองหลังการได้รับรังสี UV มาเป็นเวลา 1 เดือน และเมื่อการสัมผัสกับรังสี UV (เช่น แสงแดด) เป็นเวลานานไมโครพลาสติกมีแนวโน้มเกิดการเสื่อมสภาพด้วยแสง และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาสีเหลือง เช่น สารประกอบควิโนน (quinone) จะถูกสร้างขึ้นในกระบวนการนี้ ดังนั้นสีของไมโครพลาสติกจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลือง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชัน (Andrady, 2017; Guo and Wang, 2019) และพลาสติกที่มีอายุมาก เช่นพลาสติกที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน จะมีพื้นผิวที่เปราะ ผุกร่อน เป็นรู ฉีกขาด และมีรูปร่างผิดปกติ (Hidalgo-Ruz et al., 2012) อีกทั้งจากการศึกษาของ Cai et al. (2018) ยังแสดงให้เห็นว่าหลังจากการได้รับรังสี UV จะเกิดรอยแตกขนาดเล็ก รอยแตก และการหลุดลอกขึ้นบนพื้นผิวของไมโครพลาสติก

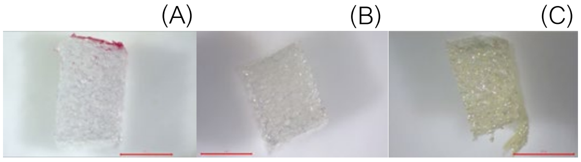


Fig. 2 Transformation of microplastics: (A) PS 1 New; (B) PS 1 Old (7 d); (C) PS 1 Old (15 d)

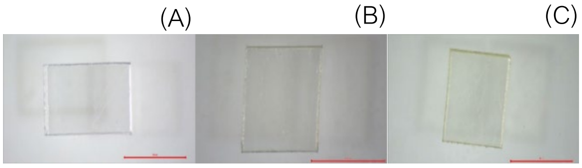


Fig. 3 Transformation of microplastics: (A) PS 2 New; (B) PS 2 Old (7 d); (C) PS 2 Old (15 d)

2. คุณภาพน้ำในการดำเนินระบบ SBR

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยทั่วไปมีเกณฑ์มาตรฐานในการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน ดังนี้ ค่า COD ไม่เกิน 120 mg/L ค่า SS ไม่เกิน 30 mg/L เป็นต้น (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) โดยทุกรอบของการดำเนินระบบจะทำการเก็บผลทุกๆ 5 วัน คือ day 0, day 5 และday 10 จาก Fig. 4(A) แสดงค่า MLSS ของทุกชุดข้อมูล ซึ่งค่า MLSS ที่ได้นั้นมากกว่า 2,000 mg/L ถือว่าผ่านเกณฑ์ตามที่ได้ตั้งไว้ ค่า SVI ในชุดข้อมูลของ without MPs (ไม่ใส่ไมโครพลาสติก) มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (80–150 ml/g) ในขณะที่ชุด with MPs (ชุดที่ใส่ไมโครพลาสติก) มีค่าที่ไม่แน่นอน มีทั้งที่อยู่ในเกณฑ์และต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด อย่างไรก็ดี จากผลค่า COD, SS รวมทั้งค่าประสิทธิภาพการกำจัด COD พบว่าค่า SVI ดังกล่าวไม่มีผลกระทบกับการดำเนินระบบ SBR อีกทั้งพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่จัดเป็นพารามิเตอร์ควบคุมตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง Fig. 4B จะเห็นว่าค่า SS อยู่ในเกณฑ์ที่ดีเกือบทั้งหมด (<30 mg/L) มีเพียงค่า SS ของการเดินระบบวันที่ 5 ของ PS 1 เก่า ที่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดเล็กน้อย โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อการเดินระบบมีระยะเวลานานขึ้น ซึ่งหมายถึงอายุตะกอนในระบบมีค่ามากขึ้นจนถึง 10 d พบว่าค่า SS อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดทุกการทดลอง Fig. 4C จะเห็นได้ว่าค่า COD มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด (<120 mg/L) สอดคล้องกับค่า SS Fig. 4D แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD โดยพบว่าในชุดข้อมูลของ without MPs ค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (>80%) และในชุดข้อมูลของ with MPs ค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเล็กน้อย (PS 2 ใหม่มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD 77%)

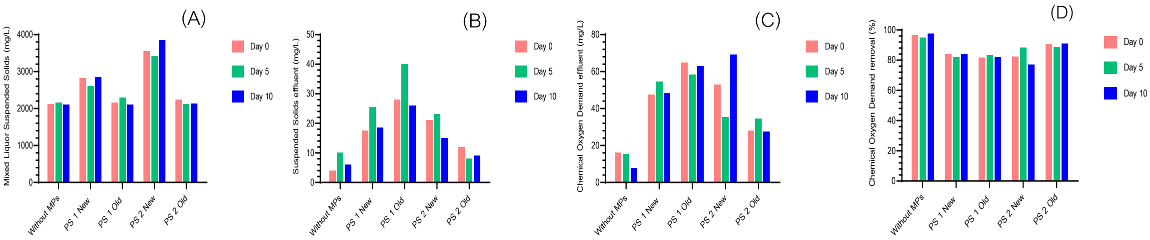


Fig. 4 Results of analysis water quality: (A) Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS); (B) Suspended Solids in effluent (SS_{eff}); (C) Chemical Oxygen Demand in effluent (COD_{eff}); (D) Chemical Oxygen Demand removal

3. การกำจัดไมโครพลาสติกในระบบ SBR

ลักษณะการดำรงอยู่ของ PS 1 และ PS 2 เมื่อทำการดำเนินระบบ (เปิดเครื่องเติมอากาศ) พบว่า PS ทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกัน โดยที่ PS 1 จะลอยน้ำเมื่อทำการดำเนินระบบ และเมื่อระบบดำเนินครบ 24 h ชิ้นไมโครพลาสติกของ PS 1 จะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนรวมตัวกับสลัดจ์อยู่เหนือน้ำบริเวณขอบขอบถังปฏิกิริยา ส่วน PS 2 จะเคลื่อนตัวอยู่ในน้ำ เมื่อทำการดำเนินระบบ และเมื่อระบบดำเนินครบ 24 h ชิ้นไมโครพลาสติกของ PS 2 จะจมตัวรวมอยู่กับสลัดจ์ที่บริเวณด้านล่างของขอบถังปฏิกิริยา (แสดงดัง Fig. 5)

(A) (B)

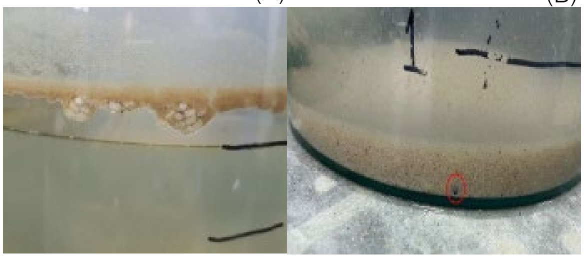


Fig. 5 The existence of microplastics: (A) PS 1 New; (B) PS 2 New

จากการศึกษาการกำจัดไมโครพลาสติกในระบบ SBR ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พบว่า การกำจัดไมโครพลาสติกของทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกัน โดย PS 1 ส่วนใหญ่จะพบในน้ำทิ้ง (Effluent) และสะสมตามขอบขอบถังปฏิริยาและสายยาง (System accumulate) ไม่มีการสะสมตัวในตะกอนจุลชีพ (Sludge) โดยมีค่าเฉลี่ยการพบชิ้นไมโครพลาสติกของ PS 1 ใหม่ และ PS 1 เก่า ในน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 6–10 piece/d และ 7–10 piece/d ตามลำดับ และพบติดตามขอบขอบถังปฏิกิริยาในช่วง 6–7 piece/d และ 10–11 piece/d ตามลำดับ (แสดงดัง Fig. 6) ส่วน PS 2 ส่วนใหญ่จะสะสมตัวในตะกอนจุลชีพ โดยมีค่าเฉลี่ยการพบชิ้นไมโครพลาสติกของ PS 2 ใหม่ และ PS 2 เก่า สะสมในตะกอนจุลชีพภายในระบบอยู่ (System accumulate) ในช่วง 9–10 piece/d และ 6–10 piece/d ตามลำดับ ซึ่งทั้ง PS 2 ใหม่ และ PS 2 เก่า นั้นจะมีบางส่วนที่หลุดไปกับน้ำทิ้งและหลุดปนไปกับสลัดจ์ที่ดูดออกจากระบบ (Daily Excess sludge) อยู่ในช่วง 0–3 piece/d ถือว่าเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนชิ้นที่ใส่ไป จาก Fig. 7 จะเห็นได้ว่า PS 2 มีแนวโน้มการสะสมไมโครพลาสติกในระบบมาขึ้นในทุก ๆ วัน เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกจะพบว่าระบบ SBR นั้นสามารถกำจัดไมโครพลาสติก PS 2 ใหม่ ได้มากที่สุด 94% รองลงมาเป็น PS 2 เก่า 81.5%, PS 1 เก่า 11% และ PS 1 ใหม่ 6.5% ซึ่งการที่กำจัดไมโครพลาสติกประเภท PS 1 ได้น้อยนั้นอาจเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของไมโครพลาสติก (Density)

โดยทั่วไปแล้วไมโครพลาสติกที่ลอยน้ำจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ส่วนอันที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ มีแนวโน้มว่าจะจมอยู่ใต้น้ำ ปกติโฟม (PS 1) มีความหนาแน่น 0.05 g/cm^3 (Haynes et al., 2014) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าน้ำมากทำให้หลุดลอยออกไปกับน้ำทิ้งได้ ส่วน PS 2 นั้นมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.04–1.50 g/cm^3 (Guo and Wang, 2019)

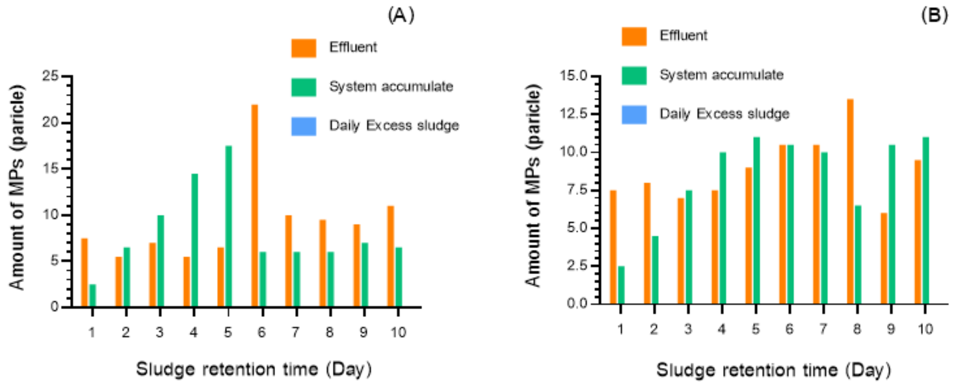


Fig. 6 Accumulation of microplastics in the SBR system: (A) PS 1 New; (B) PS 1 Old

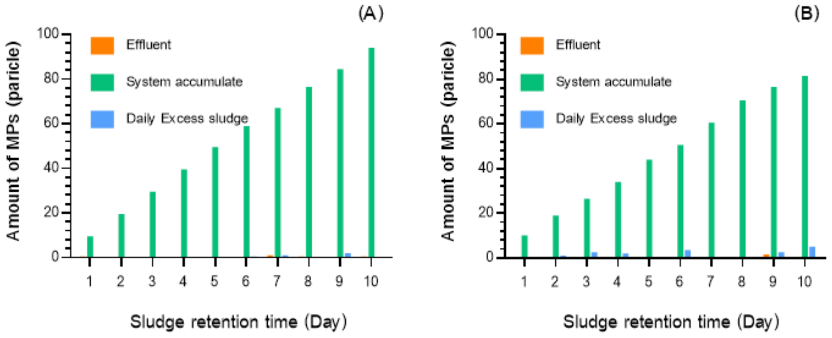


Fig. 7 Accumulation of microplastics in the SBR system: (A) PS 2 New; (B) PS 2 Old

ลักษณะของชิ้นไมโครพลาสติกหลังผ่านการดำเนินระบบ เมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์จะพบสลัดจ์หรือไบโอฟิล์ม (biofilm) เกาะอยู่บนพื้นผิวของพลาสติกทั้ง 2 ชนิด ยิ่งไมโครพลาสติกอยู่ในระบบได้นานจะมีไบโอฟิล์มเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อไบโอฟิล์มเกาะบนพื้นผิวไมโครพลาสติกมากขึ้นยิ่งทำให้ไมโครพลาสติกมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ และเริ่มจมตัวลง

สรุป

จากการศึกษาการกำจัดไมโครพลาสติกทั้ง 2 ชนิดในระบบ SBR พบว่าการกำจัดไมโครพลาสติกทั้ง 2 ชนิดนี้มีความแตกต่างกัน โดย PS 1 ส่วนใหญ่จะหลุดลอดออกไปกับน้ำทิ้ง ส่วน PS 2 นั้นส่วนใหญ่จะสะสมตัวอยู่ในสลัดจ์ที่เป็นเช่นนี้เพราะความหนาแน่นของไมโครพลาสติกทั้ง 2 นั้นไม่เหมือนกัน ซึ่งความหนาแน่ของ PS 1 นั้นน้อยกว่าน้ำทำให้เกิดการลอยตัวในน้ำ ส่วน PS 2 มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำทำให้จมตัวลง เมื่อเป็นเช่นนี้การกำจัดไมโครพลาสติกหลังผ่านระบบเอสบีอาร์จึงสามารถทำได้แตกต่างกัน สิ่งแรกทำการเสริมตะแกรงกรองละเอียดที่บริเวณทางออกของช่องน้ำทิ้งอีกชั้น เพื่อป้องกันไมโครพลาสติกหลุดออกไปสะสมตัวตามสิ่งแวดล้อม ส่วนการกำจัดไมโครพลาสติกในสลัดจ์นั้นทำได้โดยการนำสลัดจ์ออกจากระบบแล้วมาทำการแยกน้ำออกจากสลัดจ์ โดยการใช้ลานตากสลัดจ์ เมื่อสลัดจ์แห้งแล้วนำมาแยกด้วยตะแกรงอีกทีเพื่อเป็นการแยกไมโครพลาสติกออก ก่อนจะส่งไปทำปุ๋ยหมักหรือนำไปทิ้ง

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2562. รายงานสรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2561. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2564. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2563. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: กรุงเทพฯ.

ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสงแวดล้อม. 2553. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127 ตอนพิเศษ 69 ง. หน้าที่ 27–28.

Andrady, A.L. 2017. The plastic in microplastics: A review. Mar. Pollut. Bull. 119: 12–22. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.01.082

Cai, L., Wang, J., Peng, J., Wu, Z., Tan, X. 2018. Observation of the degradation of three types of plastic pellets exposed to UV irradiation in three different environments. Sci. Total Environ. 628–629: 740–747. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.079

Guo, X., Wang, J. 2019. The chemical behaviors of microplastics in marine environment: A review. Mar Pollut Bull: 142: 1–14. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.03.019

Haynes, W.M., Lide, D.R., Bruno, T.J. 2014. CRC Handbook of Chemistry and Physics (95th ed.).

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., Thiel, M. 2012. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. Environ. Sci. Technol. 46: 3060–3075. doi:10.1021/es2031505

Kowalski, N., Reichardt, A.M., Waniek, J.J. 2016. Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors. Mar. Pollut. Bull. 109: 310–319. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.05.064

UNEP. 2015. Plastic in cosmetic. United Nations Environment Programme.

Wang, J., Tan, Z., Peng, J., Qiu, Q., Li, M. 2016. The behaviors of microplastics in the marine environment. Mar. Environ. Res. 113: 7–17. doi:10.1016/j.marenvres.2015.10.014

การประเมินผลโครงการปรับปรุงแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุ กรณีศึกษา ทางแยกหมู่บ้านสหกรณ์ 3
Evaluation of improvement accident site project: Case study of Sahakorn 3 village crossway

<u>ศุภณัฐ ศรีสุวรรณ</u>*, วัชรินทร์ วิทยกุล, พิพัฒน์ สอนวงษ์

<u>Suppanat Srisuwan</u>*, Watcharin Witayakul, Pipat Sornwong

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Supanat.sris@ku.th

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนต่อจำนวนประชากร 100,000 คน สูงที่สุดเป็นอันดับสองของโลกและเป็นอันดับที่หนึ่งในภูมิภาคเอเชีย โดยมีอัตราการเสียชีวิตจากการจราจรทางถนนโดยประมาณต่อประชากร 100,000 คน ร้อยละ 32.7 ในกรณีศึกษาทางแยกหมู่บ้านสหกรณ์ 3 ทางหลวงหมายเลข 306 แคราย - คลองบ้านใหม่ ตำบลบางพูด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี นั้น เป็นการปรับปรุงทางร่วมทางแยก ของซอยเข้าหมู่บ้านสหกรณ์ 3 โดยใช้สัญญาณไฟจราจร การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์คือ ประเมินมูลค่าความเสียหายจากอุบัติเหตุ ก่อนและหลังการก่อสร้างปรับปรุงทางร่วมทางแยกโดยใช้สัญญาณไฟจราจร และ ความคุ้มค่าของโครงการที่นำงบประมาณไปปรับปรุงทางร่วมทางแยกโดยใช้สัญญาณไฟจราจร ผลสรุป คือ มูลค่าสุทธิปัจจุบัน (Net Present Value) ในปีที่ 3 เท่ากับ 10,609,720.52 บาท และอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit cost Ratio : B/C Rate) 7.92 แสดงว่าโครงการนี้เหมาะสมในการลงทุนเพื่อปรับปรุงทางร่วมทางแยกโดยใช้สัญญาณไฟจราจร

คำสำคัญ: มูลค่าสุทธิปัจจุบัน, อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย, หมู่บ้านสหกรณ์ 3

Abstract

Thailand has the world's second highest road fatalities per 100,000 population and number one in Asia with an estimated road traffic death rate per 100,000 population of 32.7 percent the case study of Sahakorn 3 village crossway, Highway No. 306, Khae Rai - Khlong Ban Mai, Bang Phut Subdistrict Pak Kret District Nonthaburi Province is an improvement of the intersection of the alley into the village of Sahakorn 3 by using the traffic signals. The objectives of this study are to Estimate accident costs before and after the construction of intersection improvement by using traffic signals and the project value that uses the budget to improve the intersection by using traffic signals. The conclusion is Net Present Value in the 3rd year is equal to 10,609,720.52 baht and the ratio between the present value of benefits to the costs (Benefit cost Ratio: B/C Rate) 7.92, indicating that this project is suitable for investing in the improvement of intersections by using traffic signals.

Keywords: Net present value, Benefit cost ratio, Sahakorn 3

คำนำ

อุบัติเหตุบนท้องถนนเป็นสาเหตุของความสูญเสีย ไม่ว่าจะเป็น ความสูญเสียทางเศรษฐกิจ ความสูญเสียของครอบครัวผู้ได้รับบาดเจ็บหรือผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุ จนกระทั่งถึงต่อประเทศชาติ อันส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาล ตลอดจนการขาดผลผลิตจากการสูญเสียผู้ที่เสียชีวิตหรือผู้พิการจากอุบัติเหตุ โดยเฉลี่ยค่าใช้จ่ายของอุบัติเหตุทางถนนของประเทศคิดเป็นร้อยละ 3 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (Gross Domestic Product: GDP) (WHO, 2020) ปัญหาด้านสภาพถนนที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ จึงมีความจำเป็นที่ต้องดำเนินการแก้ไข ซึ่งในกรณีศึกษาทางแยกหมู่บ้านสหกรณ์ 3 ทางหลวงหมายเลข 306 แคราย - คลองบ้านใหม่ ตำบลบางพูด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี นั้น เป็นการปรับปรุงทางร่วมทางแยก ของซอยเข้าหมู่บ้านสหกรณ์ 3 (พิกัดทางแยก 13.915897, 100.513754) ซึ่งทางแยกซอยดังกล่าวเป็นเส้นทางเชื่อมต่อระหว่าง ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 306 (ถนนติวานนท์) กับถนนทางหลวงชนบท นบ.3019 โดยถนนทางหลวงชนบท นบ.3019 เป็นถนนเลี่ยงเมืองที่ตัดผ่านทางหลวงแผ่นเดินหมายเลข 306 (ถนนติวานนท์) ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 304 (ถนนแจ้งวัฒนะ)และถนนสามัคคี ในปัจจุบันทางหลวงแผ่นดินแทบทุกเส้นทางในจังหวัดนนทบุรีมีปริมาณจราจรสูง โดยมีปริมาณจราจรราว 45,000 – 98,000 คัน/วัน ซึ่งทำให้ ถนนทางหลวงชนบทที่เชื่อมระหว่างทางหลวงแผ่นดินสายหลัก มีความสำคัญในการเลี่ยงรถติดของผู้ใช้เส้นทาง ทำให้ซอยเข้าหมู่บ้านสหกรณ์ 3 ซึ่งตรงจุดที่ทำการศึกษา เป็นจุดกลับรถที่สามารถเลี้ยวเข้าซอยหมู่บ้านสหกรณ์ 3 ได้ จึงเป็นการเลี้ยวเข้าซอยทำให้เกิดการตัดกระแสจราจรทางหลัก ของทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 306 (ถนนติวานนท์) จึงทำให้เกิดอุบัติเหตุถึงขั้นเสียชีวิต และเป็นจุดเสี่ยงอันตรายบนทางหลวง(black spot) ที่เมื่อจัดอันดับการเกิดอุบัติเหตุจากการตัดกระแสจราจร แยกดังกล่าวอยู่ลำดับที่ 1

ในอดีตที่ผ่านมาถ้ามีงบประมาณก็ดำเนินการ โดยไม่มีการศึกษามูลค่าความเสียหายจากการเกิดอุบัติเหตุ และวิเคราะห์ผลตอบแทนของเงินลงทุนและความคุ้มค่าของโครงการ ซึ่งบางโครงการอาจจะคุ้มค่า บางโครงการอาจจะไม่คุ้มค่าหรือเกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อให้การใช้งบประมาณคุ้มค่าและเกิดประโยชน์เพื่อหาค่ามูลค่าความเสียหายเป็นแนวทางในการพิจารณาโครงการแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุ และค่าผลตอบแทนของเงินทุนในโครงการว่ามีความคุ้มทุนคุ้มค่าหรือไม่ซึ่งแขวงทางหลวงนนทบุรีได้ขอรับงบประมาณเพื่อปรับปรุงจุดที่เกิดอุบัติเหตุดังกล่าว และได้งบประมาณในปี 2564 ในการปรับปรุงทางแยกโดยใช้สัญญาณไฟจราจร งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการรวบรวมข้อมูลจำนวนการเกิดอุบติเหตุ ความรุนแรงในการเกิดอุบัติเหตุ ไม่ว่าจะเป็นกรณีบาดเจ็บ หรือเสียชีวิต และนำข้อมูลวิเคราะห์หาค่าความเสียหายจากการเกิดอุบัติเหตุ เพื่อศึกษาหาความคุ้มค่าของโครงการก่อสร้างปรับปรุงจุดเกิดอุบัติเหตุ จากก่อนปรับปรุง และหลังปรับปรุงจุดเกิดอุบัติเหตุดังกล่าว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินมูลค่าความเสียหายจากอุบัติเหตุ ก่อนและหลังการก่อสร้างงานไฟสัญญาณจราจร ทางหลวงหมายเลข 306 ตอน แคราย - คลองบ้านใหม่ ตอน 2 ที่ กม.14+850 ตำบลบางพูด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี
2. เพื่อประเมินความคุ้มค่าของโครงการที่นำงบประมาณไปปรับปรุงทางร่วมทางแยกโดยใช้สัญญาณไฟจราจร ทางหลวงหมายเลข 306 ตอน แคราย - คลองบ้านใหม่ ตอน 2 ที่ กม.14+850 ตำบลบางพูด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

รูปแบบการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้ ตาม Fig. 1

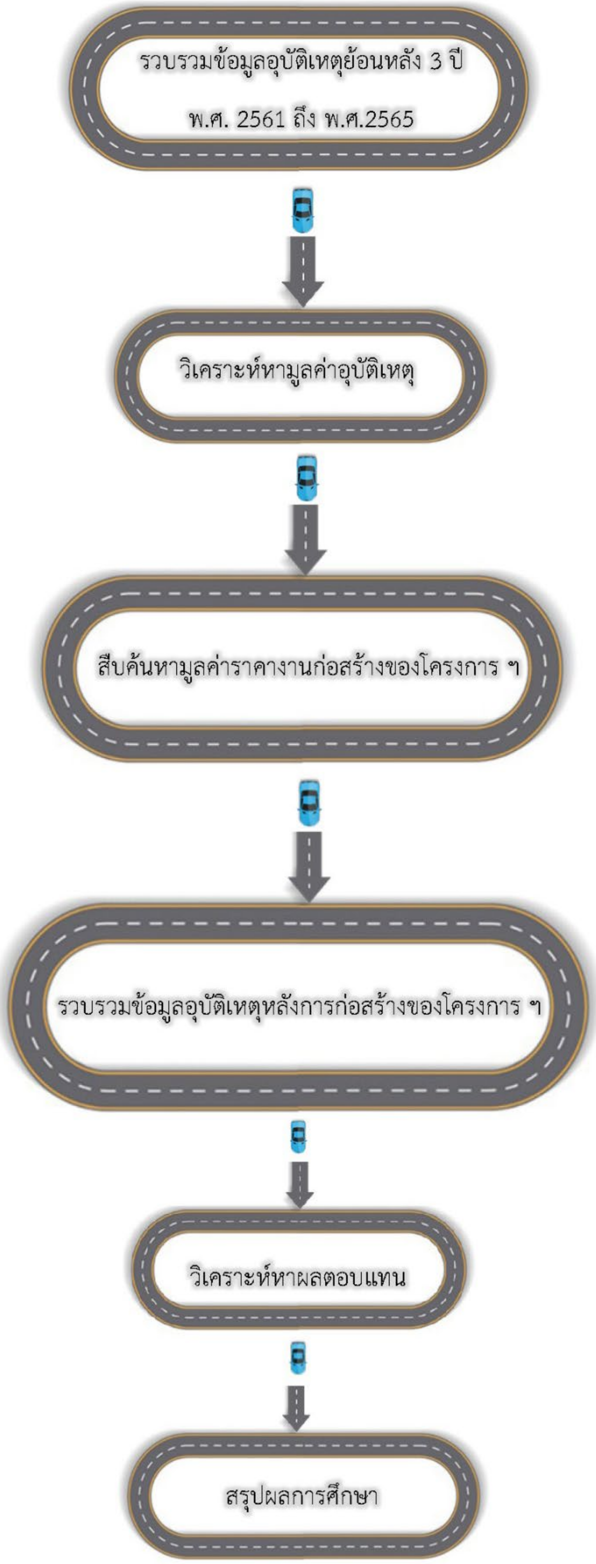


Fig. 1 Research methodology

ในการประเมินผลโครงการงานอำนวยความปลอดภัยเพื่อป้องกันและแก้ไขอุบัติเหตุทางถนน งานไฟสัญญาณจราจร ทางหลวงหมายเลข 306 ตอนควบคุม 0102 ตอน แคราย–คลองบ้านใหม่ ตอน 2 ที่ กม.14+850 ตำบลบางพูด

อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี การศึกษาครั้งนี้มีขั้นตอนดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้ ตาม Fig. 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลอุบัติเหตุ โดยรวบรวมข้อมูลย้อนหลัง 3 ปี ก่อนการก่อสร้าง (ปี พ.ศ. 2561–2565)

จากการเก็บข้อมูลอุบัติเหตุ จากฐานข้อมูลรายงานอุบัติเหตุที่เก็บรวบรวมโดย กรมทางหลวง สำนักงานทางหลวงที่ 13 (กรุงเทพ) แขวงทางหลวงนนทบุรี หมวดทางหลวงนนทบุรี ตั้งแต่ช่วงก่อนดำเนินการก่อสร้างปรับปรุงจุดเกิดอุบัติเหตุย้อนไป 3 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 ถึง ปี พ.ศ. 2563 และหลังการดำเนินการก่อสร้างปรับปรุงแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุแล้วเสร็จ 3 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 ถึง ปี พ.ศ. 2566 ในช่วงแยกดังกล่าว ตาม Table 1

Table 1 Accidents data on Sahakorn 3 village crossway

No.	Date	Time	description	Level of lighting	Type vehicle	Cause of accident	public property	injury crash (person)	Death (person)
1	13/01/2018	2.50 AM	Direct route	Street lighting	Car	Speed limit	-	-	-
2	31/03/2018	3.00 AM	Direct route	Street lighting	Moter cycle	Speed limit	-	-	2
3	08/12/2019	3.30 AM.	Direct route	Street lighting	Car	Speed limit	Electric equipment Street lighting	-	-
4	29/12/2019	8.29 AM.	Direct route	Day light	Moter cycle	Speed limit	-	1	-
5	01/09/2020	9.30 AM	Direct route	Day light	Car	Speed limit	Electric equipment Street lighting	-	-
6	16/04/2020	1 PM	Direct route	Day light	other	Speed limit	Traffic sign	-	-
7	30/12/2020	8 PM	Direct route	Street lighting	Car	Speed limit	-	1	-

3. *นำข้อมูลมาวิเคราะห์หามูลค่าอุบัติเหตุ โดยคำนึงถึงมูลค่าตามเวลา (Time Value of Money)*

ข้อมูลมูลค่าอุบัติเหตุต่อราย จำแนกตามความรุนแรง ซึ่งได้ทำการสืบค้นจากโครงการศึกษา มูลค่าอุบัติเหตุแห่งประเทศไทย สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ปี 2564 มีรายละเอียดดังนี้

Table 2 Variable of accidents and accident cost by department of highways

Variable of accidents	Level of country (baht/accidents)	Bangkok (baht/accidents)	Out of Bangkok (baht/accidents)
Fatal injury crash	6,198,500	12,910,500	5,826,500
Semi-Fatal injury crash	6,764,000	14,370,500	6,940,000
Serous accident	181,000	379,000	169,500
Minor injury crash	43,650	194,900	33,350
Minimal injury crash	59,000	184,000	42,000

3. สืบค้นหามูลค่าราคาก่อสร้างของโครงการปรับปรุงแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุ

รายการประมาณราคาค่าก่อสร้าง โครงการงานอำนวยความปลอดภัยเพื่อป้องกัน และแก้ไขอุบัติเหตุทางถนน งานไฟสัญญาณจราจร ทางหลวงหมายเลข 306 ตอนควบคุม 0102 ตอน แคราย - คลองบ้านใหม่ ตอน 2ที่ กม.14+850 รายละเอียดดังแสดงใน Table 3 ซึ่งการประเมินค่าใช้จ่ายของโครงการประกอบด้วยค่าก่อสร้างและค่าควบคุมงานก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา ค่าจัดกรรมสิทธิ์ที่ดิน ค่าชดเชยสิ่งปลูกสร้าง ค่าใช้จ่ายตามมาตรการป้องกันและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม และค่าใช้จ่ายทางตรงอื่นๆ ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจนั้น ค่าใช้จ่ายของโครงการจะหมายถึงต้นทุนที่แท้จริงของทรัพยากรที่นำมาใช้ในการดำเนินโครงการ โดยหักค่าใช้จ่ายที่เป็นรายการเงินโอนต่างๆ เช่น ภาษีอากรขาเข้าและขาออก ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องมีการปรับมูลค่าทางการเงินให้เป็นมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยการนำมูลค่าทางการเงินคูณด้วยตัวปรับค่า (Conversion Factor) โดยใช้ตัวปรับค่าที่เคยมีการศึกษาไว้ของธนาคารโลก ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง) ประกอบด้วย ค่าก่อสร้างของโครงการซึ่งเกี่ยวพันกับรูปแบบและมาตรฐานการออกแบบของถนนโครงการ รวมถึงค่าก่อสร้างและค่าดำเนินการต่างๆ เพื่อบรรเทาหรือป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และค่าเผื่อขาด โดยทั่วไปคิดเป็น 10% ของค่าก่อสร้าง เนื่องจากราคาค่าก่อสร้างของโครงการประมาณการจากการออกแบบก่อสร้างเบื้องต้น

2. ค่าชดเชยอสังหาริมทรัพย์ ประกอบด้วย ค่าจัดกรรมสิทธิ์ที่ดิน และค่าชดเชยอาคารสิ่งปลูกสร้าง

3. ค่าบริการทางด้านวิศวกรรมค่าสำรวจออกแบบ โดยทั่วไปคิดเป็น 3.5% ของค่าก่อสร้าง และ ค่าควบคุมงานก่อสร้าง โดยทั่วไปคิดเป็น 3% ของค่าก่อสร้าง

4. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทาง

5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการลงทุนและมีผลต่อการวิเคราะห์โครงการ

Table 3 Bill of quantity Sahakorn 3 village crossway projects

Item	Description	Quantity		value	
		unit	amount	Per unit	summary
1	TRAFFIC SIGNALS (FIXED TIME CONTROL SYSTEM) WITH LED LAMP	EACH	1	1,090,093.00	1,090,093.00
2	TRAFFIC SIGNS (ALUMINIUM ALLOY THK. 2.0 MM.) HIGH INTENSITY GRADE TYPE	SQ.M.	1.12	4,140.00	4,636.80
3	TRAFFIC SIGNS (ALUMINIUM ALLOY THK. 2.0 MM.) HIGH INTENSITY GRADE TYPE	SQ.M.	3.16	4.350.00	13,746.00
4	TRAFFIC SIGNS (ALUMINIUM ALLOY THK. 2.0 MM.) HIGH INTENSITY GRADE TYPE	SQ.M.	0.52	4,880.00	2.537.60
5	STEEL COLUMN SIZE 7.50X7.50X0.32 CM.	M.	19.82	412.00	8,165.84
6	REMOVAL OF EXISTING 9.00 M. MOUNTING HEIGHT,DOUBLE BRACKET ROADWAY LIGHTING	EACH	1	6,802.00	6,802.00
7	THERMOPLASTIC PAINT	SQ.M.	735	386.00	283,710.00
8	CURB MARKING	SQ.M.	570	163.00	92,910.00
				Summary value	1,502,601.24
				Adjust value	- 2,601.24
				Summary cost	1,500,000.00

4. *รวมรวมข้อมูลอุบัติเหตุหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ*

หลังดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 ไปจนถึง ปี พ.ศ.2566(ปัจจุบัน) นั้น ไม่มีการเกิดอุบัติเหตุในช่วงดังกล่าว

5. *นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาผลตอบแทน*

ทำการประเมินผลตอบแทนด้านเศรษฐกิจ โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์ ในรูปของผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ ซึ่งโดยทั่วไปจะพิจารณาจากความเหมาะสมจากตัวชี้วัดต่างๆ ดังนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value)

มูลค่าปัจจุบัน หมายถึง ผลต่างระหว่างผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายในปีต่างๆ เมื่อคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันตลอดอายุโครงการ โดยใช้อัตราส่วนลด (Discount Rate) เพื่อประเมินเป็นมูลค่าปัจจุบัน ถ้าโครงการลงทุน มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกหรือมากกว่าศูนย์ แสดงว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสมในการลงทุน กล่าวคือ เมื่อลงทุนไปแล้วมีผลประโยชน์มากกว่าค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ

อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการ (Economic Internal Rate of Return: EIRR)

อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการ หมายถึง ค่าเสียโอกาสของเงินลงทุนหรืออัตราส่วนลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์และมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายเท่ากัน ถ้าค่าเสียโอกาสของเงินลงทุนที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับร้อยละ 12 ต่อปี ซึ่งเป็นอัตราที่เคยมีการศึกษาถึงต้นทุนของเงินลงทุนในประเทศไทยโดยธนาคารโลกและสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ดังนั้นโครงการลงทุนที่มีอัตราผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการมากกว่าร้อยละ 12 ต่อปี แสดงว่าโครงการนี้มี ความเหมาะสมในการลงทุน

อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit Cost Ratio: B/C Ratio)

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย หมายถึง อัตราส่วนของผลประโยชน์เมื่อคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน ต่อมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายของโครงการ โดยใช้อัตราส่วนลด (Discount Rate) เพื่อประเมินเป็นมูลค่าปัจจุบัน ถ้าโครงการลงทุนมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายมากกว่าหนึ่งแสดงว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสม ในการลงทุน

ผลการศึกษาวิจัย

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value)

มูลค่าอุบัติเหตุก่อนดำเนินการโครงการปรับปรุงแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุ 3 ปีตาม Table 4 Value of accident cost และหลังจากดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ 3 ปี คือ ปี พ.ศ. 2564 ถึง ปี พ.ศ. 2566 ไม่เกิดอุบัติเหตุ

การวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้ค่า Discount Rate เป็นค่าผลรวมของดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาล (2.75%) อัตราเงินเฟ้อพื้นฐาน (1.2%) และเผื่อความเสี่ยง (2%) ดังนั้น Discount Rate ที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้ = 5.95 % i = 5.95 %

Table 4 Value of accident cost

Year	Level of crash severity	Value of accident cost (bath/person)	Amount of person (person)	Value of accident cost (bath)	Summary accident cost (bath)
2561	Minimal injury crash	42,000.00	1	42,000.00	11,695,000.00
	Fatal injury crash	5,826,500.00	2	11,653,000.00	
2562	Minimal injury crash	42,000.00	1	42,000.00	75,500.00
	Minor injury crash	33,500.00	1	33,500.00	
2563	Minimal injury crash	42,000.00	1	42,000.00	117,500.00
	Minimal injury crash	42,000.00	1	42,000.00	
	Minor injury crash	33,500.00	1	33,500.00	
2564	-	-	-	-	-
2565	-	-	-	-	-
2566	-	-	-	-	-

Table 5 Net present estimate value

Year	Cost per year (baht)	Profit per year (baht)	Net cash flow (baht)	Present value	Cumulative
0	-	11,695,000.00	11,695,000.00	11,695,000.00	11,695,000.00
1	-	75,500.00	75,500.00	71,260.03	11,766,260.03
2	-	117,500.00	117,500.00	104,673.31	11,870,933.34
3	1,500,000.00	-	-1,500,000.00	-1,261,212.82	10,609,720.52
Net Present Valve				10,609,720.52	

มูลค่าสุทธิปัจจุบัน (Net Present Valve) ในปีที่ 3 เท่ากับ 10,609,720.52 บาท ซึ่งมีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการนี้เหมาะสมต่อการลงทุน

อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit cost Ratio : B/C Rate)

B/C = 11,888,000 หารด้วย 1,500,000

= 7.9253

อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการ (Economic Internal Rate of Rectum : EIRR)

เนื่องจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเป็นบวก และ Benefit Cost Ratio มากกว่าหนึ่ง เป็นเป็นการลงทุนที่เหมาะสมอัตราผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการมีค่ามากกว่ากว่า ร้อยละ 12 ต่อปี แสดงว่าโครงการนี้เหมาะสมในการลงทุน ในด้านการปรับปรุงแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุ

สรุป

จากผลการศึกษาการวิเคราะห์หามูลค่าความเสียหายจากการเกิดอุบัติเหตุ ก่อนดำเนินโครงการก่อสร้างปรับปรุงจุดเกิดอุบัติเหตุย้อนหลัง 3 ปี และหลังดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ 3 ปี การหามูลค่าราคาค่าก่อสร้างปรังปรุงของโครงการฯ การวิเคราะห์หาผลตอบแทนของโครงการ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการ (Economic Internal Rate of Return : EIRR) อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit Cost Ratio: B/C Ratio) ซึ่งสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

ปัญหาการเกิดอุบัติเหตุจากการตัดกระแสจราจรเพื่อเข้าซอยหมู่บ้านสหกรณ์ 3 ทางฝ่ายสำรวจออกแบบสำนักงานทางหลวงที่ 13 (กรุงเทพ) ได้ทำการออกแบบการแก้ไขปัญหาโดยใช้สัญญาณไฟในการแก้ไขปัญหาอุบัติเหตุ ที่บริเวณดังกล่าว นั้น จากการประมาณราคาค่าก่อสร้างมีมูลค่า 1,500,000 บาท (หนึ่งล้านห้าแสนบาทถ้วน) และได้ดำเนินการแล้วเสร็จ ในปี พ.ศ. 2564 จากข้อมูลอุบัติเหตุ ก่อนดำเนินการปรับปรุงก่อสร้างโครงการแก้ไขจุดเกิดอุบัติเหตุ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 ไปจนถึง ปี พ.ศ. 2563 มีการเกิดอุบัติเหตุ 7 ครั้ง มีผู้เสียชีวิตจำนวน 2 ราย มีผู้บาดเจ็บเล็กน้อยจำนวน 2 ราย และมีเพียงทรัพย์สินเสียหายจำนวน 4 ราย และหลังดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 ไปจนถึง ปี พ.ศ. 2566 (ปัจจุบัน) นั้น ไม่มีการเกิดอุบัติเหตุในช่วงดังกล่าว

ผลการวิเคราะห์หาผลตอบแทน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) มีค่าเฉลี่ยเป็นบวกหรือมีค่ามากกว่าศูนย์ อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit Cost Ratio : B/C Ratio) มากกว่า 1 และอัตราค่าตอบแทนทางเศรษฐกิจ (Economic Internal Rate of Return: EIRR) มากกว่า 12 % ต่อปีจึงสามารถสรุปจากผลการประเมินผลโครงการงานอำนวยความปลอดภัยเพื่อป้องกัน และแก้ไขอุบัติเหตุทางถนนงานไฟสัญญาณจราจร ทางหลวงหมายเลข 306 ตอนควบคุม 0102 ตอน แคราย - คลองบ้านใหม่ ตอน 2 ที่ กม.14+850 ตำบลบางพูด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ปรากฏว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุนในการแก้ไขปรับปรุงจุดเกิดอุบัติเหตุ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กรมทางหลวง สำนักงานทางหลวงที่ 13 (กรุงเทพ) แขวงทางหลวงนนทบุรี หมวดทางหลวงนนทบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณอาจารย์วัชรินทร์ วิทยกุลและคณะบุคลากรที่เกี่ยวข้องสำหรับคำแนะนำในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งผู้สนับสนุนทั้งหมดที่มีส่วนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จบรรลุวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

กรมการขนส่งทางบก. 2564. กรมการขนส่งทางบก เผยสถิติการจดทะเบียนรถใหม่ป้ายแดงทั่วประเทศตลอดปี 2563 (เดือนมกราคม – ธันวาคม 2563) รวม 2,638,466 คัน ลดลงเฉลี่ย 14% เมื่อเทียบกับสถิติรถจดทะเบียนใหม่ย้อนหลัง 3 ปี ขณะที่สถิติรถจดทะเบียนสะสมปัจจุบันรวมแล้วกว่า 41 ล้านคัน รถจักรยานยนต์ครองสถิติสูงสุดกว่า 21 ล้านคัน รถยนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 คนกว่า 10 ล้านคัน. https://www.dlt.go.th/th/public-news/view.php?_did=2806, 30 เมษายน 2564.

ภูวดล พลศรีประดิษฐ์, มะลิ โพธิพิมพ์. 2561. การจัดการจุดเสี่ยงการเกิดอุบัติเหตุทางถนนชุมชนเขตเมือง: กรณีศึกษาชุมชนโคราชคฤหาสน์ทอง ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา. วารสารวิจัยและพัฒนาด้านสุขภาพ. 4: 66–76.

เฉลิมพล ไวทยางกูร. 2563. อุบัติเหตุทางถนนของไทย ในมุมมองต่างประเทศ.กรุงเทพธุรกิจ. https://www.bangkokbiznews.com/blog/detail/650575, 30 เมษายน 2564.

ศูนย์อำนวยการความปลอดภัยทางถนน. 2564. สถิติอุบัติเหตุทางถนนช่วงเทศกาลสงกรานต์ พ.ศ. 2564. http://roadsafety.disaster.go.th/inner.roadsafety-5.196/download/menu_7091/, 20 เมษายน 2564.

ศูนย์ข้อมูลกลางด้านการบาดเจ็บ กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. 2564. สถานการณ์การเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนของประเทศไทย.https://dip.ddc.moph.go.th/new/%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3/3base_status_new, 20 เมษายน 2564.

ความพึงพอใจต่อโครงสร้างพื้นฐานและบทบาทของโครงสร้างพื้นฐานในการพัฒนาอย่างยั่งยืน มุมมองของประชาชนในกรุงเทพมหานคร

Satisfaction and role of infrastructure in driving SDGs: Perception of Bangkokian

ศักดิ์สิทธิ์ งามวงษ์, **ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**

Saksit Ngamwong, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: saksit.ng@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สำรวจมุมมองของประชาชนในกรุงเทพมหานครเกี่ยวกับความพึงพอใจที่มีต่อโครงสร้างพื้นฐานและบทบาทของโครงสร้างพื้นฐานในการขับเคลื่อนการพัฒนาอย่างยั่งยืนในกรุงเทพมหานคร โดยเก็บรวบรวมข้อมูลผ่านแบบสอบถาม 156 ชุด และวิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา พบว่าโครงสร้างพื้นฐานในกรุงเทพอยู่ในเกณฑ์ที่ประชาชนค่อนข้างพอใจคือรถไฟฟ้า เครื่องข่ายสื่อสารโทรคมนาคม ตลาด โครงข่ายถนน การศึกษาภาครัฐ และสวนสาธารณะ ส่วนที่ไม่พอใจได้แก่ ทางเท้าและทางจักรยาน ระบบเตือนสาธารณภัยที่ทันเหตุการณ์ รวมถึงสายไฟ-สายสื่อสารโทรคมนาคมที่ไม่มีการจัดระเบียบ และประชาชนยังเห็นว่าโครงสร้างพื้นฐานมีบทบาทในการขับเคลื่อนเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนไม่ทางตรงก็ทางอ้อมเกือบทุกเป้าหมายซึ่งส่วนใหญ่สอดคล้องกับในต่างประเทศ แต่ยังเห็นว่ามีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนเป้าหมายที่ 3 การมีสุขภาพและสวัสดิภาพดีอีกด้วย

คำสำคัญ: กรุงเทพมหานครและปริมณฑล, โครงสร้างพื้นฐาน, เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

Abstract

This study explores Bangkokian’s perception about satisfaction towards infrastructure and its role in driving sustainable development in Bangkok. Data was collected through 156 questionnaires and analyzed by descriptive statistics. It was found that sky train and subway, telecommunication network, shopping centers, roads, public education and green space and public park are acceptable. However, they were not satisfied with pathways and bikeways, public disaster warning system and unorganized power and telecommunication lines. As for the role of infrastructure in driving Sustainable Development Goals, the result was mostly in line with other countries. However, Bangkokians feel that infrastructure has significant role in driving SDG 3 Good Health and Well-being as well.

Keywords: Bangkok and vicinity, Infrastructure, Sustainable development goals

คำนำ

โครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) หมายถึง “โครงสร้างและสิ่งอำนวยความสะดวกทางกายภาพและองค์กรขั้นพื้นฐาน เช่น อาคาร ถนน แหล่งจ่ายไฟ เป็นต้น ที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานของสังคมหรือองค์กร” (Oxford University Press, 2022) จากผลงานวิจัย Scott et al. (2019) พบว่าโครงสร้างพื้นฐานมีอิทธิพลโดยตรงหรือโดยอ้อมต่อการบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน โครงสร้างพื้นฐานมีบทบาทเป็นไปได้ที่ช่วยให้บรรลุเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยการก่อสร้างหรือปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่สามารถเป็นตัวช่วยให้บรรลุ SDGs ได้โดยตรง เช่น เป้าหมายการพัฒนาที่ 6 จุดประสงค์ย่อยที่ 6.1 บรรลุเป้าหมายการให้ทุกคนเข้าถึงน้ำดื่มที่ปลอดภัยและมีราคาที่สามารถซื้อหาได้ ภายในปี พ.ศ. 2573 จากงานวิจัยของ Sherif (2019) ได้สรุปว่า “การบรรลุเป้าหมายนี้จำเป็นต้องมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านน้ำดื่ม รวมถึงการพัฒนาเครือข่ายน้ำดื่มโรงงานกรองน้ำ โรงกรองน้ำทะเล และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ” การเลือกที่จะสร้างหรือจะปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานใด ให้บรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนเป็นส่วนสำคัญ ในส่วนความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างพื้นฐานกับเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนของต่างประเทศ ผลการงานวิจัย Fei et al. (2021) ได้ผลออกมาว่า เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนทั้ง 17 เป้าหมายที่ได้รับมผลกระทบจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง 10 อันดับ ได้แก่ อันดับ 1. SDG 11, 2. SDG 13, 3. SDG 6, 4. SDG 12, 5. SDG 9, 6. SDG 8, 7. SDG 15, 8. SDG 7, 9. SDG 3 และอันดับ 10. SDG 5 และมีความคิดเห็นจากผู้เชียวชาญเกี่ยวกับอุสาหกรรมก่อสร้างและเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

ประเทศไทยอยู่ลำดับที่ 44 จาก 193 ประเทศ จากการจัดลำดับผลการดำเนินงานโดยรวมของรัฐสมาชิกสหประชาชาติผล ณ สิ้นปี พ.ศ. 2565 (Sustainable Development Report 2022) การให้ความสำคัญของการพัฒนาอย่างยั่งยืนในประเทศไทยได้ดำเนินการมาหลายปี โดยมีหลักการที่ปฏิบัติและได้ปรากฏอยู่ตลอดมา นั่นคือ ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งเป็นหลักสำคัญในการพัฒนาอย่างยั่งยืนของประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยได้มียุทธศาสตร์ 20 โดยเป็นแผนหลักระดับที่ 1 ของประเทศไทยและมีแผนระดับที่ 2 ออกมารองรับ ซึ่งมีพื้นฐานจากยุทธศาสตร์ชาติและจาก SDGs จากแผนระดับที่ 2 ก็จะมีแผนระดับที่ 3 เป็นแผนที่จัดทำขึ้นโดยหน่วยงานที่ได้รับผิดชอบเรื่องต่างๆ ในประเทศ นำหลักการไปสร้างแผนปฏิบัติการเพื่อให้เกิดการขับเคลื่อนต่อไป ดั่งเช่น แผนพัฒนากรุงเทพมหานคร 20 ปี ซึ่งมีโครงการก่อสร้าง โครงสร้างพื้นฐานต่างๆเป็นโครงการลงทุนหลัก (สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล กรุงเทพมหานคร, 2556)

โดยงานวิจัยฉบับนี้ศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อโครงสร้างพื้นฐาน ในกรุงเทพมหานครอยู่ในเกณฑ์ที่ดีระดับใด โครงสร้างพื้นฐานใดควรต้องได้รับความสนใจเพื่อปรับปรุงให้ดีขึ้นและบทบาทของโครงสร้างพื้นฐานในส่วนเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจโครงสร้างพื้นฐานในกรุงเทพมหานครผ่านความพึงพอใจจากมุมมองของคนกรุงเทพมหานครและบทบาทของโครงสร้างพื้นฐานที่จะมีผลต่อเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน จากการวิจัยที่ได้นำเสนอมาจะทำให้ สามารถช่วยยืนยันหรือเพิ่มมุมมองของภาครัฐในการจัดทำโครงการที่เกี่ยวกับโครงสร้างพื้นฐานได้ดีมากขึ้นและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิธีการ

การสัมภาษณ์เชิงลึก

ขั้นตอนการสัมภาษณ์เชิงลึกเริ่มหลังจากที่มีการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับอุตสาหกรรมการก่อสร้างสามารถช่วยทำให้ SDGs นั้นบรรลุสำเร็จ ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลงานวิจัยจากต่างประเทศ และเพื่อที่จะสามารถนำมาประกอบกับสถานการณ์ในประเทศ จึงได้มีการจัดทำแบบคู่มือการสัมภาษณ์เพื่อใช้ในการสัมภาษณ์เชิงลึก กับผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการก่อสร้างและ SDGs โดยจะสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญว่า โครงสร้าง

พื้นฐานสามารถช่วยให้บรรลุ SDGs ทั้ง 17 ข้ออย่างไร การสัมภาษณ์เชิงลึกนี้มีผู้ร่วมการสัมภาษณ์ 4 ท่าน ผู้ให้สัมภาษณ์ประกอบด้วย : Interviewee A เชี่ยวชาญด้าน วิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานจากองค์กร UNDP, Interviewee B เชี่ยวชาญด้าน วิศวกรรมขนส่ง , Interviewee C เชี่ยวชาญด้าน สังคมและการพัฒนามนุษย์จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ Interviewee D เชี่ยวชาญด้าน วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบสอบถาม

หลังจากทำการทบทวนวรรณกรรมและการสัมภาษณ์เชิงลึก ได้ทำการสร้างแบบสอบถามเพื่อสำรวจและรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณ แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการสอบถามเกี่ยวข้อมูลทั่วไป ส่วนที่สอง เป็นการสอบถามความความพึงพอใจที่มีต่อต่อโครงสร้างพื้นฐานในชีวิตประจำวันระดับใด ส่วนที่สาม เป็นการสอบถามความคิดเห็นว่า ถ้าเราทำการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานให้ได้ดีขึ้นหรือเพิ่มโครงสร้างพื้นฐานในส่วนที่ไม่มี ให้มีขึ้นมาผู้ตอบแบบสอบถามจะมีคิดเห็นการกระทำเหล่านี้จะสามารถช่วยให้ SDGs ทั้ง 17 ข้อ ข้อใดดีขึ้นบ้าง ผู้ตอบแบบสอบถามถูกขอให้จัดอันดับในระดับ Likert 0 ถึง 5 (โดยที่ 0 = ไม่เกี่ยวข้อง,ไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน 1 = ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง 2 = ไม่เห็นด้วย 3 = ไม่เห็นด้วยและไม่เห็นด้วย 4 = เห็นด้วย 5 = เห็นด้วยอย่างยิ่ง)

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเก็บข้อมูลแบบสอบถามจะถูกนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรม SPSS version 26 และวิเคราะห์แต่ละส่วนแตกต่างกัน ส่วนแรกจะวิเคราะห์ข้อมูลภูมิหลังทางประชากรของผู้ตอบแบบสอบถามโดยใช้ค่าร้อยละ ส่วนที่สองและส่วนที่สาม ขั้นแรกจะวิเคราะห์ข้อมูลความน่าเชื่อถือของข้อมูลโดยใช้ วิธีการทดสอบ Cronbach's alpha โดยจะต้องมีค่าเกิน 0.7 จึงจะถือว่าชุดข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ Santos (1999)

แบบสอบถามที่ได้ทั้งเก็บสำรวจและนำมาวิเคราะห์ผลมีทั้งหมด 156 ชุด โดยแบ่งเป็น ผู้ชาย 46% ผู้หญิง 54% ระดับการศึกษาต่ำกว่าปริญญาตรี 18% มากกว่าหรือเท่ากับปริญญาตรี 82% รายได้ต่อเดือนต่ำกว่า 25,000 บาท 51% รายได้มากกว่า 25,000 บาท 49% แบบสอบถามส่วนที่สอง มีตัวแปรทั้งหมด 31 ตัวแปร ได้ ค่า Cronbach's alpha เท่ากับ 0.952 แบบสอบถามส่วนที่สาม มีตัวแปร ทั้งหมด 17 ตัวแปรได้ค่า Cronbach's alpha เท่ากับ 0.921 ซึ่งทั้งสองส่วนนั้น ได้ค่า Cronbach's alpha มากกว่า 0.7 จึงถือว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือสูง

หลังจากทำการทดสอบค่าความน่าเชื่อถือในข้างต้น จะมีการใช้วิธีเชิงพรรณนาในการหาค่าเฉลี่ยของความพึงพอใจของโครงสร้างพื้นฐาน จะมีการจัดลำดับของโครงสร้างพื้นฐานที่ได้ค่าความพึงพอใจสูงไปหาค่าความพึงพอใจที่ต่ำในภาพรวมในกรุงเทพมหานคร และมีการจัดลำดับโครงสร้างพื้นฐานในกลุ่มประชากรที่มีค่ารายได้ต่อเดือนน้อยกว่า 25,000 บาท และ รายได้ต่อเดือนมากกว่า 25,000 บาท แสดงดัง Table 1

ผลลัพธ์และอภิปรายผล

ความพึงพอใจของประชาชนต่อโครงสร้างพื้นฐานในกรุงเทพมหานคร

จาก Table 1, มีโครงสร้างพื้นฐานที่ได้ระดับค่าเฉลี่ยความพึงพอใจระดับที่ 3.51–4.00 นั้น 1 รายการเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่โดยรวมมองว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ ค่อนข้างพอใจ นั้นคือ รถไฟฟ้า ถึงแม้จะได้อันดับที่ 1 ก็ยังมีปัญหาใหญ่ในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่อาจจะมีราคาที่แพงเกินไปสำหรับการให้ประชาชนทุกคนสามารถเข้าถึงและใช้ได้อย่างสะดวก ถัดไปโครงพื้นฐานที่อยู่ในระดับ 3.01–3.50 คือ พอใจ 5 รายการ ได้แก่ เครื่องข่ายสื่อสารโทรคมนาคม ตลาด โครงข่ายถนนการศึกษาภาครัฐ และสวนสาธารณะตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้ส่วนใหญ่มีมุมมองไปในทิศทางเดียวกัน

Table 1 Summary analysis of Infrastructure total and group lower-over 25,000 baht

Infrastructure	Total			Lower ฿25,000		Over ฿25,000		Rank dif. bet. groups
	$\bar{X}$	SD	rank	$\bar{X}$	rank	$\bar{X}$	rank	
Sky Train	3.69	1.03	1	3.81	1	3.55	1	0
Network System	3.26	1.30	2	3.19	5	3.33	2	3
Community shopping center	3.24	1.21	3	3.46	2	3.00	4	-2
Large road	3.21	1.19	4	3.28	3	3.13	3	0
Public educational institutions	3.03	1.10	5	3.26	4	2.79	7	-3
Green spaces, and parks	3.01	1.45	6	3.13	6	2.88	5	1
Water management system	2.94	1.35	7	3.00	7	2.88	6	1
Pedestrian bridge	2.81	1.24	8	2.91	8	2.71	8	0
Minibus	2.71	1.26	9	2.90	9	2.51	12	-3
Sport field, activity field	2.71	1.53	10	2.83	12	2.59	10	2
Garbage and Waste Disposal	2.63	1.31	11	2.66	18	2.59	9	9
Public bus	2.60	1.25	12	2.90	10	2.28	16	-6
Electric light at night	2.59	1.26	13	2.63	21	2.55	11	10
Crosswalk, road crossing signal	2.57	1.32	14	2.74	15	2.39	13	2
Common area for the community	2.56	1.50	15	2.79	13	2.32	15	-2
Local roads	2.54	1.12	16	2.75	14	2.33	14	0
State medical facility	2.51	1.19	17	2.84	11	2.16	20	-9
Life and property safety	2.44	1.30	18	2.70	17	2.17	19	-2
Community news notification	2.42	1.45	19	2.70	16	2.12	21	-5
Eua Arthorn House	2.37	1.41	20	2.50	26	2.22	18	8
Train	2.35	1.40	21	2.63	22	2.07	22	0
Natural water quality	2.32	1.31	22	2.66	19	1.96	25	-6
Library, community library	2.29	1.54	23	2.61	23	1.96	24	-1
Passenger boat	2.26	1.52	24	2.64	20	1.87	27	-7
Drain	2.24	1.22	25	2.54	25	1.92	26	-1
Disaster Prevention	2.21	1.38	26	2.20	28	2.22	17	11
Disabled and elderly people	2.19	1.37	27	2.59	24	1.78	29	-5
Pathway	2.14	1.20	28	2.25	27	2.03	23	4
Power lines	1.96	1.07	29	2.08	29	1.83	28	1
Public disaster warning system	1.79	1.45	30	1.89	31	1.68	30	1
Bikeway	1.69	1.32	31	1.96	30	1.39	31	-1

ในกลุ่มค่าพึงพอใจที่อยู่ระดับ 2.51–3.00 เกณฑ์ที่พอรับได้ ในมุมมองภาพรวมมี โครงสร้างพื้นฐานทั้งหมด 11 รายการ มี 4 รายการใน 11 นั้น ที่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดในมุมมองของกลุ่มคนที่มีรายได้น้อยกับรายได้มาก กว่า 25,000 บาท นั่นก็คือ รายการแรก ไฟฟ้าส่องสว่างในเวลากลางคืน มีค่าความแตกต่างของลำดับระหว่างกลุ่ม ถึง 10 หน่วย โดยกลุ่มที่มีรายได้มากนั้น มองว่า จัดให้อยู่ในอันดับที่ดีกว่า นั่นอาจจะเพราะ เรื่องทางเลือกในการเดินทาง คนที่มีรายได้น้อยการเลือกวิธีเดินทางนั้นอาจจะมีไม่มากนัก จึงทำให้เห็นปัญหาของโครงสร้างพื้นฐานนี้ ได้ชัดเจนกว่า และอีกหนึ่งเรื่องคือเรื่องของสภาพแวดล้อมของที่พักอาศัยในชุมชนของกลุ่มมีรายได้มากมีคุณภาพที่ดีกว่ากลุ่มคนที่มีรายได้น้อย และเรื่องนี้อาจจะเป็นเหตุทำให้ โครงสร้างพื้นฐานรายการที่สอง ระบบกำจัดขยะและของเสีย มีค่าความแตกต่างของ

ลำดับระหว่างกลุ่ม เท่ากับ 9 หน่วย ซึ่งกลุ่มรายได้มาก ให้อันดับที่ดีกว่ากลุ่มคนที่รายได้น้อยเช่นกัน รายการที่สาม รถโดยสารสาธารณะ และรายการที่สี่ สถานรักษาพยาบาลของรัฐ ซึ่งมีค่าความแตกต่างของลำดับระหว่างกลุ่ม เท่ากับ -6 และ -9 ตามลำดับ โครงสร้างพื้นฐานสองรายการนี้ กลุ่มคนที่มีรายได้น้อย ให้อันดับที่ดีกว่า กลุ่มคนมีรายได้มาก เพราะในมุมมองของกลุ่มคนที่มีรายได้มาก มีความสามารถในการเลือกใช้บริการที่มากกว่า เช่น การเลือกใช้ การเดินทางที่สะดวกกว่า รถโดยสารสาธารณะ ที่มีการรอและหยุดรับส่งผู้โดยสารและเรื่องความปลอดภัย การเลือกใช้สถานรักษาพยาบาลของเอกชนที่มีความสะดวกกว่า รวดเร็วกว่าแต่ต้องจ่ายค่ารักษาที่มากกว่า ซึ่งความแตกต่างนี้อาจจะเกิดจากกลุ่มคนที่มีรายได้มากนั้น มีมุมมองต่อว่า โครงสร้างพื้นฐาน ยังดีไม่เพียงพอสำหรับพวกเขาและมีทางเลือกอื่นที่ดีกว่า

ในกลุ่มค่าพึงพอใจที่อยู่ระดับ 2.01–2.50 เกณฑ์ที่ เริ่มไม่พอใจ ในมุมมองความคิดเห็นภาพรวมมี โครงสร้างพื้นฐานทั้งหมด 11 รายกายเช่นกัน และมี 4 รายการอีกเช่นกันที่มีมุมมองที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มคนรายได้น้อยและมาก โดยกลุ่มที่รายได้มาก ให้อันดับที่ดีกว่า รายการแรก โครงสร้างพื้นฐานที่จัดการการป้องกันสาธารณภัยเช่น ปะปาหัวแดง, เขื่อนตามแนวแม่น้ำลำคลอง, การจัดการหลังจากเกิดเหตุสาธารณภัยต่างๆ อย่างเช่นเรื่องที่มีปัญหามากที่สุดคือ น้ำท่วม โดยมีค่าความแตกต่างของลำดับระหว่างกลุ่ม มากสุดอยู่ที่ 11 หน่วย อาจจะเป็นเพราะคนมีรายได้มากกว่า มีสภาพแวดล้อมที่ดีกว่า โครงสร้างพื้นฐานมีความพร้อมที่มากกว่าทำให้มีความคิดเห็นว่าไม่เป็นปัญหา รายการที่สอง โครงบ้านเอื้ออาทร บ้านพักที่อยู่อาศัยราคาถูก มีค่าความแตกต่างของลำดับระหว่างกลุ่มอยู่ที่ 8 หน่วย ในส่วนนี้คนที่มีรายได้มาก อาจจะไม่เคยได้ใช้จริง ไม่เคยอยู่อาศัยจริง จึงอาจมีมุมมองความคิดเห็นแบบบุคคลที่ สาม อย่างเช่น ก็น่าจะดี, น่าอยู่อาศัยดี ส่วนผู้ที่มีรายน้อย อาจจะเป็นผู้ที่เคยอยู่อาศัย เคยสัมผัสประสบการณ์หรือเคยรับรู้เกี่ยวความเป็นอยู่อาศัยจริง ว่าที่ตั้งของที่พักอาศัยเหล่านั้นก็ไม่ได้มีความสะดวกเท่าใดนักสำหรับการใช้ชีวิตประจำวัน ดั่งเช่นเรื่อง การเข้าและออกจากสถานที่พักอาศัย หรือสภาพแวดล้อมของคนโดยรอบที่อยู่อาศัยอยู่ที่เดียวกัน ถัดไปรายการโครงสร้างพื้นฐานของกลุ่มที่มีรายได้น้อยให้อันดับที่ดีกว่า รายการที่สาม เรือโดยสาร มีค่าความแตกต่างของลำดับระหว่างกลุ่มเท่ากับ -7 หน่วย โครงสร้างพื้นฐานนี้มีมุมมองความคิดเห็นใกล้เคียงกับ รถโดยสารสาธารณะ ที่กลุ่มคนมีรายได้มาก มีทางเลือกในการเดินทางที่มากกว่า จึงมีมุมมองความคิดเห็นว่าเรือโดยสารยังไม่ดีเพียงพอ ตัวอย่างเช่น เรื่องความสะดวกและความปลอดภัย เมื่อเทียบกับการเดินทางรูปแบบอื่นๆ และรายการที่ 4 ระบบจัดการคุณภาพแหล่งน้ำธรรมชาติ มีค่าความแตกต่างของลำดับระหว่างกลุ่มเท่ากับ -6 หน่วย ในส่วนนี้กลุ่มที่มีรายได้มากกว่า มีความต้องการ คุณภาพชีวิตที่ดี ทำให้มุมมองความคิดเห็นสำหรับคุณภาพแหล่งน้ำธรรมชาติในกรุงเทพมหานครนั้นยังดีไม่พอสำหรับกลุ่มคนพวกเขา

ในส่วนสุดท้ายมีโครงสร้างพื้นฐานทีอยู่ในเกณฑ์ที่ ไม่พอใจ นั้น 3 รายการได้แก่ สายไฟ-สายสื่อสารโทรคมนาคมที่เป็นทิวทัศน์ไม่น่าชมน่ามองและความเป็นกังวล ความกลัว ต่ออุบัติเหตุที่จะเกิดจากสายไฟ สายสื่อสารโทรคมนาคมที่ไม่เป็นระเบียบ อันดับรองสุดท้าย ระบบเตือนสาธารณภัยที่ทันเหตุการณ์ ในปัจจุบันการแจ้งเตือนภัยในประเทศไทยของเราก็มีอย่างเช่น การส่งข้อความเตือนทางโทรศัพท์ แต่หลายคนส่วนใหญ่ก็มีมุมมองว่า ยังไม่มีประสิทธิภาพที่เพียงพอสำหรับการแจ้งเตือนข่าวสาร สำหรับยุคสมัยที่เทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามากขึ้น การมีระบบการแจ้งเตือนที่มีประสิทธิภาพทันสมัยและสะดวกก็ถือว่าเป็นความต้องการของคนที่อยากจะอยู่อาศัยในสังคมอย่างไม่ประมาทปลอดภัย อันดับสุดท้ายค่าเฉลี่ยความพึงพอใจน้อยที่สุด คือ ทางจักรยาน ปัญหาของทางจักรยานนั้นก็มีเรื่องโต้แย้ง สนทนาในสังคมในปัจจุบันอย่างแพร่หลาย ทั้งที่ว่าประเทศไทยนั้นไม่เอื้อต่อการปั่นจักรยาน ทั้งปัญหาด้านสภาพถนน สิ่งกีดขว้างที่เกิดจาก วิถีชาวบ้านวิถีชุมชนที่ตั้งร้านขายของ และที่สำคัญเรื่องการที่ บางพื้นที่ ยังไม่ได้มีโครงสร้างพื้นฐานอย่าง ทางจักรยาน

เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนกับการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐาน

จาก Table 2, ถ้าปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานจะช่วยเหลือ SDGs ใดมากที่สุดบ้าง มี SDGs ค่าเฉลี่ยเกิน 4.00 7 อันดับ ได้แก่ SDG 11 เป็นอับดับแรกสุดว่า ถ้าปรับปรุงโครงสร้างสร้างให้ดีขึ้น จะสามารถช่วยให้กรุงเทพมหานครเป็นเมืองที่น่าอยู่ เหมาะในการอยู่อาศัยสำหรับทุกคน ในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 11 บางท่านกล่าวไว้ว่า: “การเข้าถึงระบบคมนาคมที่มีความสะดวก ความปลอดภัยในเป็นสิ่งที่หลายคนต้องการในปัจจุบัน” Interviewee C ในกรุงเทพมหานครนั้นยังมีโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นปัญหาอย่างเช่น ทางเท้า ที่จะได้รับคิดเห็นของประชาชนมาตลอดว่าอยากได้ทางเท้าที่ปลอดภัยสำหรับใช้งานและอีกหนึ่งปัญหาที่อยู่มาตลอดเช่นกันคือ รถโดยสารสาธารณะ การมีรถโดยสารสาธารณะที่ทันสมัย สะดวก และปลอดภัยก็ถือเป็นเป้าหมายที่ควรให้ความสำคัญ

SDG 9 เป็นอันดับที่สอง ย้อนกับไปในแบบสอบถามส่วนที่สอง โครงสร้างพื้นฐานในกรุงเทพมหานครนั้นยังไม่ดีนัก เรายังต้องการโครงสร้างพื้นฐานที่ดีที่ได้รับการปรับปรุงให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นพร้อมใช้งานตลอดเวลาเพื่อรองรับการเหตุการณ์และสถานการณ์ต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 9 บางท่านกล่าวไว้ว่า: “โครงสร้างพื้นฐานต้องมีการพัฒนาให้มีคุณภาพที่มากขึ้น” Interviewee A , “ควรที่จะให้ทุกคนได้เข้าถึงโครงสร้างพื้นด้านเทคโนโลยีให้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มผู้ด้อยโอกาส” interviewee C

SDG 6 จัดเป็นอันดับ ที่สาม เป็นสิ่งที่บอกว่าโครงสร้างพื้นฐานสามารถสนับสนุนการสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับน้ำสะอาดและสุขอนามัยที่ดีได้ (Fei et al, 2021) ในประเทศไทย ประชาชนส่วนใหญ่สามารถเข้าถึงน้ำดื่มน้ำใช้ที่มีความสะอาดหมดแล้ว ดังในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 6 บางท่านกล่าวไว้ว่า: “ในปัจจุบัน คนในกรุงเทพมหานครส่วนใหญ่สามารถเข้าถึง น้ำที่สะอาดและปลอดภัยแล้ว” Interviewee C แต่ในไทยยังมีปัญหาเรื่องน้ำประปาดื่มได้ที่ยังไม่ชัดเจน ทั้งคุณภาพของน้ำ ทั้งความสามารถในการส่งน้ำจ่ายน้ำ อุปกรณ์ในการจำหน่ายขนส่งน้ำเช่นท่อน้ำประปา แล้วก็การสร้างความเชื่อมั่นว่าน้ำประปาสามารถดื่มได้ทุกที่อย่างแท้จริง

SDG 3 คือ จัดเป็นอันดับ ที่สี่ การมีสุขภาพที่ดีเป็นนั้นเป้าหมายส่วนใหญ่ของทุกคน ในปัจจุบันมีการดูแลสุขภาพกันมากขึ้น เช่นการรับประธานอาหารและการออกกำลังกาย แต่หนึ่งสิ่งที่สำคัญคือการมีสิ่งแวดล้อมที่ดี มีโครงสร้างพื้นฐานที่ดี ที่ได้มาตรฐาน ก็สามารถช่วยลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุที่คาดไม่ถึงได้ ในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 3 บางท่านกล่าวไว้ว่า : “การมีสาธารณูปโภค ระบบการรักษาที่ดีเป็นส่วนช่วยในการลดโอกาสการเสียชีวิต โครงสร้างพื้นฐานด้านการคมนาคมที่มีคุณภาพช่วยลดการเกิดอุบัติเหตุ” Interviewee A , “ในปัจจุบันถนนสายรองใน กทม. ยังมีหลายเส้นที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงที่ดีพอสำหรับให้ประชาชนได้ใช้งานถนนที่มี ความสะดวก, ปลอดภัย” Interviewee B

SDG 4 จัดเป็นอันดับ ที่ห้า การมีสิ่งอำนวยความสะดวกที่พร้อมและมีประสิทธิภาพอาจจะสามารถช่วยให้เราทุกคนสามารถเข้าถึงสื่อการเรียน การศึกษาได้สะดวกและง่ายมากยิ่งขึ้น ดังในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 4 บางท่านกล่าวไว้ว่า: “เราไม่สามารถสร้างโรงเรียนที่มีคุณภาพไว้ใกล้บ้านประชาชนทุกคนได้ ฉะนั้นจุดสำคัญ คือ การเดินทาง” Interviewee B “การมีห้องสมุดชุมชน หรือ ส่วนกลางชุมชนที่มี อินเทอร์เน็ต อุปกรณ์ไอที ที่พร้อมจะเป็นส่วนช่วยให้เด็ก บุคคลทั่วไป หรือผู้ที่ด้อยโอกาส ได้รับโอกาสในการเรียนรู้ได้เพิ่มมากขึ้น” Interviewee C

SDG 8 จัดเป็นอันดับ ที่หก การที่มีสิ่งอำนวยหรือโครงสร้างพื้นฐานที่ดีอาจจะสามารถช่วยกระตุ้น การเดินทางการท่องเที่ยวให้มากขึ้น สร้างเศรษฐกิจให้ดีขึ้น ทำให้มีการจ้างงานเพิ่มขึ้นตามไป ดังในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 8 บางท่านกล่าวไว้ว่า: “การที่ประเทศเรามีโครงสร้างพื้นฐานหรือสิ่งอำนวยความสะดวกที่ครบหรือพร้อม จะเป็นสิ่งที่ช่วยให้ต่างชาติ คิดมาลงทุนในประเทศของเรา” Interviewee C

Table 2 Summary analysis of all SDGs total and group lower-over 25,000 baht

Goals Description	Total			Lower ฿25,000		Over ฿25,000		Rank dif. bet. groups
	$\bar{X}$	SD	rank	$\bar{X}$	rank	$\bar{X}$	rank	
SDG 11 Sustainable cities and communities	4.41	0.82	1	4.40	1	4.42	1	0
SDG 9 Industry, innovation, and infrastructure	4.26	0.79	2	4.28	3	4.25	2	1
SDG 6 Clean water and sanitation	4.25	0.77	3	4.30	2	4.20	4	-2
SDG 3 Good health and well-being	4.19	0.86	4	4.18	4	4.21	3	1
SDG 4 Quality education	4.15	0.88	5	4.14	5	4.16	5	0
SDG 8 Decent work and economic growth	4.09	0.94	6	4.09	7	4.09	6	1
SDG 7 Affordable and clean energy	4.08	0.98	7	4.10	6	4.05	7	-1
SDG 13 Climate action	3.92	0.96	8	4.00	8	3.83	9	-1
SDG 10 Reduced inequalities	3.91	1.07	9	3.91	10	3.91	8	2
SDG 17 Partnership for goals	3.83	1.20	10	3.96	9	3.68	10	-1
SDG 15 Life on land (biodiversity)	3.74	1.16	11	3.91	11	3.55	11	0
SDG 12 Responsible consumption	3.66	1.10	12	3.78	12	3.54	12	0
SDG 1 No poverty	3.57	1.20	13	3.65	14	3.49	14	0
SDG 16 Peace, justice, and strong institution	3.57	1.31	14	3.65	13	3.49	13	0
SDG 14 Life below water	3.42	1.34	15	3.54	17	3.29	15	2
SDG 2 Zero hunger	3.41	1.17	16	3.56	16	3.25	16	0
SDG 5 Gender equality	3.26	1.53	17	3.65	15	2.84	17	-2

SDG 7 จัดเป็นอันดับ ที่เจ็ด ปัญหาเรื่องไฟฟ้าส่องสว่างในพื้นที่สาธารณะ ป้ายไฟ สถานที่รอ รถโดยสารสาธารณะ ไฟฟ้าส่องสว่างที่สะพานลอย ยังคงพบเห็นปัญหาได้อยู่บ่อยครั้ง การมีไฟฟ้าที่มีคุณภาพและพร้อมใช้งานอาจจะสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพชีวิตที่ดีให้กับประชาชนทุกคน การเลือกใช้พลังทดแทนก็เป็นทางเลือกที่ดีในการดำเนินการ ในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 7 บางท่านกล่าวไว้ว่า: “การมีไฟฟ้าส่วนกลางที่ใช้ในชุมชนโดยอาจจะได้มาจาก การทำโซล่าเซลล์เพื่อช่วยผลักดันให้บรรลุเป้าหมาย” Interviewee C

เมื่อดูภาพรวมกับกลุ่มรายได้น้อยกว่าและมากกว่า 25,000 มี SDG 13 เพิ่มเข้ามาเป็น อันดับ ที่แปด โดยในกลุ่มรายได้น้อย เชื่อว่าการมีโครงสร้างพื้นฐานที่ดีจะทำให้กรุงเทพมหานครจัดการกับผลกระทบที่มาจากสภาพอากาศได้ ในมุมมองของผู้ให้สัมภาษณ์เชิงลึกของโครงสร้างพื้นฐานกับ SDG 13 บางท่านกล่าวไว้ว่า: “ต้องมีการกำหนดนโยบายที่เกี่ยวข้องกับงานทางกายภาพของเมือง เพื่อให้เพื่อให้ปฏิบัติตาม” Interviewee A ,

สรุปผลงานวิจัย

ในมุมมองความคิดเห็นของประชาชนคนกรุงเทพมหานครต่อโครงสร้างพื้นฐานมีมุมมองว่าโครงสร้างพื้นฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ พอได้รับได้ เป็นส่วนใหญ่ มีเพียงแค่ 6 รายการที่อยู่เกณฑ์ที่ค่อนข้างพึงพอใจ ที่มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเกิน 3.01 จากรายการโครงสร้างพื้นฐานที่มีทั้งหมด 31 รายการ มีโครงสร้างพื้นฐาน 3 รายการที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ต่ำกว่า 2.00 ซึ่งจะอยู่ในเกณฑ์ที่ รับไม่ได้ ได้แก่ สายไฟ-สายสื่อสารโทรคมนาคม, ระบบเตือนสาธารณภัยที่ทันเหตุการณ์ และทางจักรยาน และโครงสร้างพื้นฐานที่อยากจะให้ สนใจมากขึ้น ก็คือ การกำจัดขยะและของเสีย, ไฟฟ้าส่องสว่าง, การจัดการคุณภาพ

ของแหล่งน้ำธรรมชาติ, โครงสร้างพื้นฐานจัดการป้องกันสาธารณภัยและทางเท้า โครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้ถ้าเราปรับปรุงให้ดีขึ้น เราจะสามารถช่วยให้กลุ่มคนที่มีรายได้น้อย ให้มีสภาพแวดล้อมที่ดี คุณภาพชีวิตที่ดีเพิ่มมากขึ้น

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าประชาชนนั้นมีความเชื่อว่าถ้าปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ให้ดีมากขึ้นกว่าเดิม โครงสร้างพื้นฐานเหล่านั้นจะมีบทบาททำให้ SDG ดีขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อมแทบจะทุกเป้าหมายแต่มี 8 อันดับที่ประชาชนเชื่อมากที่สุด ได้แก่ ชุนชนและเมืองที่ยั่งยืน (SDG 11), อุตสาหกรรม นวัตกรรมและโครงสร้างพื้นฐาน (SDG 9), น้ำสะอาดและการสุขาภิบาล (SDG 6), สุขภาวะและความเป็นอยู่ที่ดี (SDG 3) การศึกษาที่ได้คุณภาพ (SDG 4), งานที่มีคุณและเติบโตทางเศรษฐกิจ (SDG 8), พลังงานสะอาด เข้าถึงง่ายราคาแพง (SDG 7) และการดำเนินการทางสภาพอากาศ (SDG 13) เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Fei *et al*. (2021) SDGs ที่ได้รับผลกระทบจากอุสาหกรรมก่อสร้าง 8 อันดับแรกนั้น มีความเห็นเหมือนกันถึง 6 เป้าหมาย โดย 2 SDGs ที่ต่างกัน คือ SDG 3 และ SDG 4 ซึ่งงานวิจัยของ Fei *et al*. (2021) คือ SDG 12 และ SDG 15 ถือว่ามีความคล้ายคลึงกัน ความต่างที่เกิดนั้นอาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อมหรือคุณภาพชีวิตในประเทศที่แตกต่างกันและอีกส่วนคือผู้ตอบแบบสอบถาม โดยทางงานวิจัยนี้ผู้ตอบสอบถามส่วนใหญ่จะเป็นประชาชนทั่วไป ที่อาศัยในกรุงเทพมหานคร จึงมีมุมมองที่มองถึงสิ่งตัวเองนั้นขาดหรือต้องการเป็นหลัก ส่วนงานวิจัยของ Fei et al. (2021) นั้นผู้ตอบจะเป็นบุคลากรที่อยู่ในอุสาหกรรมการก่อสร้างเป็นหลักจึงมองในมุมมองภาพรวมของอุสาหกรรมว่าจะสามารถช่วยอะไรได้มากในภาพรวมที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าตัวบุคคลแบบประชาชนทั่วไป

นอกจากนี้ ผู้ตอบแบบสอบถามบางส่วนเน้นไปเรื่องการปลูกจิตสำนึกในบุคคลให้มีความคิดดี นึกดี เพื่อช่วยให้สังคมไปก้าวข้างหน้านอกจากที่จะมีแค่การปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานดีที่ขึ้นแล้ว มนุษย์ต้องปรับจิตใจให้ดีตามสังคมกันไปด้วยเพื่อสร้างสังคมที่หน้าน่าอยู่และยั่งยืนตลอดไป การศึกษานี้ยังเป็นส่วนประชากรที่ยังมีขนาดเล็กที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล การศึกษาในอนาคตสามารถขยายประชากรเพื่อสร้างมุมมองโครงสร้างพื้นฐานกับ SDGs ให้กว้างขึ้นและจะมีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อสามามารถสรุปผลวิจัยให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล กรุงเทพมหานคร . แผนพัฒนากรุงเทพมหานคร ระยะ 20 ปี(2556-2575) . สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล กรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร

Fei, W., Opoku, A., Agyekum, K., Oppon, J.A., Ahmed, V., Chen, C., Lok, K.L. 2021. The Critical Role of the Construction Industry in Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs): Delivering Projects for the Common Good. Sustainability 13: 9112. doi.org/10.3390/su13169112

Oxford University Press. 2022. Oxford Learner's Dictionaries. https://www.oxfordlearnersdictionaries.com 19 มกราคม 2564

Santos, J.R.A.1999. Cronbach's alpha: A tool for assessing the reliability of scales. J. Ext. 37: 1–5.

Sherif Goubran. 2019. On the Role of Construction in Achieving the SDGs. J. Sustain Res.: e190020. doi.org/10.20900/jsr20190020

Thacker, S., Adshead, D., Fay, M., et al. 2019. Infrastructure for sustainable development. Nat. Sustain 2: 324–331. doi.org/10.1038/s41893-019-0256-8

Sustainable Development Report. 2022. Rankings The overall performance of all 193 UN Member States. dashboards.sdgindex.org/rankings, 14 ธันวาคม 2565

United Nations.2016. SDG Indicators Metadata repository. unstats.un.org/sdgs/metadata, 19 มกราคม 2564

การจัดลำดับความเหมาะสมของเกาะกลางทางหลวงหมายเลข 42 ตอน นาจวก–ดอนยาง ระหว่าง กม.83+605–กม.88+045 ด้วยวิธี AHP

The suitability ranking of road medians of Highway No. 42, Na Chuak–Don Yang Sta.83+605–Sta.88+045 by AHP

อภิชา ใสสะอาดตา*, **วันชัย ยอดสุดใจ**, **ประเสริฐ สุวรรณวิทยา**

Aphicha Saisaardta*, Wanchai Yodsudjai, Prasert Suwanvitaya

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: aphicha.sa@ku.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเกาะกลางถนนได้ถูกออกแบบและติดตั้งบนทางหลวงโดยพิจารณาทั้งทางด้านวิศวกรรมการทาง ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม ให้สอดคล้องกับผู้ใช้ถนน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดลำดับรูปแบบของเกาะกลางที่เหมาะสมกับทางหลวงหมายเลขเลข 42 ระหว่าง กม.83+605–กม.88+045 ด้วยวิธีดำเนินการวิจัยโดยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP) การศึกษานี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสอบถามผู้เชี่ยวชาญในกรมทางหลวง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่เหมะสมต่อการเลือกเกาะกลางประกอบด้วย ปัจจัยด้านวิศวกรรม ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม และปัจจัยด้านการลงทุน ตามลำดับ ทั้งนี้แนวทางเลือกรูปแบบเกาะกลางที่เหมาะสมได้แก่ เกาะกลางถนนแบบยก เกาะกลางถนนแบบกดเป็นร่อง เกาะกลางถนนแบบเป็นราวหรือกำแพงกั้น และเกาะกลางถนนแบบเกาะสี ตามลำดับ ผลงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการวางแผนปรับปรุงเกาะกลางถนนให้สอดคล้องกับสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปของชุมชนในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์, เกาะกลางถนน

Abstract

Currently, road medians are designed and installed on highways taking into account on road engineering, economics, and environment in accordance with road users. The purpose of this research was to prioritize the model of the road medians suitable for highways No. 42 Sta.83+605–Sta.88+045 by Analytical Hierarchy Process, AHP. This study analyzed data obtained from experts in the Department of Highways. The results showed that the appropriate factors for the selection of the road medians consisted of engineering factor, environmental factors and investment factors, respectively. Raised Median, Depressed Median, Barrier Median, and Flush and Painted Median, respectively. The result of this research is useful for planning to improve the road medians in accordance with the changing environment of the community in the future.

Keywords: Analytical Hierarchy Process, AHP, Road Medians

บทนำ

ในการสัญจรของผู้ใช้รถบนถนนอย่างปลอดภัยมีองค์ประกอบครอบคลุมหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นวินัยในการขับขี่รถของผู้ใช้ถนน เครื่องหมายควบคุมจราจร รวมถึงเกาะกลางชนิดต่างๆ เพื่อให้เกิดความสะดวก ปลอดภัยให้กับผู้ใช้ทาง และเพื่อแบ่งแยกทิศทางการจราจรสำหรับทางหลวงที่มีช่องจราจร 4 ช่องหรือมากกว่านั้น ปัจจุบันเกาะกลางถนนได้ถูกออกแบบและติดตั้งบนทางหลวงโดยพิจารณาทั้งทางด้านวิศวกรรมการทาง ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม ให้สอดคล้องกับผู้ใช้ถนน ทั้งนี้ประเภททางหลวงถนน 4 ช่องจราจร ไม่มีฉนวนกั้นกลาง (ไม่มีเกาะกลาง) มีค่าอัตราการเกิดอุบัติเหตุวิกฤต (Critical rate Method) 1.026 ซึ่งมีค่าระดับความเสี่ยงเป็นอันดับที่ 2 จาก 9 ประเภท รองจากถนน 6 ช่องจราจร ไม่มีฉนวนกั้นกลาง (ไม่มีเกาะกลาง) (วุฒิพงษ์, 2557)

ปัจจุบันเส้นทางหลวงเลข 42 ระหว่าง กม.83+605–กม.88+045 มีลักษณะเกาะกลางเป็นแบบเกาะสีตลอดเส้นทาง อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากพฤติกรรมของผู้ขับขี่กลับรถหรือเลี้ยวเข้าออกได้ทุกแห่งในบริเวณที่ไม่ได้กำหนดไว้ให้ การมีจุดเปิดเกาะกลางหลายจุดอาจส่งผลทำให้มีจำนวนอุบัติเหตุมากขึ้น (ชัยยุทธ์, 2557) รวมถึงชุมชนทั้งสองข้างทางสามารถเดินข้ามถนนโดยมีจุดแวะพักคือเกาะสีบนถนนโดยไม่มีสิ่งใดป้องกัน เป็นเหตุทำให้เกิดอุบัติเหตุในท้องถนนได้ และการดูแลรักษาเกาะกลางจำเป็นต้องทำเป็นประจำเมื่อสีจางตลอดเวลา เพื่อให้ผู้ขับขี่มองเห็นได้ชัดตลอดเวลาทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

จากสาเหตุและความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยหากในอนาคตมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเกาะกลาง รูปแบบเกาะกลางทั้ง 4 รูปแบบที่ใช้อยู่ของกรมทางหลวง รูปแบบใดจะเหมาะสมกับสภาพพื้นที่และสิ่งแวดล้อมนี้

วัตถุประสงค์

เพื่อจัดลำดับรูปแบบของเกาะกลางที่เหมาะสมกับทางหลวงหมายเลขเลข 42 ระหว่าง กม.83+605–กม.88+045 ด้วยวิธีดำเนินการวิจัยโดยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP)

วิธีการศึกษา

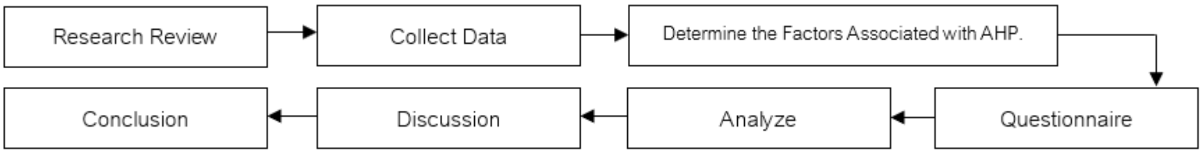


Fig. 1 Conceptual framework

งานวิจัยนี้แบ่งวิธีการศึกษาตาม Fig. 1 ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ดังนี้

(1) ทบทวนงานวิจัย โดยศึกษาจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการออกแบบเกาะกลาง ประเภทเกาะกลางในแบบต่างๆ และทฤษฎีความสำเร็จด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

(2) รวบรวมข้อมูลพื้นที่ศึกษา ข้อมูลการออกแบบทางเรขาคณิต ข้อมูลการจราจรและอุบัติเหตุ

(3) กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

(4) จัดทำแบบสอบถาม

(5) วิเคราะห์แบบสอบด้วย AHP

(6) อภิปรายผลและสรุปผลงานวิจัย

(7) สรุปผลงานวิจัย

ทบทวนงานวิจัย

ภัทรพล สีดอกบวบ (2563) ได้ศึกษาปัจจัยลักษณะกายภาพของทางหลวงตามรูปแบบถนน ที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุบนถนน และสร้างแบบจำลองคาดการณ์การเกิดอุบัติเหตุของทางหลวง โดยแบ่งลักษณะกายภาพของทางหลวงตามรูปแบบถนนไว้ 4 รูปแบบ พบว่าแบบจำลองสำหรับเกาะสีและแบบเป็นราวหรือกำแพงกั้น มีระดับความเชื่อมั่นต่ำหรือค่า R-Squared น้อย เนื่องจากเกาะกลางประเภทนี้ มีลักษณะการเกิดอุบัติเหตุลักษณะกระจายตัวตลอดช่วงถนน

ชัยยุทธ ศรีสุด (2558) ได้ศึกษาการประเมินประสิทธิผลของการปรับปรุงเกาะกลางของทางหมายเลข 407 ตอนคลองหวะ – สงขลา กม.16+600 ถึง กม.21+000 ก่อนดำเนินโครงการปรับปรุงเกาะกลาง 2 ปี และหลังดำเนินการแล้วเสร็จ 2 ปี เดิมถนนมีเกาะกลางถนนเป็นเกาะสี พบว่าโครงการปรับปรุงเกาะกลางถนนนี้ไม่สามารถลดจำนวนการเกิดอุบัติเหตุได้ แต่สามารถลดความรุนแรงจากอุบัติเหตุได้

ข้อมูลพื้นที่ศึกษา

จุดเริ่มต้นทางหลวงหมายเลข 42 ที่ทำการศึกษา คือ บริเวณศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี (กม.83+605) สิ้นสุดบริเวณหน้ากองทัพอากาศ กองกำลังอากาศเฉพาะกิจที่ 9 (กม.88+045) ระยะทาง 4.44 กิโลเมตร อยู่ในตอนควบคุม 0201 แขวงทางหลวงปัตตานี สำนักงานทางหลวงที่ 18 เป็นถนน 4 ช่องจราจร มีประเภทผิวทางจราจรเป็น Asphalt Concrete ตลอดช่วงพื้นที่ศึกษาเป็นเกาะกลางถนนแบบเกาะสี และมีชุมชนตลอด 2 ข้างทาง

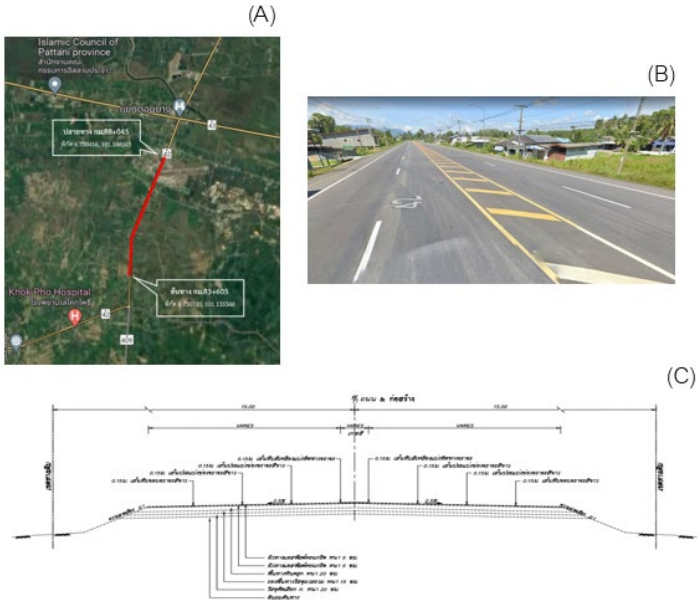


Fig. 2 Location (A) (B) and Cross Section (C)

กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

กำหนดโครงสร้างการตัดสินใจ ดังแสดงใน Fig. 3 โดยประกอบด้วยระดับโครงสร้าง 3 ระดับ

โครงสร้างระดับที่ 1 คือ เป้าหมาย (Goal) “รูปแบบเกาะกลางที่เหมาะสม” อยู่ในระดับบนสุดของลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

โครงสร้างระดับที่ 2 คือ เกณฑ์หลัก (Criteria) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ใช้ในการหลักการพิจารณาเกาะกลางถนน
โครงสร้างระดับที่ 3 คือ ทางเลือก (Alternative) ซึ่งเป็นประเภทของเกาะกลางถนนทั้ง 4 รูปแบบ

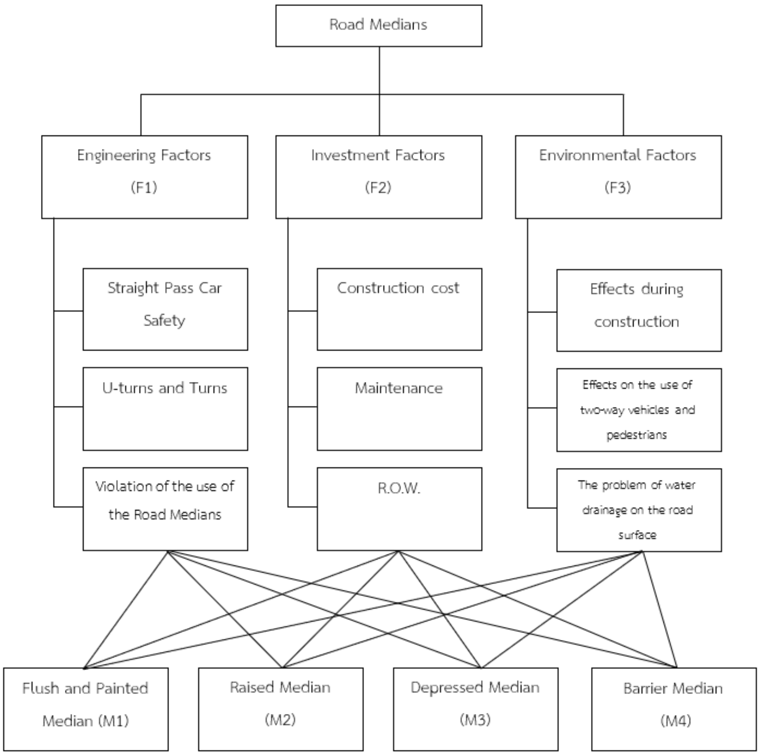


Fig. 3 Analytic Hierarchy Process, AHP
ที่มา : สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง(2554)

ปัจจัยที่ถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาชนิดของเกาะกลางถนนในโครงสร้างระดับ 2 และ 3 ประกอบด้วย

1. โครงสร้างระดับ 2
   - ปัจจัยด้านวิศวกรรม (F1) ประกอบด้วย ความปลอดภัยของรถผ่านตรง การกลับรถและการเลี้ยว การละเมิดการใช้เกาะกลาง
   - ปัจจัยด้านการลงทุน (F2) ประกอบด้วย ราคาค่าก่อสร้าง การซ่อมบำรุง ความต้องการพื้นที่เขตทาง
   - ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (F3) ประกอบด้วย ผลกระทบระหว่างการก่อสร้าง ผลกระทบในการใช้งานของรถสองข้างทางและคนข้ามถนน ปัญหาการระบายน้ำบนผิวจราจร
2. โครงสร้างระดับ 3 คือ
   - เกาะกลางถนนแบบเกาะสี (M1)
   - เกาะกลางถนนแบบยก (M2)
   - เกาะกลางถนนแบบกดเป็นร่อง (M3)
   - เกาะกลางถนนแบบเป็นราวหรือกำแพงกั้น (M4)

การหาค่าน้ำหนักเกณฑ์ เมื่อได้ค่าน้ำหนักที่ผู้เชี่ยวชาญได้วินิจฉัยแล้ว โดยออกมาในรูปแบบของตัวเลข โดยการนำตัวเลขที่ได้มาคำนวณความสำคัญในแต่ละชั้น ระดับชั้นจากชั้นบนลงสู่ชั้นล่างจนครบทุกชั้น (สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, 2542; มาโนช ชาวสวน, 2545)

จัดทำแบบสอบถาม

(1) สำรวจและรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ หลักการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญในการคัดเลือกปัจจัย โดยมีประสบการณ์ในการทำงานด้านคมนาคมมากกว่า 10 ปีขึ้นไป โดยการจัดทำแบบสอบถาม จำนวน 15 ชุดแบบสอบถาม เพื่อใช้วิเคราะห์หาค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (C.R.)

(2) เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง (Random Sampling Technique) เทคนิคการสุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เลือกใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เป็นการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างที่มีลักษณะเฉพาะเจาะจงตามหลักการของเหตุผล โดยมีความสอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย การสุ่มแบบเจาะจงเป็นการศึกษาที่ต้องใช้ความรู้มีความชำนาญในเป้าหมายหรือประเด็นหลักของปัญหาในเรื่องนั้นๆ

(3) แบบสอบถามประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เปรียบเทียบปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจภายใต้วัตถุประสงค์ ส่วนที่ 2 เปรียบเทียบทางเลือกภายใต้ปัจจัยการตัดสินใจ

Table 7 List of experts

No.	Name	Position	Bureau
1	Mr. Anupap Chareonsak	Civil Engineer, Expert Level	Bureau of Location and Design
2	Mr. Supachai Mahakit	Civil Engineer, Expert Level	Bureau of Location and Design
3	Mr. Kittisak Thongmak	Civil Engineer, Expert Level	Bureau of Highway Construction 1
4	Mr. Veerasit Srisamai	Civil Engineer, Senior Professional Level	Bureau of Highway Construction 1
5	Mr. Suphawat Ketkeaw	Civil Engineer, Senior Professional Level	Bureau of Highway Construction 1
6	Mr. Phumate Puntamuni	Civil Engineer, Senior Professional Level	Bureau of Location and Design
7	Mr. Thanakorn Prasongwattana	Civil Engineer, Senior Professional Level	Bureau of Standards and Evaloation
8	Mr. Siwadon Buntatui	Civil Engineer, Professional Level	Bureau of Highway Construction 1
9	Ms. Sataporn Kanthachet	Civil Engineer, Professional Level	Bureau of Standards and Evaloation
10	Mr. Suwichai Nuanchawee	Civil Technician, Senior Level	Pattani Highway District
11	Mr. Prasat Poomsuwan	Civil Technician, Senior Level	Pattani Highway District
12	Mr. Thanya Plodthongsom	Civil Technician, Experienced Level	Pattani Highway District
13	Mr. Nisukri Sulaiman	Civil Technician, Experienced Level	Pattani Highway District
14	Mr. Prapit Sitkanarak	Civil Engineer, Practitioner Level	Bureau of Standards and Evaloation
15	Mr. Monpat Ploypatta	Civil Engineer, Practitioner Level	Pattani Highway District

ตัวอย่าง การวิเคราะห์แบบสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญลำดับที่ 1 ด้วยวิธี AHP

1. การคำนวณหาลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยหาผลรวมในแนวตั้งของตารางเมทริกซ์ ดังแสดงใน Table 2
2. หาค่าเมทริกซ์ของค่าร้อยละ โดยการนำค่าคะแนนข้อมูลของแต่ละปัจจัยใน Table 2 หาผลรวมในแนวตั้งของตารางเมทริกซ์ ดังแสดงใน Table 3
3. หาค่าเฉลี่ยของผลรวมของอัตราส่วนในแถวแนวนอนแต่ละแถว ผลลัพธ์คือน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย ดังแสดงใน Table 4
4. ตรวจสอบความสอดคล้องของเหตุผล (Consistency Ratio : C.R) ดังแสดงใน Table 5

Table 2 Geometric Mean

Factor	F1	F2	F3
F1	1.000	8.000	8.000
F2	1/8 = 0.125	1.000	1.000
F3	1/8 = 0.125	1/1 = 1.000	1.000
Vertical total	1.250	10.000	10.000

Table 3 Matrix of percentage values

Factor	F1	F2	F3
F1	1/1.25 = 0.800	8/10 = 0.800	8/10 = 0.800
F2	0.125/1.25 = 0.100	1/10 = 0.100	1/10 = 0.100
F3	0.125/1.25 = 0.100	1/10 = 0.100	1/10 = 0.100

Table 4 Weights of Criteria factor

Factor	F1	F2	F3	Horizontal total	Weight of factor
F1	0.800	0.800	0.800	2.400	2.4/3 = 0.800
F2	0.100	0.100	0.100	0.300	0.3/3 = 0.100
F3	0.100	0.100	0.100	0.300	0.3/3 = 0.100
Vertical total	1.000	1.000	1.000	3.000	1.000

Table 5 Consistency Index (C.I.) and Consistency Ratio (C.R.)

				λ_{max}	C.I. = (λ_{max}-n)/(n-1)	R.I.	C.R. = C.I./R.I.
The sum of the diagnostic values for each criterion.	1.25	10.00	10.00	3.00	0.00	n = 3 R.I. = 0.58	0.00
The sum average horizontally for each row	0.80	0.10	0.10				
multiply both values	1.00	1.00	1.00				

C.R. คือ สัดส่วนความสมเหตุสมผล เป็นการตรวจสอบผลการเปรียบเทียบ ถ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10 ถือว่ายอมรับได้ ถ้ามากกว่า 0.10 ถือว่ายอมรับไม่ได้ จะต้องทำการทบทวนการให้ค่าน้ำหนักคะแนนเปรียบเทียบในเกณฑ์นั้นกันใหม่ จนกว่าจะได้ค่า C.R. ที่สามารถยอมรับได้ จึงสามารถนำไปอธิบายความหมายของความสำคัญได้

C.I. คือ ค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.),

λ_{max} คือ Maximum Eigenvalue ผลรวมของผลคูณทั้งสองค่า

R.I. คือ ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมทริกซ์ (Random Consistency Index: R.I.)

วิเคราะห์แบบสอบถามด้วย AHP

แบบสอบถามแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

(1) การสำรวจข้อมูลแบบสอบถาม ส่วนที่ 1 เป็นผลการสำรวจความเห็นเกี่ยวกับการเปรียบเทียบลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจ เป็นค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (Geometric Mean) เปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัย ประกอบด้วย ด้านวิศวกรรม (F1) ด้านการลงทุน (F2) และด้านสิ่งแวดล้อม (F3)

Table 6 Summarize the weight of criteria factor and Consistency Ratio

Specialist	Weight the importance of the main factor.			C.R.
	F1	F2	F3	
Specialist 1	0.800	0.100	0.100	0.000
Specialist 2	0.751	0.150	0.099	0.071
Specialist 3	0.731	0.119	0.149	0.047
Specialist 4	0.761	0.141	0.098	0.097
Specialist 5	0.756	0.112	0.131	0.022
Specialist 6	0.800	0.100	0.100	0.000
Specialist 7	0.703	0.182	0.115	0.047
Specialist 8	0.539	0.297	0.164	0.007
Specialist 9	0.471	0.059	0.471	0.000
Specialist 10	0.732	0.130	0.138	0.003
Specialist 11	0.719	0.168	0.113	0.076
Specialist 12	0.800	0.100	0.100	0.000
Specialist 13	0.732	0.130	0.138	0.003
Specialist 14	0.732	0.130	0.138	0.003
Specialist 15	0.800	0.100	0.100	0.000
Average	0.738	0.129	0.133	0.012

จาก Table ได้รายละเอียดค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยโดยได้เรียงลำดับ ดังนี้
ลำดับที่ 1 ปัจจัยที่ 1 ด้านวิศวกรรม ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักความสำคัญมีค่า 0.738
ลำดับที่ 2 ปัจจัยที่ 3 ด้านสิ่งแวดล้อม ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักความสำคัญมีค่า 0.129
ลำดับที่ 3 ปัจจัยที่ 2 ด้านการลงทุน ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักความสำคัญมีค่า 0.133
อัตราส่วนความสอดคล้องมีค่า 0.012

พบว่าค่าความสอดคล้องกันของเหตุผลมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.2 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงว่าการวินิจฉัยมีความสอดคล้องกันของเหตุผล ถือว่ายอมรับได้ และสามารถนำไปอธิบายความหมายของความสำคัญได้

(2) การสำรวจข้อมูลแบบสอบถาม ส่วนที่ 2 เป็นผลการสำรวจความเห็นเกี่ยวกับการเปรียบเทียบลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจ เป็นค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (Geometric Mean) เปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัย ประกอบด้วย เกาะกลางถนนแบบเกาะสี (M1) เกากลางถนนแบบยก (M2) เกาะกลางถนนแบบกดเป็นร่อง (M3) และเกาะกลางถนนแบบเป็นราวหรือกำแพงกั้น (M4)

โดยจากการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 15 ท่าน สามารถสรุปค่าน้ำหนักของทางเลือกภายใต้ปัจจัย ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกันของเหตุผลมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 สรุปได้ดังแสดงใน Table 7

Table 7 Summarize the weight of alternatives factor

Alternative	Weight value			Average
	F1	F2	F3	
M1	0.068	0.097	0.123	0.096
M2	0.382	0.376	0.421	0.393
M3	0.326	0.297	0.267	0.297
M4	0.223	0.231	0.189	0.214

เมื่อได้จัดลำดับความสำคัญโดยรวม (การสังเคราะห์แบบจำลอง) และการตัดสินใจของน้ำหนักที่คำนวณโดยวิธี AHP แล้ว จากนั้นให้นำค่าที่ได้มาจัดลำดับความสำคัญ (หรือการตั้งค่า) จากค่าคะแนนจากมากไปน้อย โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ 1–3 ตามลำดับความสำคัญ ของทางเลือกที่เกี่ยวข้องของแต่ละปัจจัย

Table 8 Ranks of each factor

Alternative	F1	F2	F3
M1	4	4	4
M2	1	1	1
M3	2	2	2
M4	3	3	3
Consistency vector	3	1	2

ทำการสังเคราะห์แบบจำลองค่าความสำคัญ (หรือน้ำหนัก) ของเกาะกลาง ดังแสดงใน Table 9 และผลของค่าน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกเกาะกลาง ดังแสดงใน Table 10

Table 9 Significance model synthesis

Alternative	F1	F2	F3
M1	3/4 = 0.750	1/4 = 0.250	2/4 = 0.500
M2	3/1 = 3.000	1/1 = 1.000	2/1 = 2.000
M3	3/2 = 1.500	1/2 = 0.500	2/2 = 1.000
M4	3/3 = 1.000	1/3 = 0.333	2/3 = 0.667

Table 10 Weights of Alternative factor

Alternative	F1	F2	F3	Weight of factor
	0.738	0.129	0.133	
M1	0.750	0.250	0.500	0.652
M2	3.000	1.000	2.000	2.609
M3	1.500	0.500	1.000	1.305
M4	1.000	0.333	0.667	0.870

สรุปผลงานวิจัย

ผลการวิจัยได้วิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักและแนวทางเลือกทั้งหมด สามารถสรุปผลเป็นค่าคะแนนความสำคัญของปัจจัยหลักและแนวทางในการตัดสินใจ จากแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญจากกรมทางหลวง ทำให้เห็นว่าปัจจัยในจัดลำดับรูปแบบของเกาะกลางที่เหมาะสมกับทางหลวงหมายเลขเลข 42 ระหว่าง กม.83+605–กม. 88+045 ประกอบด้วย ปัจจัยทางด้านวิศวกรรม (0.738) ด้านสิ่งแวดล้อม (0.133) และด้านการลงทุน (0.129) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปัจจัยทางด้านวิศวกรรมมีค่าคะแนนความสำคัญเป็นลำดับที่ 1 และมีค่าคะแนนมากกว่าผลรวมของปัจจัยหลักด้านสิ่งแวดล้อมและด้านการลงทุนรวมกัน จะเห็นได้ว่าให้ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมเป็นสิ่งสำคัญ แต่ยังคงมองเห็นถึงความสำคัญทางด้านสิ่งแวดล้อมและด้านการลงทุนควบคู่เช่นกัน

ทั้งนี้แนวทางเลือกรูปแบบของเกาะกลางที่เหมาะสมกับทางหลวงหมายเลขเลข 42 ระหว่าง กม.83+605–กม. 88+045 ได้แก่ เกาะกลางถนนแบบยก (0.393) เกาะกลางถนนแบบกดเป็นร่อง (0.297) เกาะกลางถนนแบบเป็นราวหรือกำแพงกั้น (0.214) และเกาะกลางถนนแบบเกาะสี (0.096) ตามลำดับ และพบว่าค่าคะแนนน้ำหนักความสำคัญของเกาะกลางถนนแบบยก (2.609) เกาะกลางถนนแบบกดเป็นร่อง (1.305) เกาะกลางถนนแบบเป็นราวหรือกำแพงกั้น

(0.870)และถนนแบบเกาะสี (0.652) จะสังเกตได้ว่าเกาะกลางถนนแบบยกมีค่าคะแนนน้ำหนักความสำคัญลำดับที่ 1 และค่าคะแนนความสำคัญของเกาะกลางแบบเกาะสีนั้นมีค่าลำดับสุดท้าย มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับผลวิจัยโดยการสร้างจำลองเหตุการณ์ของปัจจัยลักษณะกายภาพของทางหลวงตามรูปแบบถนนที่แตกต่างกันที่พบว่าเกาะกลางแบบเกาะสีนั้นมีระดับความเชื่อมั่นต่ำ อันเนื่องมาจากการแบ่งทิศทางของช่องจราจรนั้นไม่มีฉนวนกั้น (ชัยยุทธ์ ศรีสุด 2558; สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, 2560; ภัทรพล สีดอกบวบ, 2563)

ในปัจจุบันรูปแบบเกาะกลางของทางหลวงหมายเลขเลข 42 ระหว่าง กม.83+605–กม.88+045 นั้นเป็นเกาะกลางแบบสี ซึ่งรูปแบบนี้มีข้อดีในด้านประหยัดค่าก่อสร้างและก่อสร้างได้เร็ว จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าเกาะกลางถนนแบบยกมีความเหมาะสมกว่า หากในอนาคตมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเกาะกลางหรือแนวทางการพิจารณางานออกแบบในการกำหนดรูปแบบเกาะกลางที่เหมาะสมและงบประมาณที่เพียงพอ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพิจารณาสำหรับผู้ออกแบบในการเลือกลักษณะกายภาพพื้นที่ของทางหลวงให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการขับขี่บนสภาพพื้นที่และสภาพแวดล้อมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานศึกษานี้เสร็จลุล่วงเนื่องได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากแขวงทางหลวงปัตตานี กรมทางหลวงและความร่วมมือจากเจ้าหน้าที่จากกรมทางหลวง กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น Analytic Hierarchy Process: AHP สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). https://www.dti.or.th/download/150319174753_3ahp4.pdf, 20 ตุลาคม 2564.

ชัยยุทธ์ ศรีสุด. 2558. การประเมินความปลอดภัยของโครงการปรับปรุงเกาะกลางถนน: กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 407 ตอน คลองหวะ - สงขลา กม.16+600 ถึง กม.21+000. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ภัทรพล สีดอกบวบ. 2563. การศึกษาลักษณะกายภาพพื้นที่ของทางหลวงตามรูปบบถนน เพื่อสร้างแบบจำลองคาดการณ์การเกิดอุบัติเหตุ การประชุมวิชาการวิศวกรรโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25

มาโนช ชาวสวน. 2545. แบบจำลองการคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับโดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับชั้น.

วุฒิพงษ์ ธรรมศรี, ประสิทธิ์ จึงสงวนพรสุข. 2556. การบ่งชี้จุดอัตรายบนทางหลวงในประเทศไทยด้วยวิธีอัตราการเกิดอุบัติเหตุ. KKU Res. J. 11: 1–8.

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง. 2560.โ ครงการวิจัยเพื่อสร้างแบบจำลองในการทำนายโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ หากมีการเลือกชนิดของเกาะกลางถนนที่แตกต่างกัน.

สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง. 2554. DESIGN GUIDELINE ประเภทของเกาะกลางถนน (Road Median) และการออกแบบรูปตัดงานขยายทางหลวง (Road Widening).

การศึกษาตัวชี้วัดที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานและเมืองน่าอยู่

A study of indicators that affect infrastructure and livable cities

ประดิพัฒน์ พิสิฐนฤดม*, **ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**

Pradipat Pisitnaruedom*, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Structural Technology for the Built Environment, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. Email address: pradipat.pi@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาความน่าอยู่ของบริบทเมืองกรุงเทพมหานคร โดยการรวบรวมข้องมูลทุติยภูมิของตัวชี้วัดด้านโครงสร้างพื้นฐานเมือง และความน่าอยู่ของเมืองในด้านเศรษฐกิจ สภาพแวดล้อมเมือง และด้านสังคม รวม 25 ตัวชี้วัด โดยสามารถเปรียบเทียบแยกรายเขตได้ 10 ตัวชี้วัด และเป็นภาพรวมของกรุงเทพมหานครอีก 15 ตัวชี้วัด พบว่าการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานในช่วงปีพ.ศ. 2554 – 2564 ยังไม่สะท้อนความต้องการของประชาชนโดยเฉพาะในเรื่องการจัดหาที่อยู่อาศัย และการเข้าถึงพลังงาน ส่วนความน่าอยู่ของเมืองในด้านสภาพแวดล้อม พื้นที่สีเขียวเพิ่มมากขึ้น น้ำในคลองสะอาดขึ้น ด้านสังคมก็มีพื้นที่สันทนาการเพิ่มมากขึ้น แต่รายได้ประชาชนกลับลดลง และมีชั่วโมงการทำงานเพิ่มมากขึ้น จึงควรหาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างโครงสร้างพื้นฐานกับความน่าอยู่ของเมือง เพื่อให้สามารถเข้าใจและระบุการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่เกิดประโยชน์ต่อประชาชนได้ตรงตามความต้องการมากยิ่งขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: กรุงเทพมหานคร, การพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืน, ความน่าอยู่ของเมือง

Abstract

A study of livability in city of Bangkok by collecting secondary data of 25 indicators of urban infrastructure and city livability in three areas: economic, environment and social living. Ten indicators were compared to see the difference among 50 districts. The other 15 indicators which were not separated into districts were also explored. From 2011 to 2021, it was found that infrastructure development did not respond well to public need especially in providing housing and access to affordable energy. Whereas, city livability in the area of urban environment measured by green areas and clean canals were improved. The social living measured by recreational area was also increased. Nonetheless, income and work-life-balance got worse. The relationship among urban infrastructure and city livability should be identify in further study through quantitative technique to better understand and identify the right infrastructure that benefits public in the future.

Keyword: Bangkok, Livable cities, Sustainable urban development

คำนำ

กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ถือเป็นเมืองจุดศูนย์กลางของวัฒนธรรม เศรษฐกิจและการท่องเที่ยว เป็นเมืองที่มีประชากรเข้ามาอยู่อาศัยเป็นจำนวนมาก กลายเป็นเมืองที่มีศักยภาพความพร้อมในหลายๆ ด้าน แต่กลับพบว่าเป็นเมืองที่พัฒนาอย่างไร้แบบแผนจนมีความเหลื่อมล้ำสูง จนทำให้ทุกวันนี้ประชาชนต้องอยู่กับความแออัด ความไม่สบายใจ ส่งผลให้เกิดความไม่น่าอยู่ขึ้น (ปรีชญา, 2562) ความน่าอยู่ของเมืองสามารถประเมินได้จากหลากหลายมุมมอง อาทิ ตัวชี้วัดเมืองน่าอยู่ของอินโดนิเซีย (MLCI) ได้จัดอันดับตัวชี้วัด 7 ตัวชี้วัด ได้แก่ (1) ความพร้อมใช้งานของความต้องการขั้นพื้นฐาน (2) สิ่งอำนวยความสะดวกสาธารณะ (3) พื้นที่สาธารณะ (4) ความปลอดภัยและความมั่นคง (5) คุณภาพสิ่งแวดล้อม (6) โครงสร้างพื้นฐานทางสังคม เศรษฐกิจและวัฒนธรรม และ (7) การมีส่วนร่วมของชุมชน ซึ่งเผยแพร่และประเมินโดยสมาคมผู้เชี่ยวชาญนักวางแผนในอินโดนีเซีย เพื่อวัดเมืองมากกว่า 25 เมืองในอินโดนีเซีย การพัฒนาเมือง “เมืองน่าอยู่” เป็นกรอบในการพัฒนาเมืองให้มีความยั่งยืนของเมืองทั่วโลกและเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (SDGs) เป็นเป้าหมายการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืนของเมืองทั่วโลกภายในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งจากการจัดอันดับ Economist Intelligence Unit หรือ EIU (The economist, 2022) เมืองกรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย จัดเป็นเมืองน่าอยู่อันดับ 1 ของโลกและในส่วนของเมืองกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย จัดเป็นเมืองน่าอยู่อันดับ 98 ของโลกจาก 172 ประเทศทั่วโลก

ดังนั้นการศึกษานี้ มีแนวคิดในการสร้างกรอบแนวคิดความน่าอยู่ของเมืองกรุงเทพมหานคร โดยการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิในการเก็บข้อมูลและตีกรอบตัวชี้วัดความน่าอยู่ โดยผลที่ได้จากการศึกษาอาจใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นของชุมชนเมืองเป็นการเพิ่มคุณภาพชีวิตและศักยภาพเพื่อพัฒนาเมืองให้มีความน่าอยู่ขึ้น

ระเบียบวิธีการวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบดัชนี้ชี้วัดที่ส่งผลต่อความน่าอยู่ของกรุงเทพมหานคร โดยเป็นการศึกษาเปรียบข้อมูลทุติยภูมิที่ทางกรุงเทพฯ ได้จัดเก็บข้อมูลไว้นำมาพิจารณาและหาความสัมพันธ์ ตามกรอบแนวคิดความน่าอยู่ของเมืองในบริบทกรุงเทพมหานคร (กองยุทธศาสตร์ทรัพยากรมนุษย์และสังคม (กยป., 2560))

1. รวบรวมข้อมูลดัชนี้ความน่าอยู่ด้วยข้อมูลทุติยภูมิชุดข้อมูลจะเริ่มตั้งแต่ พ.ศ. 2554 – 2564 จากข้อมูลสถิติที่กรุงเทพฯได้เก็บรวบรวม ซึ่งชุดข้อมูลจะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นชุดข้อมูลที่กรุงเทพฯได้จัดเก็บข้อมูลเป็นรายจังหวัดและส่วนที่สองเป็นชุดข้อมูลที่กรุงเทพฯได้จัดเก็บข้อมูลแบ่งเขตพื้นที่ 50 เขต และเปรียบทียบจำนวนประชากรในกรุงเทพฯ ช่วงระหว่าง 10 ปีที่ผ่านมา จากกราฟ Fig. 3 จำนวนประชากรมีสัดส่วนลดลงเฉลี่ย -1.53% โดยประชากรที่อยู่พื้นที่เขตที่สำคัญทางเศรษฐกิจจะมีจำนวนประชากรที่ลดลงและพื้นที่เขตที่อยู่รอบนอกกรุงเทพฯมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นและลดลงของจำนวนประชากรแต่ละเขต

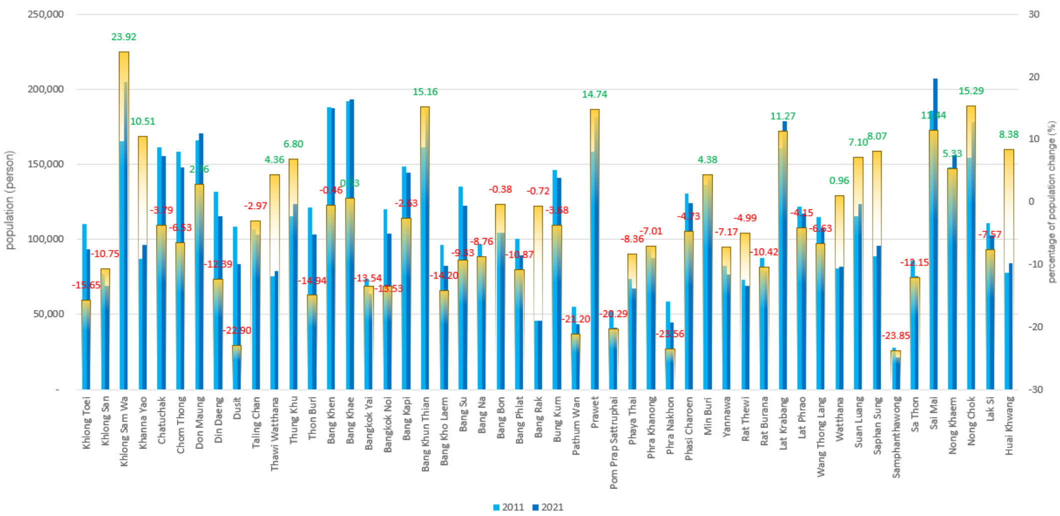


Fig.1 Comparison of the rate of increase and decrease of the population of Bangkok between 2011 and 2021

2. สร้างแบบจำลองเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ความน่าอยู่ แบบจำลองสมมุติฐานถือว่าความน่าอยู่เมืองได้รับการสนับสนุนโดยปัจจัยความน่าอยู่ 4 ประการ ได้แก่ (1) โครงสร้างพื้นฐานเมือง (2) เศษฐกิจ (3) สภาพแวดล้อมเมืองและ (4) ชีวิตทางสังคม ผ่านตัวชี้วัด 25 ตัวชี้วัด และกำหนดค่าเป้าหมายความสำคัญของตัวชี้วัด (กยป., 2560)

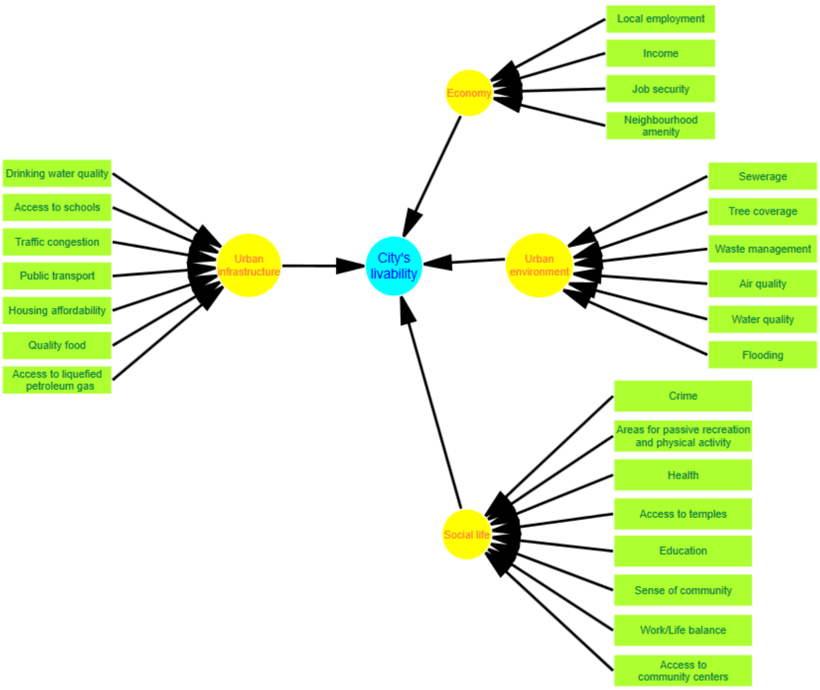


Fig. 2 Hypothetical model of the relationship between variables

10 ตัวชี้วัดที่กรุงเทพฯ รวบรวมข้อมูลแยกเขต เปรียบเทียบระหว่าง พ.ศ.2554 – พ.ศ.2564

ชุดข้อมูลผลจากการทดสอบความแปรปรวนด้วยวิธี One Way ANOVA ค่า P-value ของ Shapiro-Wilk > 0.05 ข้อมูลทั้ง 10 กลุ่มตัวชี้วัดความน่าอยู่มีการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

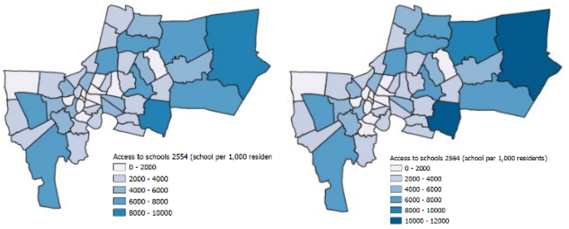


Fig. 3 Access to schools: Amount of school per 1,000 residents

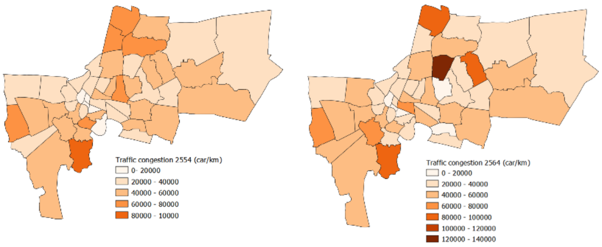


Fig. 4 Traffic congestion: Amount of car per length of urban road

จากชุดข้อมูล Fig.3 แสดงอัตราส่วนจำนวนโรงเรียนต่อจำนวนประชาชน การเข้าถึงโรงเรียนมีจำนวนความต้องการที่ลดลง คิดเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 0.62% และจากชุดข้อมูล Fig. 4 แสดงอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณจำนวนรถสัญจรเทียบระยะทาง มีปริมาณความหนาแน่นของรถที่ลดลงเฉลี่ย 3.37%

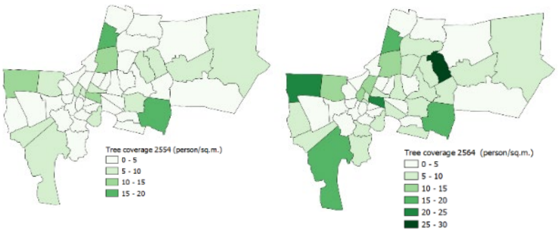


Fig. 5 Tree coverage: Population per green area ratio

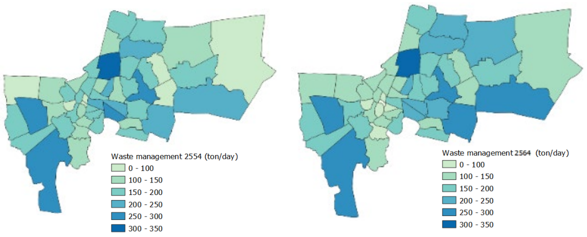


Fig. 6 Waste management: Average amount of waste

จากชุดข้อมูล Fig. 5 แสดงอัตราส่วนประชากรต่อพื้นที่สีเขียว โดยจำนวนพื้นที่สีเขียวมีจำนวนเพิ่มขึ้น คิดเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 57.09% และจากชุดข้อมูล Fig. 6 แสดงปริมาณการจัดการขยะเฉลี่ยต่อวัน โดยปริมาณขยะมีจำนวนขยะที่ต้องจัดการลดลงเฉลี่ย 1.09%

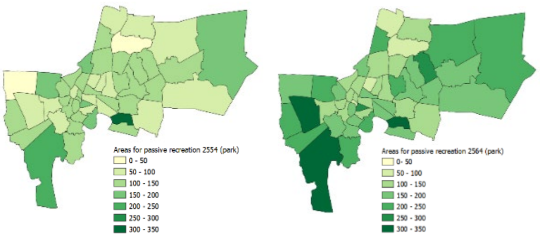


Fig. 7 Areas for passive recreation: Amount of public park

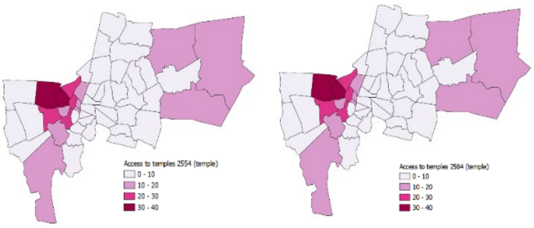


Fig.8 Access to temples: Amount of temple

จากชุดข้อมูล Fig. 7 แสดงจำนวนพื้นที่สาธารณะ เปรียบเทียบจำนวนพื้นที่สาธารณะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 45.48% และจากชุดข้อมูล Fig. 8 แสดงจำนวนสถานที่ศาสนาหรือวัด จะเห็นได้ว่าไม่มีการเพิ่มจำนวนของวัด

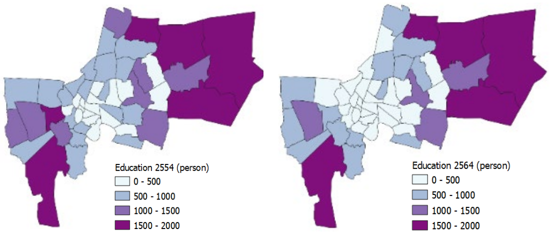


Fig.9 Education: Amount of primary education graduate

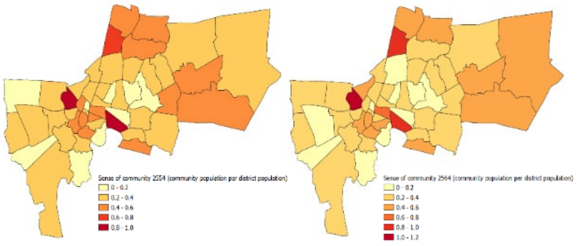


Fig.10 Sense of community: Community population per district population ratio

จากชุดข้อมูล Fig. 9 แสดงจำนวนผู้สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา ซึ่งผู้สำเร็จการศึกษาระดับประถมมีจำนวนลดลงเฉลี่ย 16.41% และจากชุดข้อมูล Fig. 10 แสดงอัตราส่วนประชากรของชุมชนต่อประชากรของเขต ซึ่งมีจำนวนประชากรเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 2.78%

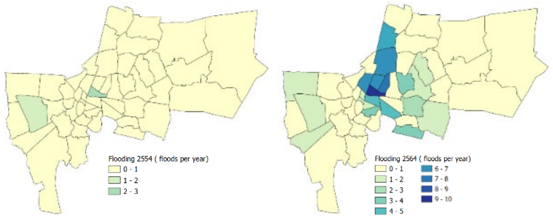


Fig.11 Flooding: Number of floods

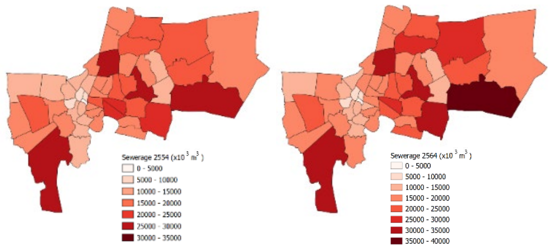


Fig.12 Sewerage: Amount of wastewater

จากชุดข้อมูล Fig. 11 แสดงจำนวนครั้งน้ำท่วมต่อปี เปรียบเทียบมีจำนวนน้ำท่วมเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 100% และจากชุดข้อมูล Fig. 12 แสดงปริมาณน้ำเสีย มีปริมาณการปล่อยน้ำเสียลดลงเฉลี่ย 1.09%

15 ตัวชี้วัดที่กรุงเทพฯ รวบรวมข้อมูลรายจังหวัดโดยไม่แยกเขต เปรียบเทียบระหว่าง พ.ศ.2554 – พ.ศ. 2564

a) คุณภาพน้ำดื่ม ความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐานน้ำสะอาดมาจากปริมาณน้ำที่จำหน่าย (สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล).,สยป.2554))และ (สยป.2564) การให้บริการน้ำที่สะอาดครอบคลุมทุกพื้นที่กรุงเทพฯ โดยเทียบปี พ.ศ. 2554 ปริมาณน้ำที่จำหน่าย 1,317.30 ลบ.ม./ปี และปี พ.ศ. 2564 ปริมาณน้ำที่จำหน่าย 1,416.20 ลบ.ม./ปี

b) การขนส่งสาธารณะ การเข้าถึงระบบสาธารณะจะคิดจากปริมาณจำนวนประชากรที่ใช้รถประจำทางและรถไฟฟ้า (สยป.2554)และ (สยป.,2564) จะเห็นได้ว่าพ.ศ. 2554 จะมีการใช้บริการรถประจำทาง 6,798,255 เที่ยว/คน และรถไฟฟ้า 281,686,142 เที่ยว/คน พ.ศ. 2564 จะมีการใช้บริการรถประจำทาง 2,376,091 เที่ยว/คน และรถไฟฟ้า 172,544,937 เที่ยว/คน

c) ความสามารถในการจัดหาที่อยู่ จำนวนที่อยู่อาศัยที่จดทะเบียนในกรุงเทพฯ โดยแบ่งเป็น บ้านจัดสรร, ห้องชุด/อาคารชุดและปลูกสร้างเอง (สยป.2554)และ (สยป.,2564) โดยเทียบ พ.ศ. 2554 จะมีการจดทะเบียนอยู่ที่ 23,174 หลัง, 78,391 ห้อง, 23,437 หลัง (ตามลำดับ) และ พ.ศ. 2564 จะมีการจดทะเบียนอยู่ที่ 25,064 หลัง, 33,593 ห้อง, 19,166 หลัง (ตามลำดับ)

d) คุณภาพอาหาร จะชี้วัดจากรายงานประจำปี (สำนักอนามัย (สนอ., 2554)) และ (สนอ., 2564) ผลการดำเนินงานตรวจเฝ้าระวังคุณภาพอาหารวิเคราะห์อาหารทั้งด้านเคมีและจุลินทรีย์ พ.ศ. 2554 ทั้งหมด 135,122 ตัวอย่าง ผ่านเกณฑ์ 129,454 ตัวอย่าง (ร้อยละ 95.81) ไม่ผ่านเกณฑ์ 5,669 ตัวอย่าง (ร้อยละ 4.19) และพ.ศ. 2564 ทั้งหมด 140,332 ตัวอย่าง ผ่านเกณฑ์ 138,297 ตัวอย่าง (ร้อยละ 98.55) ไม่ผ่านเกณฑ์ 2,034.81 (ร้อยละ 1.45)

e) การเข้าถึงก๊าซปิโตรเลียมเหลว การเข้าถึงก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะคิดจากปริมาณการจ่ายน้ำมันและเชื้อเพลิงในกรุงเทพฯ (กระทรวงพลังงาน (พน., 2554)) และ (พน., 2564) เทียบสัดส่วนจำนวนครัวเรือน พ.ศ. 2554 ปริมาณการจ่ายน้ำมันและเชื้อเพลงอยู่ที่ 10,584,135 พันลิตร จำนวนครัวเรือน 2,816,711 ครัวเรือน คิดเป็นสัดส่วน 3.76 พ.ศ. 2564 ปริมาณการจ่ายน้ำมันและเชื้อเพลิงอยู่ที่ 4,831,283 พันลิตร จำนวนครัวเรือน 3,103,483 ครัวเรือน คิดเป็นสัดส่วน 1.56

f) การจ้างงานในท้องถิ่น จะคิดจากอัตราและจำนวนร้อยละของผู้มีงานทำ (สยป., 2554) และ (สยป., 2564) โดยปี พ.ศ. 2554 มีอัตราการจ้างงาน 3,878.50 ล้านคน และปี พ.ศ. 2564 มีอัตราการจ้างงาน 5,377.48 ล้านคน คิดเป็นอัตราการจ้างงานเพิ่มขึ้น 38.64%

g) รายได้ เป็นการเปรียบเทียบรายได้ – รายจ่ายเฉลี่ยของประชากรกรุงเทพฯ (สยป., 2554)และ (สยป., 2564) โดยปี พ.ศ. 2554 รายได้รวมอยู่ที่ 5,950.21 ล้านบาท และรายจ่ายอยู่ที่ 4,477.45 ล้านบาท ร้อยละของรายได้จริง (24.75) และปี พ.ศ. 2564 รายได้รวมอยู่ที่ 6,972.85 ล้านบาท และรายจ่ายอยู่ที่ 6,527.96 ล้านบาท ร้อยละของรายได้จริง (6.38)

h) ความมั่นคงในการทำงาน อัตราการว่างงานของประชาชนในกรุงเทพฯ (สยป.2554)และ (สยป.,2564) โดยปี พ.ศ. 2554 จะมีประชาชนว่างงานอยู่ที่ 34,049.06 คน และปี พ.ศ. 2564 จะมีประชาชนว่างงานอยู่ที่ 69,852.78 คน

i) สิ่งอำนวยความสะดวกท้องถิ่น เป็นชุดข้อมูลที่รวบรวมผู้ใช้บริการ 2 ส่วน (สยป.2554)และ (สยป.,2564) คือ ศูนย์เยาวชนกรุงเทพฯและศูนย์กีฬากรุงเทพฯ โดยเก็บข้อมูลจำนวนผู้เข้าใช้บริการ ปี พ.ศ. 2554 มีผู้ใช้บริการอยู่ที่ 7,684,793, 2,582,048 คน ตามลำดับ และปี พ.ศ. 2564 มีผู้ใช้บริการอยู่ที่ 1,768,549, 901,654 คน ตามลำดับ

j) คุณภาพอากาศ เป็นการเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2), ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 และ 10 ไมครอน (PM2.5, PM10) (สยป., 2554)และ (สยป., 2564) โดยปี พ.ศ. 2554 จะมีปริมาณฝุ่นอยู่ที่ 22.06 ppb, 44.51 mg/m^3 และ 33.88 mg/m^3 ตามลำดับ และปี พ.ศ. 2564 จะมีปริมาณฝุ่นอยู่ที่ 16.78 ppb, 23.32 mg/m^3 และ 44.22 mg/m^3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ปริมาณไนโตรเจนไดออกไซต์ (NO_2) ลดลง 23.93%, PM 2.5 ลดลง 47.61% และ PM10 เพิ่มขึ้น 30.52% ตามลำดับ

k) คุณภาพน้ำ เป็นการทดสอบจำนวนจุดตรวจสอบคุณภาพน้ำในคลอง (สยป., 2554) และ (สยป., 2564) แสดงการละลายปริมาณออกซิเจน (BO) 2.0 มก./ลิตร โดยเปรียบเทียบจากจำนวนคลองที่มีคุณภาพน้ำที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยปี พ.ศ. 2554 มีจำนวนคลองผ่านค่า (BO) มาตรฐาน 115 คลอง และ ปี พ.ศ. 2564 มีจำนวนคลองผ่านค่า (BO) มาตรฐาน 153 คลอง

l) อาชญากรรมเปรียบเทียบจาก จำนวนคดีอาชญากรรมต่อประชาชน 100,000 คน (สยป.,2554) และ (สยป., 2564) โดยปี พ.ศ. 2554 จะมีอัตราส่วนจำนวนคดีอาชญากรรมต่อประชาชน 100,000 คน อยู่ที่ (ร้อยละ 141.2) และปี พ.ศ. 2564 จะมีอัตราส่วนจำนวนคดีอาชญากรรมต่อประชาชน 100,000 คน อยู่ที่ (ร้อยละ 83.55)

m) สุขภาพ คิดจากอายุขัยเฉลี่ย (สยป., 2554) และ (สยป., 2564) โดยอายุขัยเฉลี่ย ปี 2554 และ ปี 2564 ประชาชนมีอายุขัยเฉลี่ยอยู่ที่ 77 ปี

n) สมดุลงานและชีวิต เป็นการคิดจำนวนชั่วโมงทำงานต่อวันและต่อสัปดาห์ (สยป., 2554)และ (สยป., 2564) โดยปี พ.ศ. 2554 ประชาชนจะทำงานโดยเฉลี่ยมากที่สุด 40–49 ชั่วโมง/สัปดาห์ คิดเป็นร้อยละของประชาชน (ร้อยละ 39.70) และปี พ.ศ. 2564 ประชาชนจะทำงานโดยเฉลี่ยมากที่สุด 40-49 ชั่วโมง/สัปดาห์ คิดเป็นร้อยละของประชาชน (ร้อยละ 53.00)

o) การเข้าถึงศูนย์ชุมชน เป็นชุดข้อมูลที่รวบรวมผู้ใช้บริการ 6 ส่วน (สยป., 2554) และ (สยป., 2564) คือ ศูนย์ท่องเที่ยว สาธารณสุข ห้องสมุดเพื่อการเรียนรู้ พิพิธภัณฑ์ท้องถิ่น หอศิลป์วัฒนธรรมและลานกีฬากรุงเทพฯ โดยปี พ.ศ. 2554 มีผู้ใช้บริการรวมอยู่ที่ 35,877,150 คน และปี พ.ศ. 2564 มีผู้ใช้บริการรวมอยู่ที่ 24,900,394 คน

จากข้อมูลข้างต้น สามารถนำข้อมูลสรุปรวมและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงได้ดังตารางนี้

Table 1 summarizing the rate of change in livability indicators

Indicator	City livability indicators	Year			Percentage change
		2011	2019*	2021	
Urban infrastructure					
Drink water quality	water supply quantity (million m^3)	1,317.30	1,467.40	1,416.20	+7.51%
Access to schools	average amount of school per 1,000 residents	3,667.17	3,692.11	3,644.53	-0.62%
Traffic congestion	average amount of car	43,271.65	46,966.00	41,812.60	+3.37%
Public transport	number of rounds/people	288,484,397	407,135,945	174,921,028	-39.37%
Housing	dwelling or room	125,002	223,314	77,823	-37.74%
Quality food	number of qualified samples	129,454	131,466	138,297	+6.83%
Access to liquefied petroleum gas	thousand liters	10,584,135	9,041,799	4,831,283	-54.35%
Urban environment					
Sewerage	average amount of wastewater (m^3)	18,264,389.28	18,983,975.96	18,583,942.76	-1.75%
Tree coverage	population per green area ratio (person/m^2)	4.76	6.79	7.47	+57.09%
Waste management	average amount of waste (ton/day)	167.64	240.73	165.82	-1.09%
Air quality (PM2.5)	particulate matter/Particle in air (mg/m^3)	33.88	25.55	23.32	+31.17%
Flooding	average Flood point (floods per year)	1.00	3.00	2.00	-100.00%
Water quality	number of canals with water quality (canals)	115	114	153	+33.04%
Economy					
Local employment	million people	3,878.50	2,183.54	5,377.48	+38.64%
Income	percentage of real income	24.75	9.76	6.38	-74.22%
Job security	person	34,049.06	73,845.40	69,852.78	+105.15%
Neighborhood amenity	service user person	10,266,841	17,636,227	2,670,203	-73.99%
Social life					
Crime	number of crimes per 100,000 people	121.13	56.47	83.55	+31.02%
Areas for passive recreation	average amount of public park (park)	121	166	176	+45.48%
Health	average age (year)	77	77	77	0.00%
Access to temples	average amount of temple (temple)	10	10	10	0.00%
Education	average amount of primary education graduate (person)	752.04	672.00	628.62	-16.41%
Sense of community	community population per district population ratio	0.36	0.36	0.37	+2.78%
Work/Life balance	number of working hours per day and per week	39.70	-	53.00	-33.50%
Access to community centers	service user	35,877,150	22,350,856	24,900,394	-30.60%

*2019 was prior to Covid-19 pandemic

จาก Table 1 ในส่วนของปัจจัยที่เปรียบเทียบ ปี พ.ศ. 2554 – 2564 พบว่า ในด้านโครงสร้างพื้นฐาน คุณภาพน้ำดื่ม คุณภาพอาหารดีขึ้นเล็กน้อย การจราจรที่ติดขัดน่าจะดีขึ้นชั่วคราวเพราะคนเดินทางน้อยในปีที่เกิดโรคระบาด แต่การจัดหาที่อยู่อาศัยและการเข้าถึงพลังงานกลับมีปัญหามากยิ่งขึ้น ส่วนตัวชี้วัดความน่าอยู่ด้านสภาพแวดล้อมในเมือง แม้จะ

มีต้นไม้มากขึ้น คุณภาพอากาศ คุณภาพน้ำที่ดีขึ้น แต่กลับมีทิศทางของขยะและน้ำเสียสูงขึ้นโดยเฉพาะก่อนปีที่เกิดโรคระบาด รวมถึงการเกิดน้ำท่วมก็มีบ่อยครั้งขึ้น ด้านเศรษฐกิจแม้จะมีการจ้างงานในท้องถิ่นและความมั่นคงในงานเพิ่มขึ้น แต่กลับมีรายได้ลดลงมาก ส่วนด้านสังคม พบว่า อาชญากรรมลดลง และพื้นที่สำหรับการพักผ่อนมีมากขึ้น แต่สถานศึกษาลดลง และความสมดุลระหว่างชีวิตการทำงานและส่วนตัวนั้น ลดลง สะท้อนจากชั่วโมงการทำงานที่มากขึ้น

สรุป

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิเกี่ยวกับโครงสร้างพื้นฐานและความน่าอยู่ของกรุงเทพมหานคร พบว่าการเปลี่ยนแปลงในรายละเอียดของแต่ละเขตในแต่ละตัวแปรนั้น อาจแตกต่างกัน โดยในช่วงปี พ.ศ. 2554 – 2564 พบว่า ประชากร ขยะ และน้ำเสีย ลดลงในเขตชั้นใน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในเขตรอบนอก การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานแม้จะมีการก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง แต่ก็ยังไม่สะท้อนมายังตัวชี้วัดที่ส่งผลถึงประชาชนจึงยังไม่เห็นแนวโน้มที่ดีขึ้น ส่วนความน่าอยู่ของเมืองในด้านสภาพแวดล้อม เศรษฐกิจและสังคม มีบางตัวชี้วัดที่ดีขึ้นและบางตัวชี้วัดที่แย่ลง งานวิจัยในส่วนต่อไปจึงจะหาความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน กับความน่าอยู่ของเมืองในเชิงสถิติ เพื่อให้สามารถระบุได้ชัดเจนว่าการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานใด ส่งผลต่อความน่าอยู่ในมิติใด ซึ่งจะทำให้สามารถพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานได้ตรงตามความต้องการของประชาชน สอดคล้องกับการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืนในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กองยุทธศาสตร์ทรัพยากรมนุษย์และสังคม. 2560. บริบทความน่าอยู่ของเมืองกรุงเทพมหานครประเทศไทย. สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล. กรุงเทพฯ.

กองยุทธศาสตร์ทรัพยากรมนุษย์และสังคม. 2560. สถิติกรุงเทพมหานคร. สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล. กรุงเทพฯ.

จิตราวดี ฐิตินันทกร. 2554. กระบวนการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาตัวชี้วัดเมืองน่าอยู่กรณีศึกษาเทศบาลนครสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศูนย์ควบคุมระบบป้องกันน้ำท่วมกรุงเทพมหานคร. 2560. แผนปฏิบัติการป้องกันและแก้ไขน้ำท่วมกรุงเทพมหานคร. สำนักงานระบายน้ำ. กรุงเทพฯ

Khorrami, Z., Ye, T. 2022. The indicators and methods used for measuring urban liveability a scoping review. Environ. Health 2020: 1–40.

Medium. 2018. Livable city, https://medium.com/umapupphachai/livable-city-cabcf74765bc, 24 July 2022.

Yudono, A., Putri. J. 2021. Contribution of community resilience to city's livability with in the framework of sustainable development. Environ. Eng. Manag. J. 2022: 33–47

การเปรียบเทียบผลสำเร็จของโครงการก่อสร้างระหว่างโครงการทีมที่มีประสิทธิภาพและไม่มีประสิทธิภาพ

Comparison of construction project performance between project with efficiency and inefficiency teamwork

ประภัสสร บานสดชื่น*, **ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**

Praphatsorn Bansotchuen*, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: praphatsorn.b@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลสำเร็จของโครงการก่อสร้างระหว่างโครงการทีมที่มีประสิทธิภาพและไม่มีประสิทธิภาพ โดยการเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถาม 42 ชุด โดยให้ผู้ตอบแบบสอบถามให้ข้อมูลคนละ 2 โครงการ คือโครงการที่ทีมไม่มีประสิทธิภาพและโครงการที่ทีมมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากประสบการณ์ของแต่ละคน พบว่าในโครงการที่ทีมมีประสิทธิภาพ ผลสำเร็จของโครงการจะดีกว่าในทุกตัวชี้วัดความสำเร็จของโครงการทั้งด้านต้นทุน และระยะเวลาก่อสร้าง โดยทีมโครงการที่มีประสิทธิภาพเชื่อว่าปัจจัยที่สำคัญต่อทีมคือโดยทีมโครงการที่มีประสิทธิภาพเชื่อว่าปัจจัยที่สำคัญต่อทีมที่ดีคือความสัมพันธ์ระหว่างสมาชิกในทีมโดยเฉพาะการมีส่วนร่วมในการตัดสินใจในโครงการ และความเชื่อใจเคารพกัน เห็นคุณค่าความสำคัญของความรู้และประสบการณ์ที่แต่ละคนมีต่อโครงการ

คำสำคัญ: การเชื่อใจกัน, การตัดสินใจแบบมีส่วนร่วม, การเห็นคุณค่า, ความสำเร็จของโครงการ, ประสิทธิผลของทีม

Abstract

This study aims to compare construction project performance between project with efficiency and inefficiency teamwork. Data was collected from 42 professionals. Each respondent identify their most effective and ineffective construction team one has ever experienced and assess variables in the questionnaire for both projects. It was found that project with good team performed better in all aspects including costs and construction time. It also revealed that factors found in good team were relationship within team especially participative decision making. Moreover, trust and value among team members were also found important especially in appreciation of each team member's contribution to the project.

Keywords: Appreciation, Participative decision, Project performance, Team effectiveness, Trust

คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่สำคัญ ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างสามารถเป็นตัวชี้วัดการเติบโตของเศรษฐกิจและการพัฒนาระบบสาธารณูปโภค โครงสร้างพื้นฐานที่ส่งผลคุณภาพชีวิตของประชาชน รวมถึงภาคเอกชนการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ โรงงาน เป็นต้น การพัฒนาคุณภาพของโครงการก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพให้เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุน การบริหารจัดการโครงการก่อสร้างมีหลายปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของทีมและความสำเร็จของโครงการ ซึ่งทีมจะมีการสรุปประสิทธิภาพตามเป้าหมายที่สำเร็จเท่านั้น ซึ่งหมายถึงต้นทุนโครงการ ระยะเวลาโครงการ และคุณภาพ ปัจจัยความสำเร็จทั้งสามนี้สามารถวัดได้โดยการประเมินโครงการแบบมาตรฐานที่หลายๆบริษัท หลายๆองค์กร ใช้ประเมินโครงการ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยด้านอื่นๆ รวมไว้ด้วยเพื่อวัดความสำเร็จของโครงการ Pinto (1990) และ Ashley et al. (1987) เสนอแนะปัจจัยที่จะรวมเป็นส่วนหนึ่งของการวัดความสำเร็จของโครงการของปัจจัยที่มีลักษณะจับต้องไม่ได้ ได้แก่ ความพึงพอใจของลูกค้าและประสิทธิภาพของสมาชิกในทีม ซึ่ง Essens et al. (2005) ยังให้การสนับสนุนแนะนำว่าการบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการอาจเป็นการวัดประสิทธิภาพของทีมที่ไม่ถูกต้อง เพราะอาจมองข้ามปัจจัยที่ไม่สามารถจับต้องได้นี้ Mohrman et al.(1995) กำหนดประสิทธิผลของทีมโดยพิจารณาจากสามด้าน อันดับแรกทีมงานประสิทธิภาพมีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของลูกค้า ประการที่สองการทำงานแบบช่วยเหลือซึ่งกันและกัน ประการที่สามความพึงพอใจของทีมกับการเป็นสมาชิกทีม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลสำเร็จของโครงการก่อสร้างระหว่างโครงการทีมที่มีประสิทธิภาพและไม่มีประสิทธิภาพ เพื่อระบุปัจจัยที่สำคัญในการสร้างเสริมทีมโครงการที่มีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

วิธีการศึกษา

ในขั้นตอนการศึกษาวิจัยการเปรียบเทียบผลสำเร็จของโครงการก่อสร้างระหว่างโครงการทีมที่มีประสิทธิภาพและไม่มีประสิทธิภาพ ดำเนินการสอบทบทวนวรรณกรรมอย่างละเอียดที่ส่งผลให้เกิดความสำเร็จของโครงการและประสิทธิภาพของทีม การค้นพบหลายวรรณกรรมที่กล่าวถึงวิวัฒนาการในด้านต่างๆ วรรณกรรมส่วนใหญ่เกี่ยวกับผลสำเร็จของโครงการและประสิทธิภาพของทีมโครงการก่อสร้าง มุ่งเน้นให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ส่งผลกับทีมโครงการก่อสร้าง การอธิบายที่จะแยกแยะปัจจัยความสำเร็จที่สำคัญต่างๆ (Critical Success Factors: CSFs) สำหรับปัจจัยที่ส่งความผลต่อความสำเร็จของการโครงการก่อสร้างและประสิทธิภาพของทีม ซึ่งการเก็บรายละเอียดข้อมูลของผู้เชี่ยวชาญด้านต่างๆที่ เกี่ยวข้องกับโครงการแต่ละองค์ประกอบของงานที่แตกต่างกัน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาเพื่อระบุปัจจัยหลักแห่งความสำเร็จ (Critical Success Factors: CSFs) สำหรับวัตถุประสงค์ของประเภทของโครงการต่าง ๆ โดยการได้ทำการสำรวจข้อมูลจำนวน 42 ชุดข้อมูล ในกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามอยู่ในอุตสาหกรรมก่อสร้างและหลายบทบาทในอุตสาหกรรมก่อสร้าง หลากหลายหน้าที่ในโครงการก่อสร้าง ซึ่งเป็นผู้ที่มีความชำนาญและประสบการณ์ทำงานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง รายละเอียดของผู้ให้สัมภาษณ์แสดงดัง Table 1

Table 1 A profile of the interviewees.

Interviewees	Years of experience in the construction industry				
	0–5 years	6–10 years	11–15 years	16–20 years	More than 20 years
Civil engineering	5	6	4	2	7
M&E engineer	4	5	-	2	1
Architect	-	2	2	-	2
Total	9	13	6	4	10

แบบสอบถาม

จากทำการทบทวนวรรณกรรมจึงสามารถแบ่งแบบสอบถามออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ปัจจัยส่งผลต่อประสิทธิภาพของทีมและความสำเร็จของโครงการที่มีประสิทธิภาพ และปัจจัยส่งผลต่อประสิทธิภาพของทีมและความสำเร็จของโครงการที่ไม่มีประสิทธิภาพ โดยผู้ตอบแบบสอบถามจะมีความคิดเห็นต่อโครงการที่เลือก 2 โครงการ ที่เป็นโครงการที่มีประสิทธิภาพ และไม่มีประสิทธิภาพในประการณ์การทำงานที่ผ่านมา ทั้ง 89 ข้อ ผู้ตอบแบบสอบถามถูกขอให้จัดอันดับในระดับ Likert 1ถึง 5 (โดยที่ 1 = ไม่จริงเลย, 2 = จริงบางส่วน, 3 = จริงปานกลาง, 4 = จริงมาก, 5 = จริงที่สุด)

ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบสอบถามจะนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรม SPSS version 23 และวิเคราะห์แต่ละส่วนแตกต่างกัน ส่วนแรกจะวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลความสำเร็จของโครงการแบบสอบถามโดยใช้ค่าร้อยละ ส่วนที่สองและส่วนที่สาม แบบสอบถามที่ได้ทั้งเก็บสำรวจและนำมาวิเคราะห์ผลมีทั้งหมด 42 ฉบับ โดยแบ่งเป็น ผู้ชาย 73.81% ผู้หญิง 26.19% ประสบการณ์การทำงานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง น้อยกว่า 0–5 ปี 21.43%, 6–10 ปี 30.95%,11–15 ปี 14.29%,16–20 ปี 9.52% และมากกว่า 20 ปี 23.81%

ผลลัพธ์และอภิปรายผล

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงการ

องค์ประกอบของการาประเมินปัจจัยเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการศึกษานี้เพื่อระบุปัจจัยอันดับต้น ๆ ที่ขับเคลื่อนทีมก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงเมื่อระบุได้แล้ว การวิจัยสามารถได้รับการพัฒนาสำหรับการศึกษานี้เพื่อสามารถบ่งชี้ความสำเร็จของโครงการ การนำเสนอและอภิปรายผลลัพธ์จากข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์จากแบบสอบถามในส่วนที่สองและส่วนที่สามนั้น ได้ใช้มาตราส่วนวัด Likert 1 ถึง 5 ในการตอบแบบสอบถามส่วนที่สอง มีตัวแปรทั้งหมด 89 ตัวแปร แสดงดัง Table 2

Table 2 Factors related to team performance.

No.	Factors related to team performance	Good team Mean	Good team Rank	Bad team Mean	Bad team Rank	Different Mean	Different Rank
1	Project team goals and objectives						
1.1	I understand the goals and objectives of this team.	4.19	4	3.36	1	0.83	3
1.2	Members understand the goals and objectives of the team.	4.00	18	2.79	17	1.21	1
1.3	Members agree on the goals and objectives.	3.98	24	2.88	12	1.10	12
1.4	Team goals and objectives align with members' goals.	3.93	29	2.71	19	1.21	10
1.5	The team is committed to team goals and objectives.	4.24	1	2.93	11	1.31	-10
1.6	The team achieves the set team goals and objectives.	4.17	7	2.67	27	1.50	-20
2	Project team leadership						
2.1	I feel comfortable with shared leadership in team.	4.00	17	2.57	34	1.43	-17
2.2	I feel comfortable with team's decision process.	3.86	34	2.48	39	1.38	-5
2.3	I try to clarify and understand the project team's expectations.	3.95	26	2.71	20	1.24	6
2.4	Team exercises good judgment during the decision process.	3.86	36	2.69	23	1.17	13
2.5	Members always provided info, knowledge, exp and ideas.	4.02	16	2.69	21	1.33	-5
2.6	I help team whenever one is struggling to complete job.	4.07	13	3.00	9	1.07	4
3	Project team roles and responsibility						
3.1	Members are willing to do tasks not directly assigned to them.	3.62	47	2.40	44	1.21	3
3.2	I am willing to help with urgent problems in projects.	4.14	8	3.21	5	0.93	3

No.	Factors related to team performance	Good team		Bad team		Different	Different
		Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank
3.3	Member of the team is willing to help with urgent problems.	3.79	45	2.60	32	1.19	13
3.4	I have a clear understanding of my role in the team.	4.17	6	3.33	3	0.83	3
3.5	Members have a clear understanding of their roles in the team.	3.86	35	2.88	13	0.98	22
3.6	I agree with the roles and resp. assigned to me.	4.12	10	3.05	8	1.07	2
3.7	Members have the expertise to perform the project tasks.	3.93	28	2.83	15	1.10	13
3.8	I clearly understand the resp. assigned to me.	4.19	3	3.33	2	0.86	1
3.9	Members clearly understand the resp. assigned to them.	4.07	12	2.67	29	1.40	-17
4	Project team relationship						
4.1	I was able to handle the conflicts in team.	3.81	40	2.38	46	1.43	-6
4.2	Team has an effective conflict management process.	3.81	39	2.24	48	1.57	-9
4.3	Team works together constructively solve issues.	3.86	33	2.29	47	1.57	-14
4.4	I have sincere concerns for all members.	4.10	11	2.98	10	1.12	1
4.5	Members have sincere concern for one another.	3.81	38	2.43	43	1.38	-5
4.6	Project teams make good decisions about projects.	3.90	31	2.45	42	1.45	-11
4.7	Decisions were made with participation from all members.	3.98	21	2.19	49	1.79	-28
4.8	I have assumed a fair proportion of resp. in project.	3.95	27	2.64	30	1.31	-3
4.9	Members admonish each other with good intentions.	3.81	42	2.48	40	1.33	2
5	Trust and values within the project team						
5.1	I was treated with respect by team.	4.12	9	2.69	22	1.43	-13
5.2	All team members treat each other with mutual respect.	3.98	22	2.62	31	1.36	-9
5.3	I trust every member of the team to make decisions.	4.02	15	2.69	24	1.33	-9
5.4	All team members trust each other.	3.81	41	2.52	36	1.29	5
5.5	Members value each other for what they contribute to.	3.98	20	2.50	38	1.48	-18
5.6	The project team members support each other.	3.90	32	2.45	41	1.45	-9
5.7	My contribution is recognized and appreciated by team.	3.98	19	2.67	28	1.31	-9
5.8	I believe trust is an important for teamwork.	4.19	2	3.26	4	0.93	-2
5.9	Team believes mutual trust is an important to teamwork.	4.17	5	2.81	16	1.36	-11
6	Project team communication						
6.1	Communication is a two-way between each other.	3.83	14	2.55	25	1.29	-11
6.2	Members take part in discussions at meetings.	3.90	30	2.38	45	1.52	-15
6.3	I'm always involved in this project team meeting.	3.79	43	2.83	14	0.95	29
6.4	The members of this project team have mutual trust.	3.79	44	2.52	37	1.26	7
6.5	Team meetings are well managed and facilitated efficiently.	3.76	46	2.79	18	0.98	28
6.6	Team meeting will result in a clear outcome.	3.95	25	2.67	26	1.29	-1
6.7	At this project team meeting, there were disagreements.	3.50	49	3.19	7	0.31	42
6.8	Communication outside of meeting was effective.	3.55	48	2.57	33	0.98	15
6.9	I have sincere best wishes to members of team.	3.98	23	3.19	6	0.79	17

จาก Table 2, การวิเคราะห์ปัจจัยที่เอื้อต่อการระบุทีมที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับโครงการที่มีประสิทธิภาพได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของทีมมากที่สุดคือ ความมุ่งมั่นที่จะบรรลุเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของทีมโครงการเป็นสิ่งสำคัญ (mean = 4.24) ความไว้วางใจ เชื่อใจกัน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของการทำงานเป็นทีม (Mean = 4.19) เข้าใจความรับผิดชอบที่ได้รับมอบหมายจากทีมโครงการอย่างชัดเจน (mean = 4.19) ตามลำดับ และสำหรับโครงการที่ไม่มีประสิทธิภาพได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยดังนี้ เข้าใจเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของทีมโครงการ (mean = 3.36) เข้าใจความรับผิดชอบที่ได้รับมอบหมายจากทีมโครงการอย่างชัดเจน (mean = 3.33) มีความเข้าใจ

ชัดเจนเกี่ยวกับบทบาทหน้าที่ในส่วนที่มีต่อทีมโครงการก่อสร้าง (mean = 3.33) จากค่าเฉลี่ยปัจจัยของโครงการที่มีและไม่มีประสิทธิภาพที่สุดเห็นได้ชัดว่าโครงการที่มีประสิทธิภาพจะมีค่าเฉลี่ยที่แสดงให้เห็นว่าเห็นด้วยกับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของทีมโครงการและโครงการที่มีประสิทธิภาพมักจะทำได้ดีกว่าโครงการที่ไม่มีประสิทธิภาพเป็นนัยสำคัญ ตั้งแต่พิจารณาภาพรวมโครงการที่ประเมินทีมโครงการที่ดำเนินการได้ดีและไม่ดี

ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลช่วงเกณฑ์ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน บ่งชี้ว่าทุกปัจจัยของประสิทธิภาพของทีมโครงการโครงการที่ประสบความสำเร็จจะมีเกณฑ์คะแนนที่ดีกว่าทุกปัจจัยของโครงการที่ไม่ประสบความสำเร็จ และช่วงคะแนนที่ห่างกันนี้ชี้ให้เห็นถึงการให้ความสำคัญของปัจจัยนั้นแตกต่างกันตามส่วนต่างค่าเฉลี่ย โดยปัจจัยที่ให้ความสำคัญต่างกันมากที่สุดคือ การตัดสินใจในโครงการเกิดขึ้นจากการมีส่วนร่วมของสมาชิกในทีมทุกคน (Project team relationship) (Diff. mean = 1.79) และปัจจัยที่มีส่วนต่างค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดบ่งบอกว่าทั้งทีมโครงการที่มีและไม่มีประสิทธิภาพให้ความสำคัญไม่แตกต่างกันนั้นคือปัจจัย การประชุมทีมโครงการมีความคิดเห็นที่ไม่ตรงกันเกิดขึ้น(Project team communication) (Diff. mean = 0.31) แต่ไม่ได้บ่งบอกว่าเป็นปัจจัยที่ให้ความสำคัญอยู่ในระดับเดียวกัน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ

การเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการระหว่างโครงการที่มีประสิทธิภาพและโครงการที่ไม่มีประสิทธิภาพในทัศนคติและประสบการที่เคยผ่านมาของผู้ตอบแบบสำรวจคือกำหนดปัจจัยหลักจากการทบทวนวรรณกรรมที่ใช้ในการประเมินผลการดำเนินโครงการ มีเจ็ดประสิทธิภาพของโครงการที่ใช้เป็นแบบสำรวจประสิทธิภาพของโครงการดังแสดงใน Table 3

Table 3 Factors related to project success.

No.	Factors related to project success	Good project		Bad project		Different	Different
		Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank
1	Overall satisfaction						
1.1	Team successfully executed the project objectives.	4.19	3	2.62	17	1.57	-14
1.2	I am pleased with the final output of this project.	4.26	2	2.43	34	1.83	-32
1.3	Team uses an efficient doc. management system.	3.88	25	2.57	23	1.31	2
1.4	The project completed with pre-set quality.	4.10	5	2.62	18	1.48	-13
1.5	The construction site is always clean and tidy.	3.67	36	2.48	33	1.19	3
2	Project phases and tasks aspects						
2.1	Project planning is realistic.	3.69	35	2.48	32	1.21	3
2.2	Project construction has been very successful.	3.88	23	2.29	38	1.60	-15
2.3	Project focus on quality of the project design.	4.02	12	2.83	5	1.19	7
2.4	Detailed information of the design is well thought.	3.69	34	2.40	36	1.29	-2
2.5	Quality is checked at every stage.	3.95	21	2.76	11	1.19	10
2.6	The process ensure good quality over project life.	4.00	16	2.83	7	1.17	9
3	Project schedule aspect						
3.1	Project was completed on time as scheduled.	3.88	26	2.50	29	1.38	-3
3.2	Allow time for unforeseen conditions.	3.79	31	2.52	28	1.26	3
3.3	Team raised awareness of urgency to keep deadline.	4.07	8	2.69	14	1.38	-6
3.4	Always revise plan in accordance with the actual operations.	4.02	11	2.52	27	1.50	-16
3.5	Important milestones are closely monitored.	4.31	1	2.98	3	1.33	-2
3.6	Project reports and doc. are delivered on time.	3.79	30	2.74	12	1.05	18

No.	Factors related to project success	Good project		Bad project		Different	Different
		Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank
4	Project cost aspect						
4.1	This project was completed within the budget.	3.74	33	2.40	35	1.33	-2
4.2	Contractor presented alternatives to reduce cost.	3.64	37	2.50	30	1.14	7
4.3	Project costs are constantly monitored.	3.93	22	3.02	2	0.90	20
4.4	Overall project cost is constantly monitored.	3.98	17	3.05	1	0.93	16
5	Change management aspect						
5.1	Project has no flaws during construction.	3.29	39	2.02	40	1.26	-1
5.2	Project modification is based on the cost not value.	2.98	40	2.79	9	0.19	31
5.3	Change order process are clear in this project.	3.74	32	2.48	31	1.26	1
5.4	Project is always flexible to accommodate changes.	3.48	38	2.38	37	1.10	1
5.5	Change order process is well managed by team.	3.88	24	2.55	25	1.33	-1
6	Project safety aspect						
6.1	Safety is clearly a priority in this project.	4.07	7	2.88	4	1.19	3
6.2	Workplace safety procedures are ensure for success.	4.00	15	2.74	13	1.26	2
6.3	Good mgt of safety and accident records and reports.	4.07	6	2.79	8	1.29	-2
6.4	Safety checks are carried out on a regular basis.	4.00	14	2.64	15	1.36	-1
6.5	Accident statistics are reported regularly.	3.86	27	2.83	6	1.02	21
6.6	The project team set specific safety goals.	4.05	9	2.76	10	1.29	-1
7	Project team members' performance						
7.1	Contractor demonstrated good service.	3.86	28	2.60	20	1.26	8
7.2	Contractor demonstrated good technical competence.	4.02	10	2.52	26	1.50	-16
7.3	Project employs professionals with suitable skills.	3.81	29	2.55	24	1.26	5
7.4	Project contract team are friendly and trusting.	3.95	20	2.64	16	1.31	4
7.5	Members demonstrated their essential expertise.	4.00	13	2.60	19	1.40	-6
7.6	Team effectively communicate with project owner.	3.95	19	2.57	21	1.38	-2
7.7	Project team responded quickly and professionally.	3.98	18	2.57	22	1.40	-4
7.8	I would like to work with this project team again.	4.12	4	2.12	39	2.00	-35

จาก Table 3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ เนื่องจากการวิจัยมองหาบทบาทของโครงการที่มีประสิทธิภาพของโครงการที่มีและมีประสิทธิภาพ ทำการพิจารณาว่าปัจจัยใดที่ผู้ตอบแบบสำรวจให้ความสำคัญในโครงการที่มีและไม่มีประสิทธิภาพในทัศนคติของผู้ตอบแบบสอบถาม ปัจจัยที่ให้ความสำคัญมากที่สุดในโครงการที่สำเร็จที่สุดคือ ให้ความสำคัญเหตุการณ์หลัก (Milestones) หรือวิกฤติได้รับการติดตามอย่างใกล้ชิด (mean = 4.31) ทีมโครงการพอใจกับผลงานสุดท้ายที่ออกมาของโครงการ (mean = 4.26)และทีมงานโครงดำเนินการประสบความสำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ (mean = 4.19) ในโครงการที่ดีให้ความสำคัญกับการตัดสินใจแก้ไขงานโดยรื้อทำใหม่ขึ้นอยู่กับต้นทุนในการรื้อทำใหม่ ไม่ใช่คุณค่าของงานต่อลูกค้า (mean = 2.98) น้อยที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าความพึงพอใจของลูกค้าเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ

จากค่าเฉลี่ยปัจจัยของโครงการที่ไม่มีประสิทธิภาพที่สุดได้ให้ความสำคัญกับต้นทุนโครงการได้รับการติดตามอย่างต่อเนื่อง (mean = 3.05) การติดตามต้นทุนก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง (mean = 3.02) ให้ความสำคัญเหตุการณ์หลัก (Milestones) หรือวิกฤติได้รับการติดตามอย่างใกล้ชิด (mean = 2.98) ในโครงการที่ไม่มีประสิทธิภาพได้ให้ความสำคัญกับการไม่มีข้อบกพร่อง สิ่งที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างการก่อสร้าง (mean = 2.02) เข้าใจได้ว่าปัญหาและการแก้ไขปัญหา

ระหว่างการดำเนินงานก่อสร้างเป็นเรื่องปกติ ที่สามารถเกิดขึ้นได้เป็นธรรมดาและมักถูกแก้ไขด้วยกระบวนการทางวิศวกรรม

สรุปผลงานวิจัย

ผลการศึกษานี้ประสิทธิภาพของทีมเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของทีมโครงการ (Project team goals and objectives) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดและความไว้วางใจ ค่านิยมภายในทีมงานโครงการ (Trust and values within the project team) เป็นปัจจัยที่สองของการศึกษานี้ และบทบาทและความรับผิดชอบของทีมโครงการ (Project team roles and responsibility) เป็นปัจจัยที่สามที่ให้ความสำคัญ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของทีม

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการความพึงพอใจโดยรวม (Overall satisfaction), ประสิทธิภาพของทีมในด้านความปลอดภัยของโครงการ (Project safety aspect), ประสิทธิภาพของทีมในด้านต้นทุนโครงการ (Project cost aspect) เรียงตามลำดับความสำคัญของปัจจัยประสบความสำเร็จ ทีมมีผู้จัดการโครงการที่มีประสิทธิภาพซึ่งสามารถจัดการได้ ความชัดเจนในบทบาทและความรับผิดชอบผ่านการกล่าวถึงและการจัดการการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

ดังนั้นสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของทีมเป็นสิ่งสำคัญในการก่อสร้าง ทีมงานโครงการและประสิทธิภาพของโครงการประสิทธิภาพของทีม มีผลกระทบต่อการดำเนินงานโครงการก่อสร้าง ผู้จัดการโครงการมีหน้าที่รับผิดชอบหรือดูแลให้สมาชิกในทีมทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพบรรลุเป้าหมายโครงการและมีทรัพยากรที่จำเป็นในการเสร็จสิ้นภารกิจและวัตถุประสงค์ของพวกเขา สำหรับทีมงานโครงการก่อสร้างได้รับการประเมินในความพยายามที่จะบรรลุเป้าหมายโครงการตาม ตามการวัดประสิทธิภาพของโครงการที่แตกต่างกัน เช่น เวลา ต้นทุนคุณภาพของงานที่ดำเนินการเจ้าของความพึงพอใจ ทีมงานโครงการ แนวปฏิบัติด้านความปลอดภัย และเขาการจัดการการเปลี่ยนแปลงที่ดำเนินการในโครงการได้ดี ซึ่งมีความแตกต่างจากผลการศึกษาจากต่างประเทศที่ให้ความสำคัญกับความเป็นผู้นำของทีมโครงการเป็นอันดับแรกที่คาดหวัง การศึกษาปัจจัยเหล่านี้เพื่อช่วยในการให้การมุ่งเน้นให้ความสำคัญปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงการและทีมเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ

เอกสารอ้างอิง

Ashley, D.B., Laurie, C.S., Jaselskis, E.J. 1987. Determinants of construction project success, Proj. Manage. J. 18: 69–79.

Essens, P., Vogelaar, A., Belgium, J.M., Blendell, C., Paris, C., Halpin, S., Baranski, J. 2005. Military Command Team Effectiveness: Model and Instrument for Assessment and Improvement (L'efficacite des Equipes de Commandement Militaires: Un Modele et un Instrument Pour L'evaluation et L'amelioration).

Mohrman, S.A., Cohen, S.G., Mohrman Jr., A.M. 1995. Designing team-based organizations: New forms for knowledge work. San Francisco, CA, US, Jossey-Bass.

Pinto, M.B., Pinto, J.K. 1990. Project team communication and cross-functional cooperation in new program development. Journal of Product Innovation Management 7: 200–212.

การประยุกต์ข้อมูล GRACE-FO เพื่อใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของน้ำบาดาล

Application of GRACE-FO data to monitor groundwater changes

สิทธิกร แพงพุฒ[a,*], **สรวิศ สุภเวชย์**[b], **อนุเผ่า อบแพทย์**[b]

Sittikorn Pangput[a,*], Soravis Supavetch[b], Anuphao Aobpaet[b]

[a]วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Infar Structure and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sittikorn.pa@ku.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาข้อมูลจาก GRACE & GRACE-FO ซึ่งเป็นดาวเทียมที่ใช้วัดความผิดปกติของแรงโน้มถ่วงโลกเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงในการกักเก็บน้ำทั้งหมด (TWS) โดยนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือคำนวณการเปลี่ยนแปลงของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ซึ่งเป็นเทคนิคการสำรวจระยะไกล เป็นทางเลือกที่นำมาใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงการจัดเก็บน้ำบาดาล โดยใช้ข้อมูล TWS จากดาวเทียม GRACE-FO ช่วง ธันวาคม พ.ศ. 2561 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565 การเปลี่ยนแปลงการกักเก็บน้ำบาดาลจะประมาณจากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงใน TWS ใช้ประกอบกับข้อมูลอุทกวิทยาน้ำผิวดิน เมื่อได้ผลแล้วนำมาเทียบเคียงกับข้อมูลบ่อสังเกตการณ์ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ผลจากการเทียบเคียงพบว่าการเปลี่ยนแปลงของการกักเก็บน้ำบาดาลที่ได้มาจาก GRACE-FO ให้ผลลัพธ์ที่ไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลสถิติที่วัดและบันทึกได้จากบ่อสังเกตการณ์ สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการประเมินและติดตามบริหารจัดการใช้น้ำบาดาลได้อีกแนวทาง

คำสำคัญ: การสำรวจระยะไกล, ติดตามน้ำบาดาล, น้ำบาดาล, ดาวเทียม GRACE-FO

Abstract

This article presents the results of a study from GRACE & GRACE-FO, a satellite used to measure global gravity anomalies to assess changes in total water storage (TWS). The results were applied as a tool to calculate changes in groundwater in the study area, which is a remote sensing technique that selected for monitor changes in groundwater storage. This method was using TWS data from GRACE-FO satellites in period of December 2018 to January 2022. Changes in groundwater storage were estimated from calculated changes of TWS, and together with surface water hydrology data. The obtained data were compared with the data from observation wells of the Department of Groundwater Resources. The results show that changes data that derived from GRACE-FO satellites providing the similar results from the observation wells. Therefore, this technique could be an alternative method to assess and monitor groundwater resource.

Keywords: GRACE-FO Satellite, Groundwater, Groundwater monitoring, Remote sensing

คำนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันกำลังมีความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และสังคมเป็นอย่างมากทั้งด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม การท่องเที่ยวและจำนวนประชากรมากขึ้นทำให้ภาครัฐจำเป็นจะต้องมีภาระหน้าที่ในการจัดการด้านสาธารณูปโภคให้เพียงพอต่อความต้องการ เช่น ไฟฟ้า และน้ำประปา เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดหาน้ำประปาให้ครอบคลุมทั่วประเทศอย่างเช่น ระบบไฟฟ้านั้นกระทำได้โดยยาก เนื่องจากปัจจัยที่สำคัญคือแหล่งน้ำดิบ ซึ่งบางพื้นที่ก็ไม่สามารถ จัดหาได้ตามความต้องการ ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ แหล่งกักเก็บน้ำตามธรรมชาติได้แก่ ลำน้ำ หนอง คลอง บึง เป็นต้น การพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลจึงจำเป็นทางเลือกที่จำเป็นและสำคัญ เพื่อ ทดแทนสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้องกับน้ำสำหรับการอุปโภคบริโภค และประกอบการธุรกิจต่างๆ การสูบน้ำขึ้นมาใช้เป็นจำนวนมากโดยขาดมาตรการเฝ้าระวังติดตามและประเมินผล อาจจะก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมได้ อาทิเช่น การรุกล้ำของน้ำเค็มเข้าสู่แหล่งน้ำบาดาล แผ่นดินทรุด การปนเปื้อนจากการแพร่กระจายของสารพิษต่าง ๆ และการขาดแคลนแหล่งน้ำบาดาลอย่างถาวร เป็นต้น

ในประเทศไทยการติดตามและตรวจวัดระดับน้ำบาดาลที่ดำเนินการในปัจจุบันของกรมทรัพยากรบาดาล ทำได้โดยเจาะบ่อสังเกตการณ์แล้วใช้เครื่องมือในการวัดระดับและเก็บค่าไว้ในรูปแบบ Data Logger แล้วนำมารายงานในรูปแบบกราฟเพื่อติดตามเฝ้าสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลงระดับของน้ำบาดาล

โครงการ Gravity Recovery And Climate Experiment หรือ GRACE/GRACE-FO ที่ก่อตั้งโดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) และองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติเยอรมัน เป็นดาวเทียมที่ทำการวัดสนามแรงโน้มถ่วงโลกของโลก (Gravity Field) ซึ่งสนามแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของมวลสารของโลกในช่วงเวลาต่างๆ ความหนาแน่นของมวลสารโลกมีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งน้ำในมวลสารดังกล่าวเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของมวลสารโลกทำให้สามารถนำมาศึกษาและวิเคราะห์เพื่อใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงระดับของน้ำบาดาล การบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของมวลสารโลกที่เกิดขึ้น GRACE/GRACE-FO สามารถทำการบันทึกเหตุการณ์ของการเปลี่ยนแปลงของสนามแรงโน้มถ่วงโลกของโลก โดยดาวเทียมสามารถวัดสนามแรงโน้มถ่วงในบริเวณต่างๆของโลกได้หมดภายในรอบหนึ่งเดือน ข้อมูลที่ได้เป็นผลรวมของอิทธิพลของสนามแรงโน้มถ่วงอันเกิดจากน้ำทะเลน้ำใต้ดินและทุกๆ อย่างบนผิวโลก

ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำทั้งหมดจากข้อมูลดาวเทียม GRACE/GRACE-FO ระหว่างเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565 ประมวลผลคู่กับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจากข้อมูลอุทกวิทยา (Hydrology Data) ของพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาขนาด 2557 ตารางกิโลเมตรที่เลือกใช้เป็นพื้นที่ศึกษาในช่วงเวลาเดียวกัน ให้เหลือเป็นปริมาณน้ำใต้ดินที่แปลผลวัดได้จากดาวเทียม GRACE/GRACE-FO แล้วนำมาเทียบเคียงกับข้อมูลการวัดระดับน้ำบาดาลในสนามที่ตรวจวัดในพื้นที่ทำการศึกษาว่าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำทั้งหมดที่ได้จากการแปรผลนี้มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดจากบ่อสังเกตการณ์ระดับน้ำบาดาลอย่างไร สามารถที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมืออีกหนึ่งวิธีการได้หรือไม่ เพื่อประยุกต์ใช้ในการเฝ้าสังเกตและติดตามสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของน้ำบาดาลต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

ใช้พื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาในการเป็นพื้นที่เพื่อทำการศึกษา จังหวัดพระนครศรีอยุธยาตั้งอยู่บริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างของประเทศอยู่ในพื้นที่ ลองจิจูดที่ 100° ถึง 101° และ ละติจูดที่ 14° ถึง 15° มีระยะห่างจาก

กรุงเทพมหานครทางถนนสายเอเชีย ประมาณ 75 กิโลเมตร ทางรถไฟประมาณ 72 กิโลเมตร และทางเรือประมาณ 103 กิโลเมตร มีเนื้อที่ประมาณ 2,556.64 ตารางกิโลเมตร ลักษณะภูมิประเทศ เป็นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นทุ่งนา ไม่มีภูเขา ไม่มีป่าไม้ มีแม่น้ำไหลผ่าน 4 สาย ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำลพบุรีและแม่น้ำน้อย ซึ่งมีระบบตรวจวัดปริมาณน้ำท่าของกรมชลประทานครอบคลุมทั้งหมด

ข้อมูล

การเตรียมข้อมูลปริมาณน้ำทั้งหมดจาก GRACE-FO

ข้อมูล Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface Mass Anomaly ชุดข้อมูล CSR TELLUS GRACE-FO Level-3 ของ GRACE-FO ในช่วงเวลาที่ศึกษาจาก Website Earth data NASA Official ดาวน์โหลดข้อมูลในช่วงเวลาที่ศึกษาคือ เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565 จากเว็บไซต์ของนาซา (NASA)ลิงค์ https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_GRFO_L3_CSR_RL06_LND_v04?ids=Projects&values=GRACE-FO&provider=POCLOUD ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นชั้นข้อมูลที่ทำการประมวลผลแล้วให้เป็นความผิดปกติของมวลน้ำกำหนดเป็นความหนาของน้ำที่เทียบเท่าน้ำ (Water-Equivalent-Thickness Surface Mass) ซึ่งได้มาจากการสังเกตแรงโน้มถ่วงที่แปรผันตามเวลาของ GRACE-FO ในช่วงเวลาที่ระบุ และสัมพันธ์กับช่วงเวลาอ้างอิงค่าเฉลี่ยที่ระบุ ความหนาของน้ำที่เท่ากันแสดงถึงความผิดปกติของการเก็บกักน้ำบนบกทั้งหมดจากความชื้นในดิน หิมะ น้ำผิวดิน (รวมถึงแม่น้ำ ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ ฯลฯ) รวมทั้งน้ำใต้ดินและชั้นหินอุ้มน้ำ โดยข้อมูลที่ได้มาเป็นข้อมูลที่ทำการแปรผลแล้วหน่วยเป็นเมตรมีความละเอียดของการเก็บข้อมูลจาก GRACE-FO ที่ 1° ทำการเลือกในข้อมูลเฉพาะครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการศึกษาคือ ลองจิจูดที่ 100° ถึง 101° และ ละติจูดที่ 14° ถึง 15° นำข้อมูลเข้าเก็บและประมวลผลที่ชุดโปรแกรม Excel

การเตรียมข้อมูล ปริมาณน้ำผิวดิน (Surface Water)

ข้อมูลน้ำผิวดินในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าจากการเก็บบันทึกของกรมชลประทานโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายเดือนในช่วงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565 จากเว็บไซต์ของกรมชลประทาน ลิงค์ http://hydro-5.rid.go.th/ เลือกสถานีวัดปริมาณน้ำท่า C.35 (แม่น้ำเจ้าพระยา บ้านป้อม อำเภอพระนครศรีอยุธยา), C.36 (คลองบางหลวง บ้านบางหลวง อำเภอบางบาล), C.37 (คลองบางบาล บ้านบางบาล อำเภอบางบาล) และสถานี S.26 (แม่น้ำป่าสัก อำเภอท่าเรือ) ที่เป็นสถานีวัดปริมาณน้ำไหลผ่านแม่น้ำที่อยู่ในพื้นที่ศึกษาซึ่งโดยเฉลี่ยการไหลของน้ำในลำน้ำจะใช้เวลาประมาณ 20–26 ชั่วโมงในการไหลจากต้นแม่น้ำถึงท้ายแม่น้ำของแต่ละลำน้ำในการศึกษานี้จึงใช้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำท่ารายวันในการใช้เป็นปริมาณน้ำผิวดินของพื้นที่ศึกษา นำเข้าข้อมูลที่ได้ของแต่ละสถานีไว้ในชุดโปรแกรม Excel

การเตรียมข้อมูล ระดับน้ำบาดาล (Ground Water)

ข้อมูลน้ำบาดาลในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลระดับน้ำบาดาลจากการเก็บบันทึกของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลโดยใช้ข้อมูลระดับน้ำบาดาลวัดจากผิวดินของบ่อสังเกตการณ์ในช่วงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561 ถึง มกราคม พ.ศ.2565 จากเว็บไซต์ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ลิงค์ http://tgms.dgr.go.th/#/home เลือกข้อมูลของสถานีที่มีการจดบันทึกในช่วงคาบเวลาที่ศึกษานำเข้าข้อมูลที่ได้ของแต่ละสถานีไว้ในชุดโปรแกรม Excel

อุปกรณ์

- คอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊ค
- ชุดโปรแกรม Microsoft Excel
- ชุดโปรแกรม Microsoft Word

วิธีการดำเนินการ

1. นำเข้าข้อมูล Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface Mass Anomaly ในโปรแกรม Excel ประมวลผลเป็นกราฟแสดงความผิดปกติของมวลน้ำทั้งหมดกำหนดเป็นความหนาของน้ำที่เทียบเท่าน้ำรายเดือน ($TWS_{\alpha, \text{GRACE-FO}}$)

2. เรียบเรียงและนำเข้าปริมาณน้ำท่ารายเดือนในช่วงเวลาศึกษาประมวลผลให้เป็นความผิดปกติปริมาณน้ำผิวดินที่กักเก็บตาม Equation 1 แล้วประมวลผลในโปรแกรม Excel เป็นกราฟแสดงความผิดปกติของน้ำผิวดินรายเดือน

$$SW_{\alpha} = \overline{SW} - SW \quad (1)$$

Where: SW_{α} = surface water anomaly

$\overline{SW}$ = average surface water storage value over the entire time period

SW = surface water storage for the month in consideration

3. ประมวลผลค่าความผิดปกติปริมาณน้ำบาดาลกักเก็บตาม Equation 2 ในโปรแกรม Excel เป็นกราฟแสดงความผิดปกติของน้ำบาดาลรายเดือนแสดงเป็นเส้นแนวโน้มของปริมาณผิดปรกติกักเก็บ

$$GW_{\alpha} = TWS_{\alpha, \text{GRACE-FO}} - SW_{\alpha} \quad (2)$$

Where: GW_{α} = ground water storage anomaly

$TWS_{\alpha, \text{GRACE-FO}}$ = total water storage anomaly from GRACE-FO

SW_{α} = surface water storage anomaly

4. นำเข้าข้อมูลค่าระดับของน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการในพื้นที่และช่วงคาบเวลาเดียวกันประมวลในโปรแกรม Excel เป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงการกักเก็บในช่วงคาบเวลาที่ศึกษาแสดงเป็นเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงวิธีการดำเนินการวิจัยแสดงเป็นแผนผังการดำเนินการดัง Fig. 1

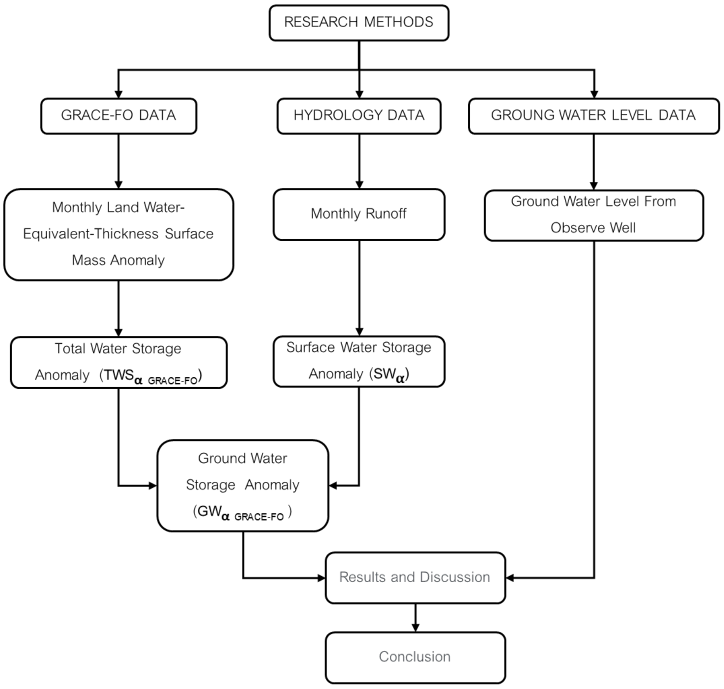


Fig. 1 Research methods flow chart Diagram

การหาค่าความสัมพันธ์สอดคล้อง

เมื่อได้ค่าความผิดปกติของน้ำบาดาลรายเดือนที่แสดงเป็นเส้นแนวโน้มและค่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินท แสดงเป็นเส้นแนวโน้มนำมาสรุปและวิเคราะห์ว่ามีความสัมพันธ์สอดคล้องกันในลักษณะใด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการประมวลผลความผิดปกติของน้ำทั้งหมดที่กักเก็บได้จาก GRACE-FO ในช่วงคาบเวลาศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเห็นได้ชัดเจนระหว่างในฤดูน้ำหลากและช่วงฤดูน้ำปรกติ ในส่วนของค่าความผิดปกติของน้ำผิวดินกักเก็บที่ได้จากปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ศึกษาค่าที่ได้สอดคล้องกันทั้งด้านปริมาณและช่วงเวลาซึ่งค่าผิดปรกติของน้ำผิวดินจะแตกต่างกันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นในปีน้ำนั้นๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงค่าที่ได้จากการวัดของ GRACE-FO เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในพื้นที่ แสดงดัง Fig. 2

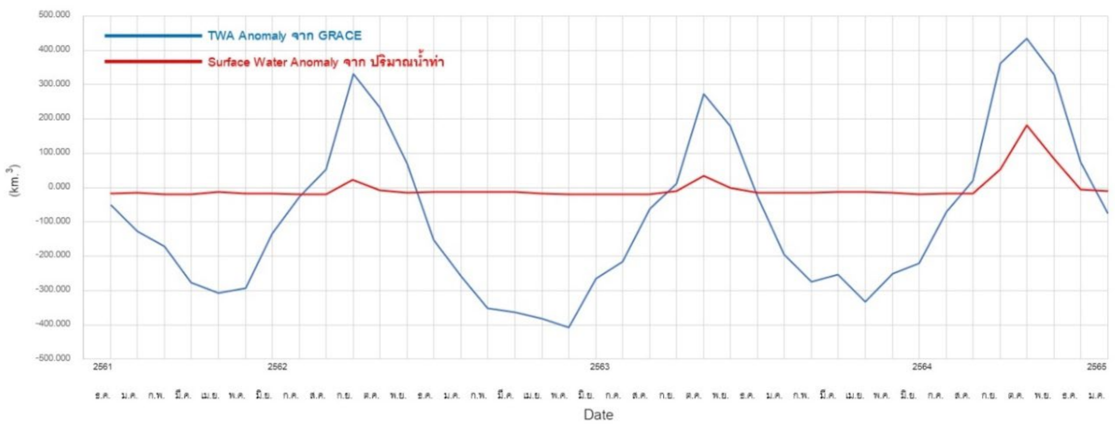


Fig. 2 Total water storage anomaly from GRACE-FO and surface water anomaly from runoff graph

เมื่อนำค่าทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นประมวลผลตาม Equation 2 สิ่งที่ได้จะเป็นค่าผิดปรกติน้ำบาดาลกักเก็บ (Ground water storage anomaly) ผลของค่าที่ได้ปรากฏแสดงปริมาณการกักเก็บน้ำบาดาลจากปี พ.ศ. 2562 ถึงปี พ.ศ. 2564 ในพื้นที่ศึกษามีการจัดเก็บปริมาณน้ำบาดาลปริมาณเปลี่ยนแปลงไปจากปีฐานที่เริ่มศึกษา โดยมีแนวโน้มในอัตราเพิ่มขึ้นตามที่แสดงจากเส้นแนวโน้ม(Trends line) ที่ได้จากการฟข้อมูลค่าผิดปรกติน้ำบาดาลกักเก็บ แสดงดัง Fig. 3.

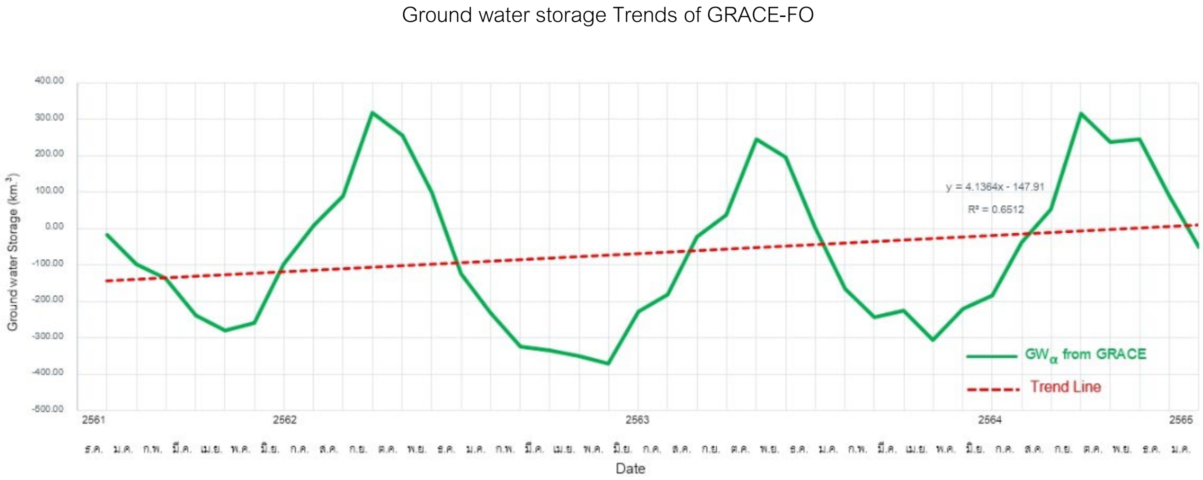


Fig. 3 Ground water storage Trends of GRACE-FO graph

ในด้านของระดับน้ำใต้ดินข้อมูลมาจากบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่ในพื้นที่ศึกษานั้น ทำการเลือกสถานีที่มีข้อมูลการจดบันทึกได้ในช่วงคาบเวลาที่ศึกษานำมาประมวลผลเป็นกราฟแสดงระดับน้ำใต้ดินว่ามีระดับน้ำเปลี่ยนแปลงมากเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงค่าเป็นเส้นแนวโน้ม (Trends line) ปรากฏแสดงดัง Fig. 4 และ Fig. 5

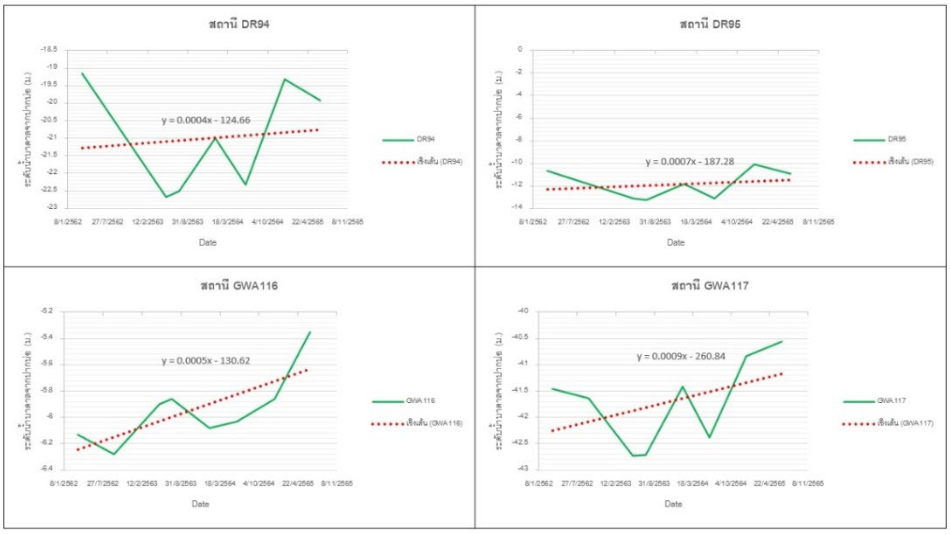


Fig. 4 Ground water level Trends of observation well station DR94, DR95, GWA116 and GWA117

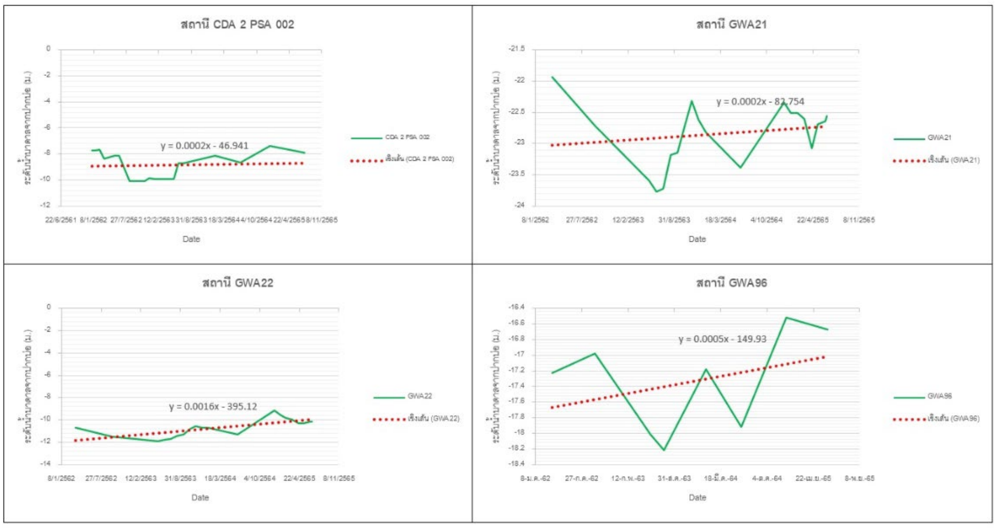


Fig. 5 Ground water level Trends of observation well station CDA2PSA002, GWA21, GWA22 และ GWA96

สรุป

การศึกษาการประยุกต์ใช้ข้อมูล GRACE-FO เพื่อใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของน้ำบาดาล ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์หรือสอดคล้องระหว่างค่า ปริมาณน้ำกักเก็บทั้งหมดที่ได้จากดาวเทียม GRACE-FO, ค่าปริมาณน้ำผิวดินที่ได้จากปริมาณน้ำท่าของกรมชลประทานและค่าระดับน้ำบาดาลที่ได้จากการตรวจวัดบ่อสังเกตการณ์ จะเห็นว่าค่า GRACE-FO ที่วัดมวลของโลกในพื้นที่หนึ่งนั้นจะปรับตัวไปตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในพื้นที่

ค่าการกักเก็บน้ำบาดาลจากการประมวลผลข้อมูล GRACE-FO กับค่าปริมาณน้ำผิวดินที่ได้จากปริมาณน้ำท่าของกรมชลประทานที่ได้ค่าเป็นปริมาณการกักเก็บน้ำบาดาล ค่าที่ได้แสดงถึงปริมาณการกักเก็บน้ำบาดาลในพื้นที่ช่วงคาบเวลาที่ศึกษามีเส้นแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในแนวความชันที่มากขึ้นหากเทียบกับปีฐานที่ใช้เริ่มศึกษา บอกถึงพื้นที่มีการกักเก็บน้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำมาเทียบเคียงกับค่าที่ได้จากการวัดในสนามจากบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ได้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือระดับของน้ำบาดาลที่ได้จากบ่อสังเกตการณ์มีระดับสูงขึ้นจากระดับปีฐานที่ใช้เริ่มศึกษา ให้ทราบว่าจากการศึกษาในครั้งนี้การประมวลผลข้อมูล GRACE-FO ให้ข้อมูลทิศทางการเปลี่ยนแปลงปริมาณกักเก็บน้ำบาดาลในพื้นที่ได้

ค่าความชั้นของกราฟที่ได้จากบ่อสังเกตการณ์จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ y=0.0002x ถึง y=0.0016x เป็นค่าที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จาก GRACE-FO ที่มีความชัน y=4.1364x เป็นค่าที่แตกต่างกันมากซึ่งเกิดจากข้อมูลของค่าระดับน้ำบาดาลของบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลเป็นข้อมูลในค่าระดับที่อ่านได้จากบ่อไม่ได้นำมาคิดเป็นปริมาณกักเก็บที่เปลี่ยนแปลง และอาจเกิดจากในการศึกษานี้ใช้ค่าปริมาณน้ำผิวดินที่ได้จากแม่น้ำเท่านั้นไม่ได้รวมถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในทุ่ง ,หนอง,บ่อ และค่าความชื้นของผิวดิน ซึ่งเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีจริงในพื้นที่ตามค่าน้ำทั้งหมดที่ดาวเทียม GRACE-FO ตรวจวัด

ทั้งนี้การใช้ข้อมูลของ GRACE-FO ควรประยุกต์ใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลกับพื้นที่ในระดับแอ่งน้ำบาดาลเนื่องจากค่าความละเอียดของข้อมูลมีขนาดกว้างถึง 1° ในแต่ละ Pixel นำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการติดตามสถานการณ์น้ำบาดาลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะภูมิอากาศโลกจากอดีตซึ่งมีข้อมูลของ GRACE ที่เริ่มจากปี พ.ศ. 2545 ถึงปัจจุบันที่มีข้อมูลจาก GRACE-FO เพื่อเป็นเครื่องมือคาดการณ์อนาคต ในการบริหารทรัพยากรน้ำอีกหนึ่งแนวทาง

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สรวิศ สุภเวชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ ให้ความรู้ แนะแนวทางในการศึกษา รวมถึงสละเวลาช่วยเหลือ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นให้การวิจัยนี้มีความสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

ค่าระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. http://tgms.dgr.go.th/#/home, 14 กันยายน 2565.

ปริมาณน้ำท่ารายเดือน, ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคกลาง กรมชลประทาน. http://hydro-5.rid.go.th/, 25 กันยายน 2565.

Kuss, A., Brandt, W.T., Randall, J., Floyd, B., Bourai, A., Newcomer, M., Schmidt, C., Skiles, J.W. 2012. Comparison of changes in groundwater storage using grace data and a hydrological model in California's central valley. ASPRS 2012 Annual Conference. California, CA, USA,

Li, Q., Zhong, B., Luo, Z., Yao, C. 2016. GRACE-based estimates of water discharge over the Yellow River basin. Geodesy and Geodynamics 7: 187–193.

Singh, A.K., Jasrotia, A.S., Taloor, A.K., et al., 2017. Esimation of quantitative measures of total water storage variation from GRACE and GLDAS-NOAH satellites using geospatial technology. Quatern. Int. 444: 191–200. doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.014

TELLUS_GRFO_L3_CSR_RL06_LND_v04, Jet Propulsion Laboratory California institute of technology https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_GRFO_L3_GFZ_RL06_LND_v04?ids=Projects&values=GRACE-FO&provider=POCLOUD, 12 กันยายน 2565.

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการประมาณค่าปริมาณฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม

The development of model: To improve the accuracy of average rainfall estimates from GPM satellite system

บงกช สุพร*, พิพัฒน์ สอนวงษ์, สรวิศ สุภเวชย์

Bongkot Suporn*, Piphat Sornwong, Soravis Supavetch

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: bongkot_supo@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็มกับปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) จำนวน 10 สถานีครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้การประมวลผลข้อมูลปริมาณฝนรายวันและปริมาณฝนรายเดือน สำหรับเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ณ ตำแหน่งข้อมูลเดียวกัน โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2563 เพื่อใช้พัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าปริมาณฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ซึ่งใช้ประกอบในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ และความชื้นดิน ภายใต้โครงการ การประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินจากระบบโทรมาตร เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง และปัจจัยทางอุทกธรณี ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงเส้น จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน (r-square = 0.75, *p*-value < 0.05) ให้ค่าสหสัมพันธ์สูงกว่า จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน (r-square = 0.29, *p*-value < 0.05) ทั้งนี้ ได้สมการเบื้องต้นสำหรับเป็นสมการตัวแทนใช้พัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการประมาณค่าปริมาณฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม คือ y = 0.72x–0.08

คำสำคัญ: ความสัมพันธ์เชิงเส้น, ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน, ปริมาณน้ำฝนรายวัน

Abstract

The purpose of this research is to compare the correlation between rainfall data from the GPM satellite with the amount of rain from field station of the Hydro-Informatics Institute (Public Organization), 10 stations covering nationwide of Thailand by using data processing of daily and monthly rainfall comparing the same location correlation with data from January 1, 2019 to December 31, 2020 to model development for estimating average rainfall from the GPM satellite which is composed of finding correlation with the other meteoric data such as temperature and soil humidity under the evaluating project between soil humidity from telemetering system, remote sensing and hydrogeology. The linear correlation comparison results from monthly rainfall data (r-square = 0.75, P-value < 0.05), the correlation is higher than daily rainfall data (r-square = 0.29, P-value < 0.05). In this regard, the preliminary equation for the representative equation is used to the imitating model to improve the accuracy of the estimation of average rainfall from the GPM Satellite is y = 0.72x – 0.08

Keywords: Daily rainfall, linear correlation, Monthly rainfall

คำนำ

ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนบริหารการจัดการทรัพยากรน้ำ (ศิวพร, 2563) โดยเฉพาะข้อมูลปริมาณน้ำฝน เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการนำไปประเมินปริมาณน้ำต้นทุน ที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ การศึกษาข้อมูลปริมาณน้ำฝน นอกจากจะมีการอาศัยข้อมูลที่เก็บด้วยเครื่องมือตรวจวัดที่ติดตั้งในสถานีวัดน้ำฝนภาคพื้นดินแล้ว ยังสามารถศึกษาได้โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำฝนได้ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ (อภิษฐา, 2559) โดยเฉพาะพื้นที่ที่ไม่มีสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำฝนภาคพื้นดิน มีการนำข้อมูลที่ประเมินด้วยการใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล มาใช้ประกอบการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจวัดจากภาคสนามได้ ซึ่งจะช่วยในการติดตามสถานการณ์น้ำ และสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำได้อย่างเป็นระบบ

สำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนภาคพื้นดิน เป็นการตรวจวัดความสูงของฝนที่ตกลงบนพื้นที่ด้วยเครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝน (Rain Gauge) มีหน่วยเป็นมิลิเมตร ซึ่งข้อมูลที่วัดได้เป็นปริมาณฝนที่ตกลงสู่พื้นดินโดยตรง ปริมาณน้ำฝนที่ได้เป็นเพียงตัวแทนของข้อมูล ณ บริเวณที่ทำการตรวจวัดเท่านั้น ไม่สามารถเป็นตัวแทนบริเวณที่อยู่ห่างไกลจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนได้ (สัญชัย, 2554) ในการประเมินปริมาณน้ำฝนด้วยการใช้เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง จากระบบดาวเทียมจีพีเอ็มจะใช้เทคนิคการประมวลผลจากการใช้เรดาร์ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ในการนำข้อมูลฝนดาวเทียมไปใช้งาน จำเป็นจะต้องมีการสอบเทียบกับข้อมูลฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินก่อน

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กับปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดโดยใช้เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง และพัฒนาเป็นแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการประมาณค่าปริมาณฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ซึ่งอยู่ภายใต้โครงการ การประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินจากระบบโทรมาตร เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง และปัจจัยทางอุทกวิทยา (อภินิติ และคณะ, 2564) ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน และจากการใช้เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง ที่ได้จากระบบดาวเทียมสแมป โดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ได้ดำเนินการติดตั้งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินระบบโทรมาตรไว้จำนวนทั้งหมด 10 สถานี ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย เพื่อใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ เช่น ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลปริมาณน้ำฝน มาใช้พิจารณาประกอบร่วมกัน โดยใช้ปัจจัยทั้งจากระยะเวลาและตำแหน่งที่ตรวจวัด โดยใช้การวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, r^2) และค่านัยสำคัญทางสถิต (*p*-value) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของข้อมูล และเพื่อให้ได้สมการที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการนำมาใช้ในการปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลปริมาณฝน ที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

แหล่งข้อมูล

Table 1 Detailed Information and Resources

No.	Data	Source	Data analysis time	Description
1	IOT Station	Hydro-Informatics Institute (Public Organization)	January 1, 2019 to December 31,	Station Name, Station Code, Province, Geographic coordinates (lat, long) and and Hourly Rainfall
2	Satellite	Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)	January 1, 2019 to December 31,	GPM_3IMERGDF (GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06)

การเตรียมข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน

ข้อมูลสถานี

ข้อมูลจากสถานีวัดสภาพอากาศภาคพื้นดิน ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) โดยใช้ข้อมูลจากทั้งหมด 10 สถานี (NMUB, BNKE, THAT, VLGE49, HNKA, WGYG, VLGE50, KKCN และ SWR036) แสดงดัง Fig. 1 โดยข้อมูลประกอบด้วย ชื่อสถานี รหัสสถานี จังหวัด พิกัดภูมิศาสตร์ (ละติจูด, ลองจิจูด) และข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง

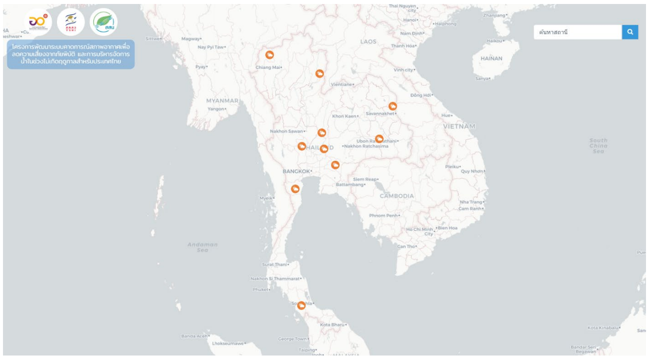


Fig. 1 Location of the IOT Stations from Hydro-Informatics Institute (Public Organization). 2562.

ข้อมูลปริมาณน้ำฝน

ตรวจสอบข้อมูล

ตรวจสอบข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ที่ได้จากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) (สสน.) ซึ่งเป็นข้อมูลปริมาณรายชั่วโมงจากทั้งหมด 10 สถานี โดยจะนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงมาประมวลผลเป็นข้อมูลรายวัน ช่วงวันไหนที่มีข้อมูลไม่ครบ (ขาดไปเกินร้อยละ 20) จะตัดออกและไม่นำมาใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน

นำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงที่คัดเลือกแล้ว มาปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบรายวัน (ปริมาณฝนที่ตกสะสม ช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 00.00 น.ของเมื่อวานนี้จนถึง เวลา 00.00 น.ของวันนี้ ตามเวลามาตรฐานโลกหรือ UTC)

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน

นำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน มาปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบรายเดือนโดยใช้วิธีการเฉลี่ยจากมาตรเวลา (เฉลี่ยข้อมูลหลายวันในช่วงเวลา 1 เดือนให้เป็นข้อมูลรายเดือน)

การเตรียมข้อมูลจากดาวเทียม

ข้อมูลผลิตภัณฑ์น้ำฝน

ข้อมูลผลิตภัณฑ์น้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม GPM_3IMERGDF (GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06) ของ National Aeronautics and Space Administration (NASA) แสดงดัง Table 2

Table 2 GPM Satellite Information Details

Product name	Source	Version	Format Dataset	Spatial Coverage	Spatial	Temporal
GPM_3IMERGDF	GPM	06	NetCDF	-180.0,-90.0,180.0,90.0	0.1 °× 0.1 °	1 day

แปลงข้อมูลผลิตภัณฑ์น้ำฝน

ผลิตภัณฑ์น้ำฝนที่ได้จากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม เป็นไฟล์ข้อมูลจากการจัดเก็บ dataset ในรูปแบบ NetCDF หรือ .nc4 ในการอ่านค่าข้อมูลปริมาณน้ำฝน (precipitationCal) ต้องมีการประมวลผลข้อมูลจากการจัดเก็บ dataset ในรูปแบบ NetCDF ไปเป็น GeoTiff หรือ .tif โดยใช้โปรแกรมทางสารสนเทศภูมิศาสตร์ QGIS เพื่อให้ได้ข้อมูลในรูปแบบ Raster ที่มีค่าพิกัด

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน

สกัดข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน โดยนำข้อมูลพิกัดภูมิศาสตร์ (ละติจูด, ลองจิจูด) ของสถานีวัดสภาพอากาศภาคพื้นดิน และข้อมูลผลิตภัณฑ์น้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ที่อยู่ในรูปแบบข้อมูล GeoTiff หรือ .tif เข้าสู่โปรแกรมทางสารสนเทศภูมิศาสตร์ QGIS เพื่อสกัดข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน โดยใช้เครื่องมือ Point sampling tool โดยตำแหน่งพิกัดสถานีวัดสภาพอากาศภาคพื้นดินที่นำเข้าจะเป็นชั้นข้อมูลแบบจุด ซึ่งมีทั้งหมด 10 จุดพิกัดสถานี ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย และผลิตภัณฑ์น้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็มจะเป็นชั้นข้อมูลแบบ raster โดยจะทำให้ได้ข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากดาวเทียม ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 จนถึง 31 ธันวาคม 2563 ตามตำแหน่งพิกัดสถานีวัดสภาพอากาศที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน

นำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม มาปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบรายเดือนโดยใช้วิธีการเฉลี่ยจากมาตรเวลา (เฉลี่ยข้อมูลหลายวันในช่วงเวลา 1 เดือนให้เป็นข้อมูลรายเดือน)

เปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงสถิติ

เปรียบเทียบความสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรายวัน

หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม กับปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินทั้ง 10 สถานี (NMUB, BNKE, THAT, VLGE49, HNKA, WGYG, VLGE50, KKCN และ SWR036) โดยใช้การประมวลผลข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 จนถึง 31 ธันวาคม 2563 สำหรับเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ณ ตำแหน่งข้อมูลเดียวกัน ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงเส้น ด้วยค่า r-square และค่า *p*-value แสดงดัง Fig. 2

เปรียบเทียบความสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรายเดือน

หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม กับปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินทั้ง 10 สถานี (NMUB, BNKE, THAT, VLGE49, HNKA, WGYG, VLGE50, KKCN และ SWR036) โดยใช้การประมวลผลข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม 2562 จนถึงเดือน ธันวาคม 2563 สำหรับเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ณ ตำแหน่งข้อมูลเดียวกัน ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงเส้น ด้วยค่า r-square และค่า *p*-value แสดงดัง Fig. 2

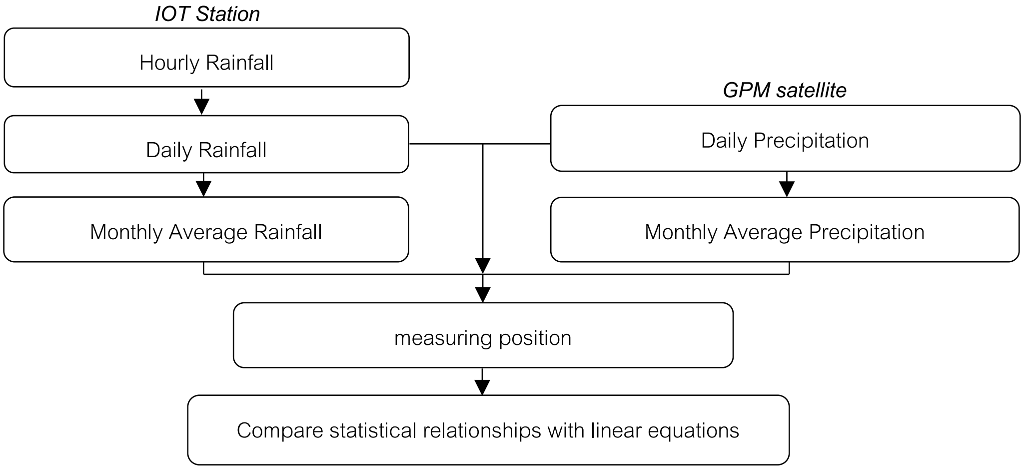


Fig. 2 Diagram of proposed to comparison of rainfall between GPM satellite and IOT Station

พัฒนาแบบจำลอง

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรายวันและข้อมูลเฉลี่ยรายเดือน ระหว่างปริมาณน้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม กับปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินทั้ง 10 สถานี ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงเส้น แล้วนำมาวิเคราะห์ โดยเลือกจากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ดีที่สุด มาใช้เป็นข้อมูลสำหรับสร้างสมการเชิงเส้นเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ตาม Equation 1

$$y = a(x) + b \quad (1)$$

เมื่อ y = ค่าปริมาณน้ำฝนภาคพื้นดิน ของสถานีตรวจวัดสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน)

x = ค่าปริมาณน้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม

หมายเหตุ: ค่า a และ b คือ การหาสัมประสิทธิ์ ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความสัมพันธ์จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน

จากการหาปริมาณน้ำฝนจากดาวเทียม ณ ตำแหน่งเดียวกันกับสถานี เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนรายวันจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กับปริมาณน้ำฝนรายวันจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยความสัมพันธ์เชิงสถิติ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 ถึง 31 ธันวาคม 2563 แยกรายสถานีทั้งหมด 10 สถานี (PAII, NMUB, BNKE, THAT, VLGE49, HNKA, WGYG, VLGE50, KKCN และ SWR036) มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล r-square (0.20, 0.31, 0.31, 0.41, 0.36, 0.27, 0.32, 0.24, 0.19, และ 0.33 ตามลำดับ) และมีค่า p-value < 0.05 ทุกสถานี และเมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันของทุกสถานีมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่างข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กับข้อมูลจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 ถึง 31 ธันวาคม 2563 ด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติ พบว่ามีค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล r-square เท่ากับ 0.29 และมีค่า p-value $<$ 0.05 และได้สมการเบื้องต้น คือ $y = 0.46x + 1.01$ แสดงดัง Fig. 3

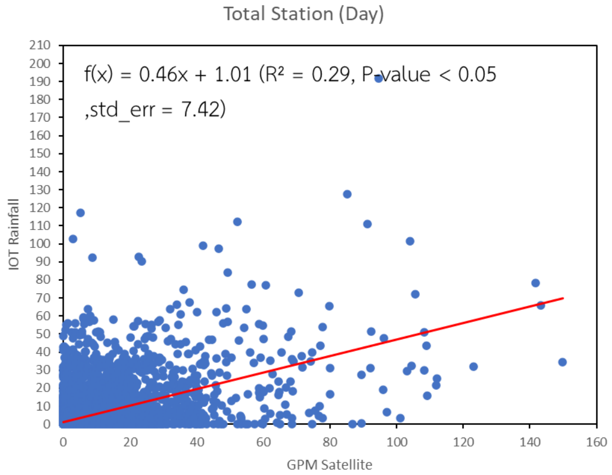


Fig. 3 Comparison of daily rainfall data from the GPM Satellite with all IOT Stations

ความสัมพันธ์จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน

จากการนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน มาปรับให้อยู่ในรูปแบบรายเดือนโดยใช้วิธีการเฉลี่ยจากมาตรเวลา (เฉลี่ยข้อมูลหลายวันในช่วงเวลา 1 เดือนให้เป็นข้อมูลรายเดือน) เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนรายเดือนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กับปริมาณน้ำฝนรายเดือนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยความสัมพันธ์เชิงสถิติ ตั้งแต่เดือน มกราคม 2562 ถึงเดือน ธันวาคม 2563 แยกรายสถานีทั้งหมด 10 สถานี (PAII, NMUB, BNKE, THAT, VLGE49, HNKA, WGYG, VLGE50, KKCN และ SWR036) มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล r-square

(0.47, 0.89, 0.89, 0.88, 0.89, 0.81, 0.86, 0.66, 0.74, และ 0.66 ตามลำดับ) และมีค่า *p*-value < 0.05 ทุกสถานี และเมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนของทุกสถานีมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่างข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กับข้อมูลจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม ตั้งแต่เดือน มกราคม 2562 ถึงเดือน ธันวาคม 2563 ด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติ พบว่ามีค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล r-square เท่ากับ 0.75 และมีค่า *p*-value < 0.05 และได้สมการเบื้องต้น คือ y = 0.72x – 0.08 แสดงดัง Fig. 4

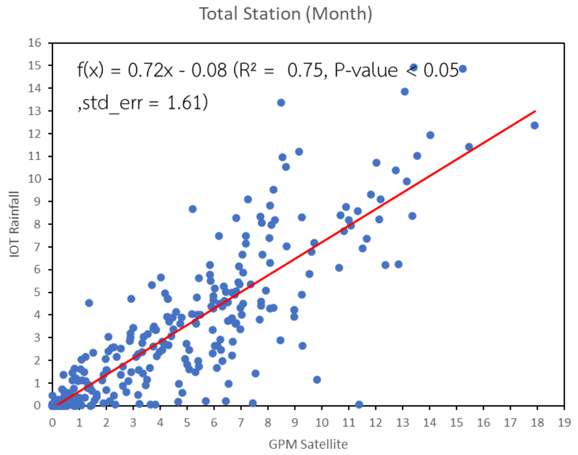


Fig. 4 Comparison of monthly average rainfall data from the GPM Satellite with all IOT Stations

จากผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน วิเคราะห์ความความสัมพันธ์โดยแยกรายสถานีทั้ง 10 สถานี มีการกระจายตัวของข้อมูลมาก ความความสัมพันธ์เชิงเส้น (r-square < 0.50 ทุกสถานี) และจากการนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันของทุกสถานี มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมกัน มีการกระจายตัวของข้อมูลมากเช่นกัน ความความสัมพันธ์เชิงเส้น (r-square < 0.50) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน วิเคราะห์ความความสัมพันธ์โดยแยกรายสถานีทั้ง 10 สถานี เปรียบเทียบด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นมีทั้งหมด 9 สถานี (NMUB, BNKE, THAT, VLGE49, HNKA, WGYG, VLGE50, KKCN และ SWR036) ที่มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล r-square (0.89, 0.89, 0.88, 0.89, 0.81, 0.86, 0.66, 0.74, และ 0.66 ตามลำดับ) และจากการนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนของทุกสถานี มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมกัน พบว่ามีค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล r-square เท่ากับ 0.75 และมีค่า *p*-value < 0.05 ข้อมูลมีกระจายตัวน้อย ค่อนข้างรวมกันเป็นกลุ่ม และข้อมูลมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้มีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำ จึงเลือกใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน ซึ่งมีความสัมพันธ์ของข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ดี ให้เป็นตัวแทนในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม โดยมีสมการเบื้องต้นสำหรับใช้เป็นสมการตัวแทนของการหาค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยแบบรายเดือน คือ y = 0.72x – 0.08

สรุป

จากการดำเนินงานโครงการ การประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินจากระบบโทรมาตร เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง และปัจจัยทางอุทกธรณี ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินระบบโทรมาตร และความชื้นดินโดยใช้เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง ซึ่งได้จากระบบดาวเทียมสแมป โดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ได้ดำเนินการติดตั้งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินระบบโทรมาตรไว้จำนวนทั้งหมด 10 สถานี เพื่อใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ เช่น ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลปริมาณน้ำฝน ที่ตรวจวัดได้จากสถานีมาใช้พิจารณาประกอบร่วมกันในการประเมินหาค่าความชื้นดินจากระบบดาวเทียมสแมป โดยใช้

ปัจจัยทั้งจากระยะเวลาและตำแหน่งที่ตรวจวัด ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินระบบโทรมาตรทั้ง 10 สถานีข้างต้น กับปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดโดยใช้เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง ซึ่งได้จากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม เพื่อพัฒนาเป็นแบบจำลองปรับปรุงความถูกต้องของการประมาณค่าปริมาณฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม และหาความสอดคล้องของข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็มกับข้อมูลความชื้นดินจากระบบดาวเทียมสแมป

จากการนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน มาใช้เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็มกับสถานีภาคพื้นดินทั้ง 10 สถานีนั้น โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2563 มีค่าความสัมพันธ์ของข้อมูล ที่ดีกว่าการใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน เนื่องจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ได้จากดาวเทียมเป็นข้อมูลที่ประมวลผลมาจากหยาดน้ำฟ้า ซึ่งไม่ใช้ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงบนพื้นผิวโลกจริง ทำให้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากดาวเทียมมีความคลาดเคลื่อนสูง จึงต้องมีการปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบรายเดือนโดยใช้วิธีการเฉลี่ยจากมาตรเวลา (เฉลี่ยข้อมูลหลายวันในช่วงเวลา 1 เดือนให้เป็นข้อมูลรายเดือน) ก่อนนำไปวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับใช้พัฒนาแบบจำลองเพื่อให้สมการจากแบบจำลองมีความถูกต้อง ควรเพิ่มความหนาแน่นของจำนวนสถานี ให้คลอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย รวมถึงสามารถนำข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นมาใช้ประกอบในกระบวนการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยจากระบบดาวเทียมจีพีเอ็ม เพื่อเพิ่มความถูกต้อง และแม่นยำมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ. ร.อ. พิพัฒน์ สอนวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พ.ท.สรวิศ สุภเวชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา ชี้แนะแนวทาง ทั้งเรื่องวิชาการ ขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลองและการแก้ไขรายงานในครั้งนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณข้อมูลปริมาณฝนของสถานีตรวจวัดจากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน)

เอกสารอ้างอิง

สัญชัย เอี่ยมประเสริฐ. 2554. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวันด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ บริเวณพื้นที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. กรุงเทพฯ.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน). 2562. พิกัดสถานีและฝนรายชั่วโมง. https://partners.thaiwater.net:3007/soilMoisture, 1 กันยายน 2565.

อภิษฐา ยิ่งยอด. 2559. การเปรียบเทียบปริมาณฝนรายวันระหว่างผลิตภัณฑ์น้ำฝนจากข้อมูลดาวเทียมกับข้อมูลฝนภาคพื้นดิน พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก.

อภินิติ โชติสังกาศ และคณะ. 2564. โครงการการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินจากระบบโทรมาตร เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง และปัจจัยทางอุทกธรณี. รายงานการศึกษาเบื้องต้น, สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน). กรุงเทพฯ.

ศิวพร กองจันทร์. 2563. การเปรียบเทียบปริมาณฝนรายวันระหว่างข้อมูลผลิตภัณฑ์น้ำฝน IMERG V.06 และข้อมูลผน ภาคพื้นดิน พื้นที่ลุ่มแม่น้ำอิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก.

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียมสแมป

Model Development to Improve the Accuracy of Surface Temperature Measurement from SMAP Satellites

<u>อนามิกา อ่างแก้ว</u>*, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์

<u>Anamika Angkeaw</u>, Anuphao Aobpaet, Soravis Supavetch

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: anamika.an@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงข้อมูลค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากดาวเทียมสแมป (Soil Moisture Active Passive satellite:SMAP) โดยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิพื้นผิวจากดาวเทียม SMAP กับสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) โดยการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว 3 แบบ ได้แก่ แบบค่าเฉลี่ยรายวันและแบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน (ใช้ตำแหน่งของสถานีตรวจวัดสภาพอากาศ 3 สถานี กับข้อมูลเดือนมีนาคมและเดือนกันยายน 2021 ซึ่งเป็นตัวแทนหน้าแล้งและหน้าฝน) และแบบค่าเฉลี่ยรายเดือน (ใช้ตำแหน่งของสถานีตรวจวัดสภาพอากาศ 10 สถานี กับข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวของปี 2021) พบว่า การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในเชิงสถิติแบบค่าเฉลี่ยรายเดือนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้มากที่สุด ($r = 0.8887$, $r^2 = 0.7897$, p-value $= 2.00 \times 10^{-41}$) ทั้งนี้ได้สมการเบื้องต้น คือ $y = 0.8426x + 4.5904$ สำหรับเป็นสมการตัวแทนใช้พัฒนาแบบจำลองและปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP

คำสำคัญ: ดาวเทียมสแมป, สถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน, อุณหภูมิพื้นผิว

Abstract

This research aims to improve the surface temperature data which obtained from the Soil Moisture Active Passive Satellite (SMAP) from comparing the surface temperature values from the SMAP satellite with field station of Hydro – Informatics Institute (Public Organization). Analyzing the correlation of 3 types of surface temperature data: daily and 10-days average (Using data from 3 field stations in March and September 2021, which represent dry season and rainy season) and monthly average (Using surface temperature data from 10 field stations of 2021). The result revealed that the statistical correlation in monthly average is in the most acceptable criterion ($r = 0.8887$, $r^2 = 0.7897$, p-value $= 2.00 \times 10^{-41}$). The preliminary equation was $y = 0.8426x + 4.5904$ for a representative equation which use to imitate models and improve the accuracy of surface temperature data measured from the SMAP satellite system.

Keywords: Field station, Soil Moisture Active Passive Satellites, Surface Temperature

คำนำ

จากสภาวะโลกร้อนก่อให้เกิดผลเสียต่างๆ ในประเทศไทย ซึ่งได้รับผลกระทบเช่นกันจะเห็นได้จากบางปีเกิดน้ำท่วม บางปีเกิดน้ำแล้ง ฝนตกไม่ตามฤดูกาล และยังคงต้องมีการส่งน้ำให้เกษตรกรในพื้นที่เพาะปลูกเพื่อให้ดินมีความชื้นอยู่ในเกณฑ์ที่พืชสามารถนำไปใช้งานได้ นอกจากคุณสมบัติของดินและพืชที่ปลูกที่จะต้องนำมาพิจารณากำหนดการให้น้ำแก่พืชแล้ว ยังมีองค์ประกอบอย่างอื่นที่จะต้องนำเข้ามาพิจารณาด้วยคือ สภาพภูมิอากาศ และการจัดการเพาะปลูก สภาพภูมิอากาศที่เกี่ยวข้องก็มี รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นของบรรยากาศ และความยาวของชั่วโมงกลางวันตลอดฤดูกาลเพาะปลูก เป็นต้น ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะมีผลต่อปริมาณการใช้น้ำของพืชและความถี่การให้น้ำ (วัชระ, 2558) ข้อมูลค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ประเมินจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา ทำให้งานวิจัยสามารถนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์และติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิพื้นผิวในบริเวณต่างๆ ได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นหากบริเวณที่ทำการศึกษาเป็นบริเวณพื้นที่ทางการเกษตรแล้ว การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของดินอีกด้วย การวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ข้อมูลจากดาวเทียม SMAP มาวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว เพื่อช่วยให้เกษตรกรสามารถวางแผนการเพาะปลูกพืชได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าเครื่องมือสำหรับใช้ตรวจวัดอุณหภูมิพื้นผิว สามารถทำการตรวจวัดอุณหภูมิพื้นผิวได้โดยตรงในภาคสนาม (Field Measurement method) และการใช้วิธีการแปลภาพถ่ายจากข้อมูลดาวเทียม (Satellite remote sensing) แม้จะเป็นวิธีการตรวจวัดโดยอ้อม แต่อย่างไรก็ตามวิธีการใช้ข้อมูลดาวเทียมนั้น ก็มีข้อได้เปรียบคือสามารถติดตามและวิเคราะห์อุณหภูมิของดินในบริเวณพื้นที่กว้างๆ เช่นครอบคลุมพื้นทั้งประเทศ โดยที่ไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิเพิ่ม

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลหรือรีโมทเซนซิ่ง (Remote Sensing) ได้มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก มีการเปิดให้สามารถเข้าถึงข้อมูลจากดาวเทียมขององค์กรต่างๆ เพื่อประเมินความชื้นในดิน ได้แก่ โครงการ Soil Moisture Active Passive (SMAP), Sentinel ฯลฯ ซึ่งการนำข้อมูลดาวเทียมรีโมทเซนซิ่ง มาใช้ประโยชน์ในประเทศไทยนั้น มีความจำเป็นต้องศึกษาเพื่อสอบเทียบความละเอียดถูกต้องโดยข้อมูลภาคพื้นดิน โดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) หรือ สสน. ได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นเพิ่มเติมกับสถานีโทรมาตรอัตโนมัติของสถาบันฯ เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดดิน ลักษณะภูมิประเทศ ในส่วนที่เป็นข้อมูลเฉพาะพื้นที่ศึกษาที่ติดตั้งสถานีตรวจวัด ได้แก่ สภาพภูมิประเทศ, ลักษณะทางธรณี และคุณสมบัติของดิน ภายใต้โครงการ “การประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจากระบบโทรมาตร เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง และปัจจัยทางอุทกธรณี” โดยสถานีตรวจวัดจะถูกติดตั้งในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยทั้งสิ้น 10 สถานี ได้แก่ สถานีบ้านสันติชล, สถานี อบต.น้ำมวบ, สถานี อบต.พุ่มแก, สถานีตำบลซับสมบูรณ์, สถานี อบต.หันคา, สถานี อบต.วังม่วง, สถานี อบต.ธาตุ, สถานี อบต.นาแขม, สถานี อบต.สองพี่น้อง และสถานีมัสยิดกาวมินมูฮายีริน (อภินิติ และคณะ, 2564)

โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้ตรวจวัดจากดาวเทียม SMAP และจากข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวจากสถานีภาคพื้นดินนี้ ใช้การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในเชิงสถิติและพัฒนาแบบจำลองนั้น ได้มีการวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, r^2) และค่านัยสำคัญทางสถิต (*p*-value) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของข้อมูล และเพื่อให้ได้สมการที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการนำมาใช้ในการปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว ที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ข้อมูลที่เลือกใช้ในการนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ

ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวจากดาวเทียม SMAP

จำเป็นจะต้องเข้าไปโหลดข้อมูลจากทางเว็บไซต์ที่ให้บริการของทาง NASA ซึ่งข้อมูลจากดาวเทียม SMAP นั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายระดับตั้งแต่ Level 1 ไปจนถึง Level 4 โดยแบ่งตามความละเอียด (Resolution) ข้อมูลที่นำมาใช้สำหรับในการวิเคราะห์ของงานนี้นั้นจะเลือกใช้เป็นข้อมูลจาก SMAP Level 2 หรือ SMAP radiometer/Copernicus Sentinel-1 soil moisture (L2_SM_SP) โดยต้องทำการคำนวณร่วมกับ ข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel เพื่อให้มีความละเอียดอยู่ที่ 1 กิโลเมตร (ขจรศักดิ์ และคณะ, 2565) ซึ่งเป็นข้อมูลความละเอียดที่ละเอียดที่สุดของดาวเทียม SMAP

ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน)

โครงการพัฒนาระบบคาดการณ์สภาพอากาศเพื่อลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติ และการบริหารจัดการน้ำในช่วงไม่เกิดฤดูกาลสำหรับประเทศไทย ของสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศทรัพยากรน้ำ ได้มีการติดตั้งสถานีวัดสภาพอากาศจำนวน 10 แห่ง ได้แก่ สถานีบ้านสันติชล, สถานี อบต.น้ำมวบ, สถานี อบต.พุ่มแก, สถานีตำบลซับสมบูรณ์, สถานี อบต.หันคา, สถานี อบต.วังม่วง, สถานี อบต.ธาตุ, สถานี อบต.นาแขม, สถานี อบต.สองพี่น้อง และสถานี มัสยิดกาวมินมูฮายีริน ซึ่งเป็นการกระจายสถานที่ตั้งสถานีเพื่อให้ครอบคลุมทั่วประเทศ สามารถวัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ ฝนรายชั่วโมง โดยมีการรายงานผลข้อมูลการตรวจวัดทุก 1 ชั่วโมง

การเตรียมข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยค่าทางสถิติ

การเตรียมข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากดาวเทียม SMAP

ทำการเขียนคำสั่งด้วยชุดคำสั่งจากโปรแกรม Python โดยข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของอุณหภูมิพื้นผิวของตำแหน่งที่ได้เลือก ข้อมูลที่ได้มานั้นจะอยู่ในรูปของไฟล์ .h5 ซึ่งต้องใช้ซอฟแวร์เฉพาะทางในการเปิดไฟล์ข้อมูล นำข้อมูลไฟล์ภาพ Geo.TIFF โดยเลือกใช้โปรแกรม Quantum GIS หรือ QGIS ประกอบรวมกัน เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้ยังเป็นหน่วยเคลวิน (Kelvin, K) จึงต้องแปลงหน่วยเป็น องศาเซลเซียส (Degree Celsius, °C) ให้ตรงกับหน่วยของอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ(องค์การมหาชน) ก่อนนำค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้ไปเตรียมเป็นชุดข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ ซึ่งมีการจัดทำข้อมูลใน 3 รูปแบบ ได้แก่

1. แบบค่าเฉลี่ยรายวัน โดยการนำค่าข้อมูลรายวันมาเฉลี่ย ซึ่งบางวันอาจจะมีข้อมูลมากกว่าหนึ่งค่าและบางวันไม่มีค่าข้อมูล ขึ้นอยู่กับการโคจรผ่านจุดที่ตั้งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินที่กำหนด นำจำนวนของค่าข้อมูลที่มีเฉลี่ยให้ได้เป็นรายวัน

2. แบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน โดยการนำค่าข้อมูลที่อยู่ในช่วงของต้นเดือน กลางเดือน ปลายเดือน โดยแบ่งช่วงละ 10 วัน ซึ่งบางวันอาจจะมีข้อมูลมากกว่าหนึ่งค่าและบางวันไม่มีค่าข้อมูล ขึ้นอยู่กับการโคจรผ่านจุดที่ตั้งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน นำจำนวนของค่าข้อมูลที่มีเฉลี่ยให้ได้เป็นราย 10 วัน

3. แบบค่าเฉลี่ยรายเดือน โดยการนำค่าข้อมูลในแต่ละวันมาเฉลี่ยให้เป็นรายเดือน ซึ่งบางวันอาจจะมีข้อมูลมากกว่าหนึ่งค่าและบางวันไม่มีค่าข้อมูล ขึ้นอยู่กับการโคจรผ่านจุดที่ตั้งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน นำจำนวนของค่าข้อมูลที่มีเฉลี่ยให้ได้เป็นรายเดือน

การเตรียมข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน)

จำเป็นจะต้องเข้าไปโหลดข้อมูลจากทางเว็บไซต์ที่ให้บริการของทางสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ สามารถเลือก ดาวน์โหลดช่วงเวลาที่ต้องการ จะได้ไฟล์ข้อมูลในรูปแบบ Excel File แสดงข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวรายชั่วโมงในหน่วยอุณหภูมิขององศาเซลเซียส นำข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (IOT) นี้ มาจัดทำข้อมูลใน 3 รูปแบบ ได้แก่

1. แบบค่าเฉลี่ยรายวัน โดยการนำค่าอุณหภูมิรายชั่วโมงมาเฉลี่ยให้เป็นรายวัน

2. แบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน โดยการนำค่าอุณหภูมิรายชั่วโมงของแต่ละวันในช่วงของต้นเดือน กลางเดือน ปลายเดือน แบ่งช่วงละ 10 วัน นำค่าข้อมูลมาเฉลี่ยให้เป็นราย 10 วัน

3. แบบค่าเฉลี่ยรายเดือน โดยการนำข้อมูลค่าอุณหภูมิรายชั่วโมงของแต่ละวันของเดือนนั้น มาเฉลี่ยให้เป็นค่าอุณหภูมิรายเดือน

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเชิงสถิติ และ พัฒนาแบบจำลอง

จากการเตรียมข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบค่าเฉลี่ยรายวัน แบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน และแบบค่าเฉลี่ยรายเดือน ซึ่งใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยรายวันและแบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน ของข้อมูล 3 สถานี ได้แก่ สถานีตำบลซับสมบูรณ์, สถานี อบต.หันคา และสถานี อบต.วังม่วง ในเดือนมีนาคม 2021 (ชุดข้อมูลตัวแทนของหน้าแล้ง) และเดือนกันยายน 2021 (ชุดข้อมูลตัวแทนของหน้าฝน) และแบบค่าเฉลี่ยรายเดือน ของข้อมูล 10 สถานี ได้แก่ สถานีบ้านสันติชล, สถานี อบต.น้ำมวบ, สถานี อบต.พุ่มแก, สถานีตำบลซับสมบูรณ์, สถานี อบต.หันคา, สถานี อบต.วังม่วง, สถานี อบต.ธาตุ, สถานี อบต.นาแขม, สถานี อบต.สองพี่น้อง และสถานี มัสยิดกาวมินมูฮายีริน ใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวทุกเดือนของปี 2021 ในการนำมาวิเคราะห์ แสดงดัง Fig. 1 โดยนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเชิงสถิติ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักสถิติหรือ ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) มีรูปสมการตามที่แสดงตาม Equation 1 เป็นการดูทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) ที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์นี้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 ซึ่งหากมีค่าใกล้ -1.0 นั้นหมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้ามหากมีค่าใกล้ +1.0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันโดยตรงอย่างมาก และหากมีค่าเป็น 0 นั้น หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2\sum(y-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

เมื่อ x คือ ค่าอุณภูมิพื้นผิวจากดาวเทียม Soil Moisture Active Passive (SMAP)

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยอุณภูมิพื้นผิวจากดาวเทียม Soil Moisture Active Passive (SMAP)

y คือ ค่าอุณภูมิพื้นผิวจากสถานีตรวจวัดภาคสนาม Internet of Thing (IoT)

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยอุณภูมิพื้นผิวจากสถานีตรวจวัดภาคสนาม Internet of Thing (IoT)

2. การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) โดยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, r^2) ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งหากมีค่าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นไม่สามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนอง ต่างที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เลยในเชิงตรงกันข้ามหากมีค่าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนอง ต่างที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี และค่านัยสำคัญทางสถิต (*p*-value) คือ ผลของการทดสอบสมมติฐานมีโอกาสเกิดขึ้นได้โดยบังเอิญ ซึ่งในทางสถิติความบังเอิญนั้นควรจะน้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ (Statistical Significant)

การนำมาพัฒนาแบบจำลองและปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ตรวจวัดจากดาวเทียม SMAP เทียบกับข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (IOT) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันแบบกราฟเส้นตรง (Linear function) ซึ่งอยู่ในรูปสมการตามที่แสดงตาม Equation 2

$$y = (a)x + b \tag{2}$$

เมื่อ x คือ ค่าอุณภูมิพื้นผิวจากดาวเทียม Soil Moisture Active Passive (SMAP)

y คือ ค่าอุณภูมิพื้นผิวจากสถานีตรวจวัดภาคสนาม Internet of Thing (IoT)

a และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ จากสมการถดถอยเชิงเส้น

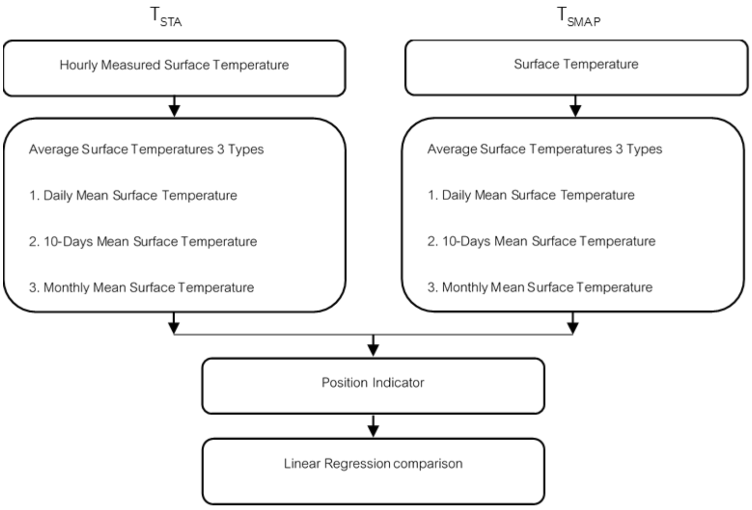


Fig.1 Statistical correlation comparison between the surface temperature data measured by ground stations and the surface temperature measured by SMAP satellites

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในเชิงสถิติ โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยรายวัน ของข้อมูล 3 สถานี ได้แก่ สถานีตำบลซับสมบูรณ์, สถานี อบต.หันคา และสถานี อบต.วังม่วง ในเดือนมีนาคม 2021 (ชุดข้อมูลตัวแทนของ

หน้าแล้ง) และเดือนกันยายน 2021 (ชุดข้อมูลตัวแทนของหน้าฝน) ให้ค่าการวิเคราะห์ ดังนี้ 1)ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น r เท่ากับ 0.6554, 0.4894 ตามลำดับ 2)ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ r^2 เท่ากับ 0.4296, 0.2395 ตามลำดับ 3)ค่านัยสำคัญทางสถิติ *p*-value เท่ากับ 0.0043, 0.0112 ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 2A และ Fig. 2B พบว่าในเดือนมีนาคม 2021 ให้ค่าความสัมพันธ์ที่สูงกว่าเดือนกันยายน 2021 แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ อาจเนื่องมาจากสภาพอากาศที่แปรปรวนซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการรับส่งสัญญาณดาวเทียม และการรวมชุดข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยรายวัน ในเดือนมีนาคม 2021 และเดือนกันยายน 2021 พบว่าให้ค่าการวิเคราะห์ ดังนี้ 1)ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น r เท่ากับ 0.8348 2)ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ r^2 เท่ากับ 0.6968 3)ค่านัยสำคัญทางสถิติ *p*-value เท่ากับ 3.48×10^{-12} และได้สมการเบื้องต้น คือ y = 1.0807x - 2.1538 สำหรับการพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว ที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP ซึ่งใช้เป็นสมการตัวแทนของแบบค่าเฉลี่ยรายวัน แสดงดัง Fig. 2C

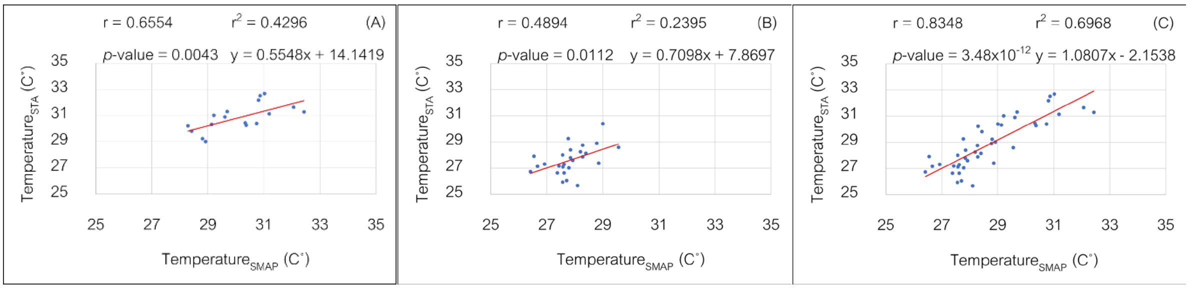


Fig.2 Surface temperature model analysis Daily average temperature measurement data model: (A) March 2021 surface temperature data; (B) September 2021 surface temperature data; (C) March and September 2021 surface temperature data

การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในเชิงสถิติ โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน ของข้อมูล 3 สถานี ได้แก่ สถานีตำบลซับสมบูรณ์, สถานี อบต.หันคา และสถานี อบต.วังม่วง ในเดือนมีนาคม 2021(ชุดข้อมูลตัวแทนของหน้าแล้ง) และเดือนกันยายน 2021(ชุดข้อมูลตัวแทนของหน้าฝน) ให้ค่าการวิเคราะห์ ดังนี้ 1)ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น r เท่ากับ 0.6518, 0.6825 ตามลำดับ 3)ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ r^2 เท่ากับ 0.4248, 0.4659 ตามลำดับ 3)ค่านัยสำคัญทางสถิติ *p*-value เท่ากับ 0.0572, 0.0428 ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 3 A และ Fig. 3B และการรวมชุดข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน ในเดือนมีนาคม 2021 และเดือนกันยายน 2021 พบว่าให้ค่าการวิเคราะห์ค่าที่ดีกว่า ดังนี้ 1)ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น r เท่ากับ 0.8893 2)ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ r^2 เท่ากับ 0.7908 3)ค่านัยสำคัญทางสถิติ *p*-value เท่ากับ 7.98×10^{-7} และได้สมการเบื้องต้น คือ y = 1.1026x - 2.7242 สำหรับการพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว ที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP ซึ่งใช้เป็นสมการตัวแทนของแบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน แสดงดัง Fig. 3 (C)

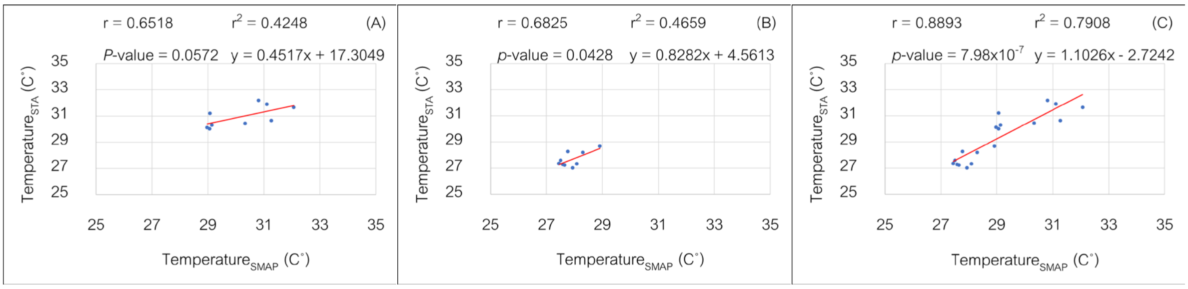


Fig. 3 Surface temperature model analysis the 10-Day average temperature measurement data were used: (A) March 2021 surface temperature data; (B) September 2021 surface temperature data; (C) March and September 2021 surface temperature data

การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในเชิงสถิติ โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยรายเดือน ของข้อมูล 10 สถานี ได้แก่ สถานีบ้านสันติชล, สถานี อบต.น้ำมวบ, สถานี อบต.พุ่มแก, สถานีตำบลซับสมบูรณ์, สถานี อบต.หันคา, สถานี อบต.วังม่วง, สถานี อบต.ธาตุ, สถานี อบต.นาแขม, สถานี อบต.สองพี่น้อง และสถานี มัสยิดกาวมินมูฮายีริน ของปี 2021 พบว่าจากการวิเคราะห์ทั้ง 10 สถานี โดยสถานี อบต.น้ำมวบ ให้ค่าการวิเคราะห์มากที่สุด ดังนี้ 1)ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น r เท่ากับ 0.9656 2) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ r^2 เท่ากับ 0.9325 3)ค่านัยสำคัญทางสถิติ *p*-value เท่ากับ 2.21×10^{-11} แสดงดัง Fig. 4A และการรวมชุดข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวของทั้ง 10 สถานี ให้ค่าการวิเคราะห์ค่า ดังนี้ 1) ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น r เท่ากับ 0.8887 2) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ r^2 เท่ากับ 0.7897 3) ค่านัยสำคัญทางสถิติ *p*-value เท่ากับ 2.00×10^{-41} และได้สมการเบื้องต้น คือ y = 0.8426x + 4.5904 สำหรับการพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว ที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP ซึ่งใช้เป็นสมการตัวแทนของแบบค่าเฉลี่ยรายเดือน แสดงดัง Fig. 4B

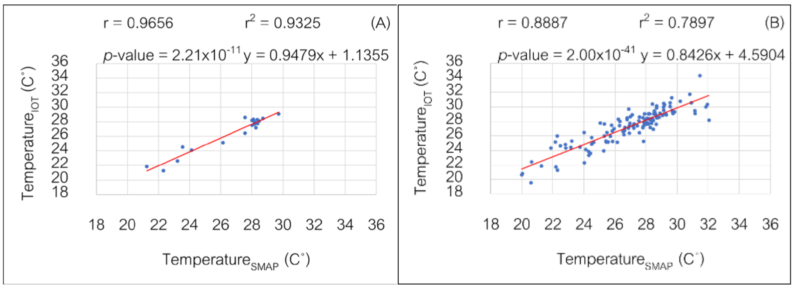


Fig.4 Surface temperature model analysis Monthly average temperature checks Using 2021 temperature data: (A) NMUB Station surface temperature data; (B) aggregate surface temperature data from all stations

สรุป

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ตรวจวัดจากดาวเทียม SMAP และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ โดยใช้การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว 3 แบบ ได้แก่ แบบค่าเฉลี่ยรายวัน แบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน และแบบค่าเฉลี่ยรายเดือน พบว่าค่าความสัมพันธ์ในเชิงสถิติแบบค่าเฉลี่ยรายวัน ในเดือนกันยายน 2021(ชุดข้อมูลตัวแทนของหน้าฝน) มีค่าการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ (r = 0.4894, r^2 = 0.2395, *p*-value = 0.0111) จึงใช้การรวมชุดข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยรายวัน ในเดือนมีนาคมและเดือนกันยายน 2021 ทำให้มีค่าการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ที่สูงขึ้น และได้สมการเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์แบบรายวัน คือ

y = 1.0807x - 2.1538 แต่สมการแบบค่าเฉลี่ยรายวันดังกล่าวนี้ ถ้านำไปใช้อาจทำให้ข้อมูลของหน้าฝนยังไม่ได้ค่าที่ใกล้เคียงความจริง ส่วนแบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน ในเดือนมีนาคมและเดือนกันยายน 2021 ได้ค่าการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน และการรวมชุดข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวแบบค่าเฉลี่ยราย 10 วัน ทำให้มีค่าการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ที่สูงขึ้น และได้สมการเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์แบบราย 10 วัน คือ y = 1.1026x - 2.7242 ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องสูงสุดในการนำสมการมาใช้ควรเป็นข้อมูลที่ได้จากตัวแทนของช่วงเวลาที่ตรงกัน เช่น การจะนำสมการใช้ในการปรับแก้ค่าอุณหภูมิพื้นผิวในหน้าแล้ง ควรใช้ข้อมูลตัวแทนของหน้าแล้งโดยตรง ซึ่งถ้าใช้ข้อมูลที่รวมทุกฤดูกาล ค่าความถูกต้องที่ได้อาจจะลงลง เนื่องจากเป็นค่าเฉลี่ยของทุกฤดูกาล และแบบค่าเฉลี่ยรายเดือนให้ค่าการวิเคราะห์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 9 สถานี และมีสถานีสังเกตที่มีค่าแตกต่างจาก 9 สถานี คือ สถานี มัสยิดกาวมินมูฮายีริน ซึ่งมีค่าการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าปกติ ทำให้ค่าการวิเคราะห์ที่เป็นข้อมูลจากการรวม 10 สถานี ได้ค่าการวิเคราะห์ที่ลดลง และจากการรวมข้อมูลจาก 10 สถานี ได้สมการเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์แบบรายเดือน คือ y = 0.8426x + 4.5904 และใช้สมการแบบรายเดือนข้างต้น นำมาใช้ปรับแก้ค่าข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากดาวเทียม SMAP ในโปรแกรม QGIS เป็นการแสดงข้อมูลอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปโดยแบ่งเป็นชั้นสี จะได้ภาพเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิก่อนและหลังที่ได้รับการปรับปรุงข้อมูลที่ให้ค่าใกล้เคียงความจริง แสดงดัง Fig. 5 เพื่อให้ได้ค่าการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด อาจใช้การพิจารณาเป็นพื้นที่ เนื่องจากแต่ละพื้นที่มีสภาพแวดล้อมต่างกัน และอาจต้องตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์การตรวจวัดด้วยอีกทางหนึ่ง

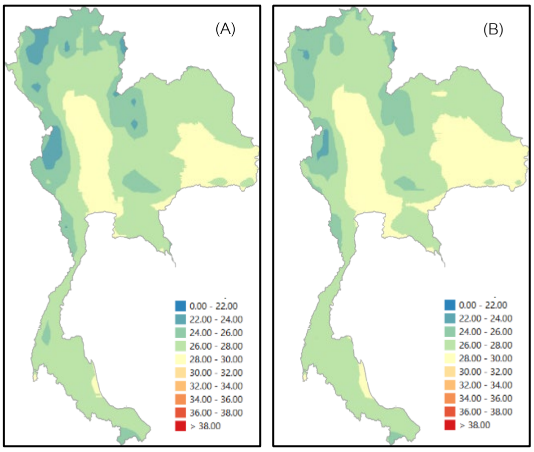


Fig.5 Monthly composite surface temperature data for 2021: (A) surface temperature data derived from satellite imagery; (B) Developed surface temperature data

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.อนุเผ่า อบแพทย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พ.ท.สรวิศ สุภเวชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลสภาพภูมิอากาศของสถานีตรวจวัดอันเป็นประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

ขจรศักดิ์ ศิริโรจน์วัฒนกูล, อภินิติ โชติสังกาศ, สรวิศ สุภเวชย์, กฤตนัย ต่อศรี, ณัฐสิทธิ์ ทองเลิศ. 2565. การประยุกต์เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่งเพื่อประเมินความชื้นและรอยแตกจากการแห้งระเหยของดินเม็ดละเอียด. ใน: รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27. เชียงราย, หน้า 5.

วัชระ เสือดี. 2558. วิศวกรรมชลประทานเบื้องต้น. สถาบันพัฒนาการชลประทาน สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน. นนทบุรี.

อภินิติ โชติสังกาศ และคณะ. 2564. รายงานการศึกษาเบื้องต้น: โครงการการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินจากระบบโทรมาตร เทคโนโลยีรีโมทเซนซิ่ง และปัจจัยทางอุทกธรณี.

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำจำหน่ายด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ กรณีศึกษา: การประปานครหลวง

A study of factors affecting the amount of water sold using multiple regression analysis: Case study of metropolitan waterworks authority

<u>อภิรักษ์ นุกูลรัตน์</u>*, วัชรินทร์ วิทยกุล, พิพัฒน์ สอนวงษ์

<u>Apirak Nukulrat</u>*, Watcharin Witayakul, Pipat Sornwong

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: apirak.nu@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำจำหน่ายในพื้นที่ให้บริการของการประปานครหลวง (กปน.) ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นข้อมูลเปิดจากหน่วยงานสำนักงานสถิติแห่งชาติ ผู้วิจัยสนใจศึกษาตัวแปรอิสระหลายปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ได้แก่ จำนวนประชากรในพื้นที่ รายได้ครัวเรือน อัตราค่าน้ำ และปัจจัยทางด้านภูมิอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ซึ่งผู้วิจัยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่ร่วมทำนายตัวแปรตาม คือ จำนวนประชากรในพื้นที่ และอุณหภูมิ โดยสมการทำนายสามารถใช้ในการทำนายปริมาณความต้องการน้ำประปาในพื้นที่ กปน. ได้ถูกต้อง 86.5% โดยมีค่า R-Square เท่ากับ 0.865 Adjusted R-Square เท่ากับ 0.826 และสมการทำนายมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากได้สอดคล้องตามเงื่อนไขการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ

คำสำคัญ: การประปานครหลวง, การวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ, ปริมาณน้ำจำหน่าย

Abstract

This research aims to study factors affecting the amount of water sold in the Metropolitan Waterworks Authority (MWA) service areas. The National Statistical Office discloses data used in this research. The researcher is interested in studying several independent variables in economic and social factors, such as population, household income, water tariff rate, and climatic factors such as temperature, and rainfall. The researcher uses a multiple regression analysis that shows various predictor variables: the number of populations in the area, and the temperature. The prediction equation could be used to predict the volume of tap water sold in the MWA area with an accuracy of 86.5% with the R-square value of 0.865, adjusted R- Square is 0.826. The prediction equation was reliable because it satisfies the multiple regression analysis conditions.

Keywords: Amount of water sold, Metropolitan Waterworks Authority, Multiple regression analysis

คำนำ

การประปานครหลวง (กปน.) เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ มีหน้าที่ผลิต จัดส่ง และจำหน่ายน้ำประปาในพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ จากข้อมูลปี พ.ศ. 2564 กปน. มีปริมาณน้ำจำหน่าย 1,416.2 ล้าน.ลบ.ม. เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2555 เป็นจำนวน 98.9 ล้าน.ลบ.ม. คิดเป็น 8% (การประปานครหลวง, 2564) ดังนั้นหากเราทราบถึงขนาดและทิศทางอิทธิพลของปัจจัย ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำจำหน่าย จะทำให้คาดการณ์ปริมาณน้ำที่ต้องผลิตได้อย่างแม่นยำ รวมถึงการเตรียมทรัพยากรของ กปน. รองรับการผลิต และการบริการเพื่อให้ผลิตส่งจ่ายน้ำ ให้กับประชาชนได้อย่างต่อเนื่อง

ผู้วิจัยพบว่ามีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณความต้องการน้ำประปาของประชาชนในพื้นที่ให้บริการของ กปน. ทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ได้แก่ จำนวนประชากรในพื้นที่ รายได้ครัวเรือน อัตราค่าน้ำ เป็นต้น ด้านภูมิอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม คือปริมาณน้ำจำหน่ายรายปีของ กปน. กับตัวแปรอิสระหลายตัว เพื่อศึกษาว่าตัวแปรอิสระใดบ้างที่ร่วมกันทำนายหรือพยากรณ์ หรือร่วมกันผันแปรตัวแปรตามได้

Ahmed et al. (2020) เลือกใช้ปัจจัย อุณหภูมิเฉลี่ย ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์ ค่า GDP ค่า CPI และการเพิ่มขึ้นของประชากร ในการพยากรณ์ความต้องการน้ำในอนาคตของสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ (UAE.) ในปี พ.ศ. 2570 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะการถดถอย จากนั้นนำไปพยากรณ์ด้วยวิธี Long Short Term Memory (LSTM) สรุปได้ว่า จากปัจจัยทั้งหมดค่า GDP ค่า CPI และการเติบโตของประชากรเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้น้ำของ UAE. ขณะที่ปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำฝน ถูกเลือกออกเนื่องจากมีความสามารถในการอธิบายความสัมพันธ์ได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย

Lins et al. (2010) เลือกใช้ปัจจัย ตัวแปรเศรษฐกิจและสังคม (รายได้ของครัวเรือน อัตราค่าน้ำประปา และจำนวนครัวเรือนที่เชื่อมโยงถึงกัน) ตัวแปรสภาพภูมิอากาศ (อุณหภูมิเฉลี่ยและปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย) ในการศึกษาปัจจัยที่เป็นตัวชี้วัดการใช้น้ำในครัวเรือนเขตเมือง โดยใช้วิธีถดถอยเชิงพหุ สรุปได้ว่า อัตราค่าน้ำประปา และรายได้ของครัวเรือนเป็นตัวชี้วัดพฤติกรรมการใช้น้ำ

Liu and Xue (2017) ได้คาดการณ์ความต้องการน้ำของประชากรกรุงปักกิ่ง ในปี พ.ศ. 2573 โดยการเปรียบเทียบ 3 วิธี ได้แก่ 1.Water quota method 2.Multiple linear regression 3.Grey prediction model method สรุปได้ว่า การพยากรณ์ที่มีข้อมูลในอดีตจำนวนมากหากใช้วิธีที่ Water quota method และ Grey prediction model method จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า หากเป็นการพยากรณ์ที่ใกล้กับปีปัจจุบัน และทราบปัจจัยที่มีผลกระทบที่แน่นอนจะเหมาะสมกับวิธี Multiple linear regression ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเหมาะสมกับการใช้เทคนิค Multiple linear regression

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในงานวิจัยนี้เสนอการใช้ปัจจัยที่สอดคล้องกับบริบทพื้นที่ให้บริการของ กปน. ซึ่งประกอบด้วยจังหวัด กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ แบ่งออกได้เป็น 2 ด้านเพื่อสร้างโมเดลในการจำลองปริมาณน้ำจำหน่ายของการประปานครหลวง คือ

1) ด้านเศรษฐกิจและสังคม ประกอบด้วย จำนวนประชากร รายได้ครัวเรือน อัตราค่าน้ำ

2) ด้านสภาพภูมิอากาศ ประกอบด้วย อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองปริมาณน้ำจำหน่ายของ กปน. ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ และศึกษาตัวแปรอิสระที่มีต่อปริมาณน้ำจำหน่าย

วิธีการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

สำนักงานสถิติแห่งชาติ (2564ก, 2564ข, 2564ค, 2564ง) ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นสถิติข้อมูลรายปี 10 ปีย้อนหลังของ พ.ศ 2555–2564 ของหน่วยงานสำนักงานสถิติแห่งชาติ โดยทั้งหมดเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ประกอบด้วย ตัวแปรตามจำนวน 1 ตัว คือปริมาณน้ำจำหน่าย และตัวแปรต้นจำนวน 5 ตัวแปร จำแนกเป็นปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคม 3 ตัวแปร ได้แก่ จำนวนประชากรในพื้นที่ รายได้ครัวเรือน และอัตราค่าน้ำ ปัจจัยด้านภูมิอากาศ 2 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิเฉลี่ย และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย แสดงดังนี้

ตัวแปรตาม	Y	คือ ปริมาณน้ำจำหน่าย (Amount of water sold) หน่วย พันล้าน ลูกบาศก์เมตร
ตัวแปรต้น	X_1	คือ จำนวนประชากรในพื้นที่ (Population) หน่วย ล้าน คน
	X_2	คือ รายได้ครัวเรือน (Household income) หน่วย บาท
	X_3	คือ อัตราค่าน้ำ (Water tariff) หน่วย บาท ต่อ ลูกบาศก์เมตร
	X_4	คือ อุณหภูมิเฉลี่ย (Temperature) หน่วย องศาเซลเซียส
	X_5	คือ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย (Rainfall) หน่วย มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัว การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวเหมาะสมกับตัวแปรตามที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ 1 ตัว และตัวแปรอิสระสามารถเป็นได้ทุกประเภทต้องมีอย่างน้อย 2 ตัว และสามารถเขียนในรูปแบบสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ดัง Equation 1 (กัลยา และฐิตา, 2564)

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\ldots+\beta_kX_k+e \quad (1)$$

โดยที่ β_0 คือ ส่วนตัดแกน Y เมื่อกำหนดให้ $X_1=X_2=\ldots=X_k=0$

$\beta_1, \beta_2,\ldots, \beta_k$ เป็นสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงเส้น

กล่าวคือหาก X_1 เปลี่ยนไป 1 หน่วย ค่า Y เปลี่ยนไปโดยเฉลี่ย β_1 หน่วย

การคัดเลือกตัวแปรทำนายเข้าสู่สมการแบบขั้นบันได (Stepwise Method)

กัลยา และฐิตา (2564) วิธี Stepwise เป็นวิธีคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมาการที่นิยมใช้กันมาก จะเป็นวิธีที่ใช้เกณฑ์ของวิธี Forward และวิธี Backward ผสมกัน กล่าวคือเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าไปในสมการถดถอยทีละตัวโดยนำตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงที่สุดเข้ามาก่อนและทดสอบระดับนัยสำคัญทางสถิติ ถ้ามีนัยสำคัญก็จะคัดเลือกตัวแปรอิสระในลำดับถัดไปเข้าสู่สมการ เมื่อนำตัวแปรใหม่เข้าสมการต้องทดสอบว่าตัวแปรอิสระทุกตัวที่อยู่ในสมการยังควรอยู่ในสมการหรือไม่ ถ้าไม่ก็จะถูกคัดออกแล้วจะเลือกตัวแปรอิสระในลำดำถัดไปเข้ามาแทน ซึ่งการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งหมดตัวแปรอิสระก็จะถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการ

กรอบความคิดการวิจัย

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม คือปริมาณน้ำจำหน่ายรายปีของการประปานครหลวง กับตัวแปรอิสระ 5 ตัว มีกรอบความคิดการวิจัยแสดงดัง Fig.1

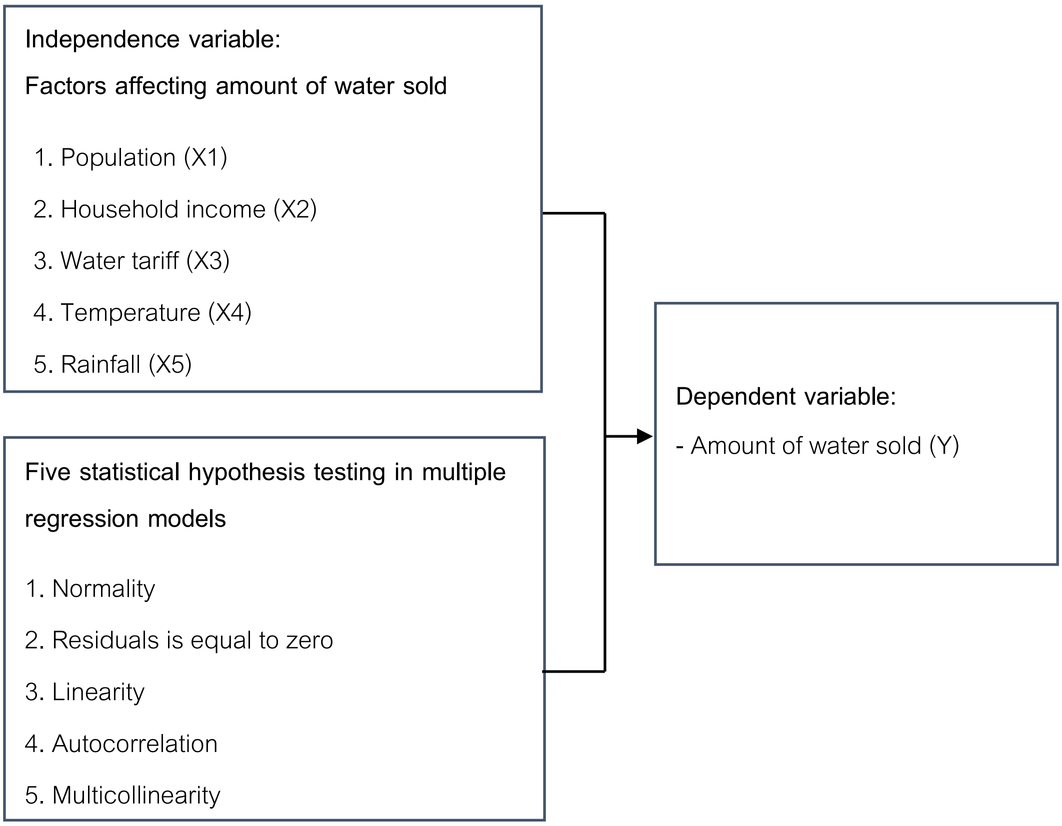


Fig. 1 Conceptual framework

ผลการคัดเลือกตัวแปรและค่าประมาณพารามิเตอร์

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม SPSS for Windows (Statistical Package for Social Science) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยในการทดสอบทางสถิติ โดยเลือกการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) และกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ (Level of significance) เท่ากับ 0.05 และใช้วิธี Stepwise เลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการความถดถอย

จาก Table 1 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ของ Model 1 เทียบกับ Model 2 พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.731 และ 0.865 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Model 2 มีประสิทธิภาพในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำจำหน่ายได้ 86.5% ได้ดีกว่า Model 1 ที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้เพียง 73.1%

Table 1 Model summary of dependent variable: Amount of water sold

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.855[a]	.731	.698	.024021	
2	.930[b]	.865	.826	.018200	1.705

a. Predictors: (Constant), Population

b. Predictors: (Constant), Population, Temperature

จาก Table 2 ของ Model 2 เมื่อพิจารณา p-value ของตัวแปร จำนวนประชากร เท่ากับ 0.001 และตัวแปรอุณหภูมิ เท่ากับ 0.034 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 สรุปได้ว่าทั้งตัวแปรจำนวนประชากร และตัวแปรอุณหภูมิ ส่งผลต่อปริมาณน้ำจำหน่ายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และเมื่อพิจารณาค่า Unstandardized B พบว่าตัวแปรจำนวนประชากร เท่ากับ 0.156 ซึ่งสูงกว่าตัวแปรอุณหภูมิ เท่ากับ 0.070 สรุปได้ว่า ตัวแปรจำนวนประชากรมีอิทธิพลสูงกว่าแปรอุณหภูมิ สามารถนำมาเขียนสมการพยากรณ์ในรูปคะแนนดิบ ได้ดัง Equation 2

$$\text{Amount of water sold} = -2.008 + 0.156\,(\text{Population}) + 0.070\,(\text{Temperature}) \quad (2)$$

เมื่อพิจารณาตัวแปรที่ถูกคัดออกของ Model 2 จาก Table 3 พบว่าตัวแปร อัตราค่าน้ำ รายได้ครัวเรือน และปริมาณน้ำฝน มีค่า *p*-value อยู่ระหว่าง 0.406–0.674 ซึ่งสูงกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวแปรทั้ง 3 ไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำจำหน่าย ที่ระดับ 0.05

Table 2 Coefficients of dependent variable: Amount of water sold

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	Collinearity Statistics Tolerance	Collinearity Statistics VIF
1	(Constant)	-.143	.331		-.432	.677		
	Population	.176	.038	.855	4.664	.002	1.000	1.000
2	(Constant)	-2.008	.751		-2.673	.032		
	Population	.156	.030	.757	5.261	.001	.933	1.072
	Temperature	.070	.027	.379	2.633	.034	.933	1.072

Table 3 Excluded variables of dependent variable: Amount of water sold

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics Tolerance
1	Water tariff	.103[a]	.438	.675	.163	.676
	Household income	.303[a]	1.105	.306	.385	.436
	Rainfall	-.171[a]	-.924	.386	-.330	.996
	Temperature	.379[a]	2.633	.034	.705	.933
2	Water tariff	.154[b]	.894	.406	.343	.668
	Household income	.265[b]	1.323	.234	.475	.434
	Rainfall	-.069[b]	-.442	.674	-.178	.908

a. Predictors in the Model: (Constant), Population

b. Predictors in the Model: (Constant), Population, Temperature

การทดสอบเงื่อนไขการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุนั้นจำเป็นต้องพิจารณาข้อตกลงเบื้องต้น (Assumption) เพื่อให้ได้คำตอบของการพยากรณ์หรือทำนายที่เหมาะสมที่สุด โดยการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุนั้นมีข้อควรพิจารณา และรายละเอียด 5 ข้อ (กัลยา, 2564) (พงษ์ศักดิ์, 2560) ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถผ่านข้อตกลงเบื้องต้นได้ทั้งหมดรายละเอียด ดังนี้

1) ความคลาดเคลื่อน (residual) แจกแจงแบบปกติ

งานวิจัยนี้เลือกใช้สถิติ Shapiro-Wilk เนื่องจากขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 50 จาก Table 4 พบว่า *p*-value เท่ากับ 0.089 มากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อน (error หรือ residual) มีการแจกแจงแบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

Table 4 Test of normality of standardized residual

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Standardized Residual	.224	10	.167	.866	10	.089

2) ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็น 0

จาก Table 5 เมื่อพิจารณา One-sample statistics พบว่าค่าเฉลี่ย (Mean) ของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.00 ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็น 0

Table 5 One sample statistics of standardized residual

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Standardized Residual	10	.000	.881	.278

3) ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่

จากการพิจารณา Scatterplot ดัง Fig. 2 พบว่าข้อมูลกระจายตัวอยู่ในช่วง ±2 ดังนั้น สรุปได้ว่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ (residual) ที่ทุกจุดบนเส้นถดถอยมีค่าเท่ากัน หรือมีค่าคงที่

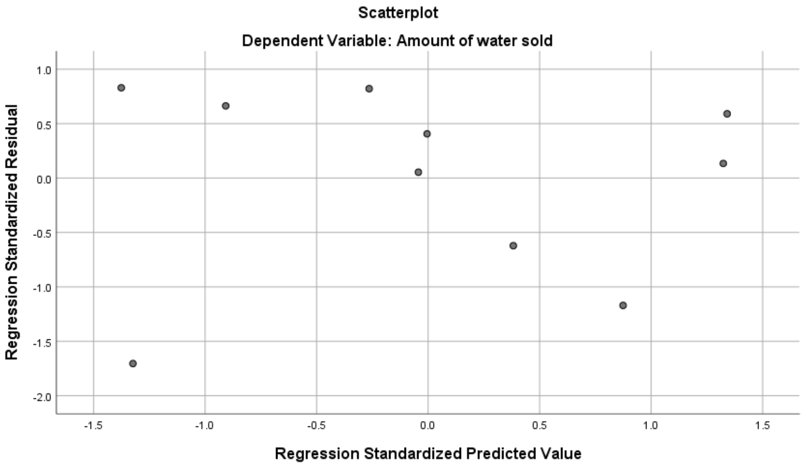


Fig 2 Scatterplot of standardized predicted value and regression standardized residual

4) e_t และ e_{t+1} เป็นอิสระต่อกัน

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนด้วยค่าทดสอบสถิติ Durbin-Watson จาก Table 1 เท่ากับ 1.705 ซึ่งอยู่ระหว่าง (1.5-2.5) ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปเป็นอิสระต่อกัน

5) ตัวแปรอิสระต้องอิสระต่อกัน

เมื่อพิจารณาค่า ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Collinearity statistics) จาก Table 2 พิจารณาค่าสถิติ Tolerance เท่ากับ 0.933 ซึ่งมีค่าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระ ซึ่งได้แก่จำนวนประชากร และอุณหภูมิ ไม่มีความสัมพันธ์กัน เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณาสถิติ VIF (Variance inflation factor) เท่ากับ 1.072 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กันหรือเป็นอิสระต่อกัน

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณความต้องการน้ำประปาของประชาชนในพื้นที่ให้บริการของ กปน. ซึ่งผู้วิจัยสนใจศึกษาตัวแปรอิสระทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ได้แก่ จำนวนประชากร รายได้ครัวเรือน อัตราค่าน้ำ และปัจจัยทางด้านภูมิอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ พบว่า

1) จำนวนประชากร และอุณหภูมิ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำจำหน่ายได้ 86.5% ส่วนอีก 13.5% เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่ได้นำมาพิจารณา

2) จำนวนประชากรและอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ทางบวกต่อปริมาณน้ำจำหน่าย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยอิทธิพลจากจำนวนประชากรส่งผลต่อปริมาณน้ำจำหน่าย สูงกว่าอุณหภูมิ

3) ตัวแปรที่ถูกคัดออก ได้แก่ รายได้ต่อครัวเรือน อัตราค่าน้ำเฉลี่ย และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย ไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำจำหน่าย ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ไม่มีอิทธิพลทางตรงแต่อาจมีอิทธิพลทางอ้อมต่อปริมาณน้ำจำหน่าย

ข้อเสนอแนะ

1) จากผลการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้การประปานครหลวง และผู้ที่สนใจ นำปัจจัยทางด้านจำนวนประชากร และอุณหภูมิเฉลี่ย ในการร่วมพยากรณ์ปริมาณน้ำจำหน่าย หรือปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่การให้บริการของ กปน.

2) งานวิจัยชิ้นนี้ได้สมการที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำผลิตได้ 86.5% ยังมีส่วนที่ไม่สามารถอธิบายได้อีก 13.5% ดังนั้นผู้สนใจต่อยอดสามารถพัฒนาสมการดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2564. สถิติสำหรับงานวิจัย, พิมพ์ครั้งที่ 13. ห้างหุ่นส่วนจำกัดสามลดา. กรุงเทพฯ.

กัลยา วานิชย์บัญชา, ฐิตา วานิชย์บัญชา. 2564. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล, พิมพ์ครั้งที่ 34. ห้างหุ่นส่วนจำกัดสามลดา. กรุงเทพฯ.

การประปานครหลวง. 2564. รายงานประจำปี 2564 การประปานครหลวง. ตุลาคม 2563–มิถุนายน 2564.

พงษ์ศักดิ์ ซิมมอนด์ส. 2564. การทดสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง. วารสารวิจัยและพัฒนาหลักสูตร 7: 20–37.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2564. ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายปี จำแนกตามจังหวัด. https://osstat.nso.go.th/file/21/Data_21040100_0401.xlsx, 1 ตุลาคม 2565.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2564. จำนวนผู้ใช้น้ำ ปริมาณน้ำผลิต และการจำหน่ายของการประปานครหลวง ปีงบประมาณ 2555–2564. http://statbbi.nso.go.th/staticreport/Page/sector/TH/report/sector_21_7_TH_.xlsx, 1 ตุลาคม 2565.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2564. ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี จำแนกตามจังหวัด. https://osstat.nso.go.th/file/21/Data_21040100_0201.xlsx, 1 ตุลาคม 2565.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2564. อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี จำแนกตามจังหวัด. https://osstat.nso.go.th/file/21/Data_21040100_0101.xlsx, 1 ตุลาคม 2565.

Lins, G.M. L., Cruz, W.S., Vieira, Z.M.C.L., Neto, F.A.C., Miranda, É.A.A. 2010. Determining indicators of urban household water consumption through multivariate statistical technique. Journal of Urban and Environmental Engineering 4: 74–80.

Ahmed, V., Saad, A., Saleh, H., Saboor, S., Kasianov, N., Alnaqbi, T. 2020. Implementation of water demand forecasting model to aid sustainable water supply chain management in UAE. Preprints. 2020: 2020110205. doi.org/10.20944/preprints202011.0205.v1.

Liu, Z., Xue, L. 2017. Forecast of water demand in Beijing in 2030. AIP Conference Proceedings.1864: 020125. doi.org/10.1063/1.4992942

แบบจำลองการจัดการน้ำจากพายุฝนเพื่อการจัดการน้ำจากพายุฝนในเมืองอย่างยั่งยืน กรณีศึกษา: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Storm water management model (SWMM) for sustainable urban stormwater management: Case study Kasetsart University

ศุภณัฐ เดือนศิริรัตน์*, **ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**

Suphanut Duensirirat*, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Suphanut.du@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการจัดการน้ำจากพายุฝนให้สอดคล้องกับสถานการณ์วิกฤติที่เกิดขึ้นในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ในวันที่ 7 กันยายน 2565 โดยเก็บข้อมูลน้ำท่วมจากเหตุการณ์วิกฤติ ณ วันที่ 7 กันยายน 2565 เกิดปัญหาน้ำท่วมขังหลายจุดรอบพื้นที่ในมหาวิทยาลัย และเก็บข้อมูลระบบระบายน้ำจากเอกสารร่วมกับการเดินสำรวจและสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องจากกองแผนงาน และกองยานพาหนะอาคารและสถานที่ จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Storm Water Management model (SWMM) โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเก็บโดยสำนักการระบายน้ำกรุงเทพมหานครในช่วงวันที่ศึกษา พบว่าต้องทำการปรับค่าระดับน้ำที่ค้างอยู่ในท่อ ร่วมกับอัตราการระบายน้ำออกที่สอดคล้องกับความเป็นจริงในวันดังกล่าว จึงจะได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุด แบบจำลองนี้ จะใช้ในการจำลองมาตรการในการพัฒนามหาวิทยาลัยให้สามารถจัดการน้ำจากพายุฝนได้อย่างยั่งยืน เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในการรับมือกับสถานการณ์น้ำท่วมในเขตเมืองที่อาจเกิดขึ้นบ่อยครั้งในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: การจัดการน้ำจากพายุฝน, การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ, การพัฒนาที่ส่งผลกระทบน้อย, การพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืน, แบบจำลองการจัดการน้ำจากพายุ

Abstract

Objective of this study is to develop storm water management model which can reflect the actual critical flood situation happened in Kasetsart University on 7 September 2022. Actual flooding areas were record on the date of critical flood. The existing stormwater drainage system data was collected from archival data, actual observation and in-depth interviews with staff from Planning and Maintenance divisions. Then Storm Water Management Model (SWMM) was deployed to model the situation on the date under studied using rain fall data from Department of Drainage and Sewerage BMA. It was found that the water level maintained in the system and the rate of outflow have to be calibrated to reflect actual situation. This model will provide as base case to next step of our study which will model alternatives of Low Impact Development appropriate to manage storm water in this case study which would be beneficial to urban storm water management in the future.

Keywords: Climate change, Low impact development, Storm water management, Storm water management model, Sustainable urban development

คำนำ

ปัญหาน้ำท่วมเมืองเป็นปัญหาที่ทุกประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นปัญหาที่ทำให้เกิดผลกระทบตามมามากมาย เช่น ปัญหาน้ำท่วมขัง ปัญหาขยะมูลฝอย และปัญหาคุณภาพน้ำ (Wulliman and Thomas, 2005) สาเหตุของน้ำท่วมเมืองเกิดจากปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและการขยายตัวของเมืองอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจัดการน้ำจากพายุฝนในเมืองอย่างยั่งยืน (Barbosa et al., 2012) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จำเป็นต้องสร้างสิ่งปลูกสร้างโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มเติมเพื่อรองรับจำนวนนิสิตและความต้องการที่ต้องปรับเปลี่ยนไปในอนาคต (ศนิ, 2561) ส่งผลให้พื้นที่ในมหาวิทยาลัยนั้น มีจำนวนพื้นผิวที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ลดน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับปัญหาที่ทั่วโลกกำลังประสบ

งานวิจัยนี้จึงมีความพยายามที่จะหาวิธีรับมือกับพายุฝนและปัญหาน้ำท่วมเมือง โดยเลือกเขตกรณีศึกษามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์วิกฤติ ณ วันที่ 7 กันยายน 2565 ที่เกิดปัญหาน้ำท่วมหลายจุดรอบมหาวิทยาลัย โดยใช้โปรแกรม Storm Water Management model (SWMM) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาน้ำท่วมในเขตเมืองซึ่งมีความเหมาะสมในเรื่องการโมเดลการจัดการน้ำจากพายุฝน และยังเป็นโปรแกรมที่เปิดให้ใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่ายจากองค์กร U.S. Environmental Protection Agency (2022) โดยในบทความนี้เป็นส่วนแรกของงานวิจัยที่ต้องการพัฒนาแบบจำลองการจัดการน้ำจากพายุฝนให้สอดคล้องกับสถานการณ์วิกฤติที่เกิดขึ้นในช่วงเดือนกันยายน 2565 เพื่อจะเป็นแบบจำลองพื้นฐานในจำลองการจัดการน้ำจากพายุฝนอย่างยั่งยืนด้วยมาตรการต่างๆในโปรแกรมต่อไป โดยจะเก็บข้อมูลพื้นที่ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่มีปัญหาน้ำท่วมขังในช่วงวันที่ศึกษา เก็บข้อมูลระบบระบายน้ำจริงและนำข้อมูลปรับเทียบโปรแกรมให้มีความถูกต้องตรงกับความเป็นจริงให้มากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

Storm water management model (SWMM)

ในการสร้างแบบจำลอง กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยโปรแกรม SWMM นั้นเป็นโปรแกรมสร้างแบบจำลองปัญหาน้ำท่วมเมืองจากปริมาณน้ำฝน-น้ำท่า ซึ่งสามารถใช้เหตุการณ์หรือปริมาณน้ำฝนได้ทั้งแบบเหตุการณ์เดี่ยว และจำลองเหตุการณ์ปริมาณน้ำฝนแบบคาบการเกิดในอนาคตได้ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาน้ำท่วมเมืองที่เกิดขึ้นจากพายุฝนในแบบจำลองต่างๆ และนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้หาวิธีแก้ไขปัญหาต่อไป

ปริมาณน้ำฝน

งานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจริงที่เกิดขึ้น ณ วันที่ 6 กันยายน 2565 ถึง วันที่ 7 กันยายน 2565 โดยใช้ข้อมูลจากสำนักการระบายน้ำกรุงเทพมหานคร ปริมาณน้ำฝนในวันดังกล่าวทำให้ พื้นที่ในมหาวิทยาลัยได้รับผลกระทบจากปริมาณน้ำฝนจำนวนมากและทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมขังในมหาวิทยาลัยเป็นประวัติการณ์ ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำฝนจำนวนมากที่ทำให้จุดระบายน้ำออกของพื้นที่มหาวิทยาลัยนั้นมีระดับน้ำที่สูงเช่นกัน ทำให้มหาวิทยาลัยไม่สามารถระบายน้ำออกได้ตามปกติ และเกิดปัญหาน้ำท่วมตามมาหลายจุดรอบพื้นที่

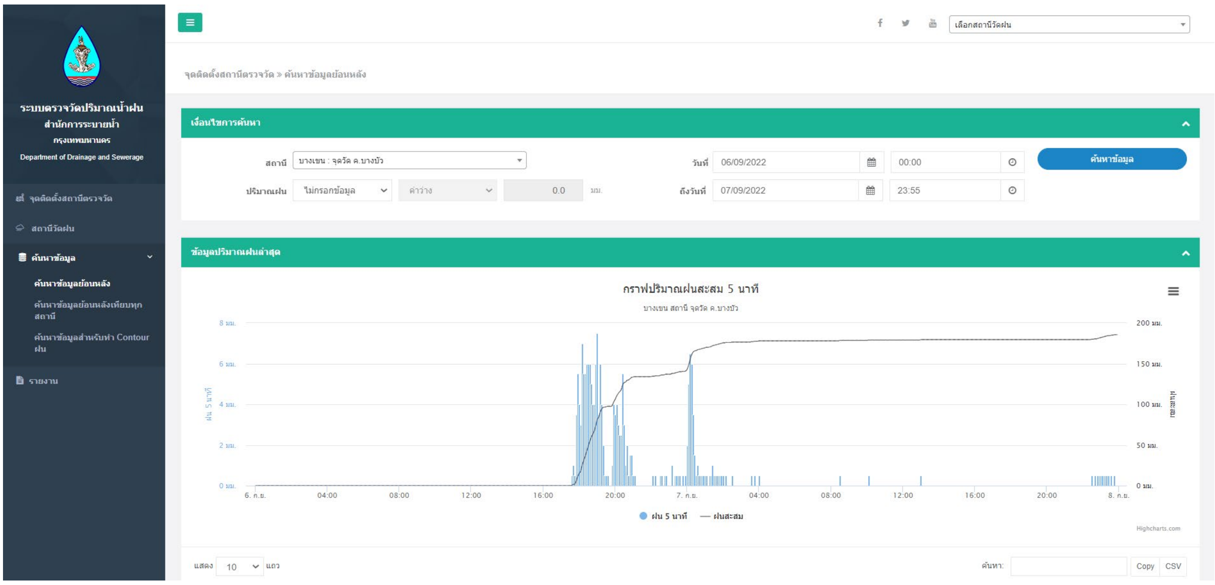


Fig. 1 Rain fall data on 6 September 2022 – 7 September 2022 from Department of Drainage and Sewerage

ข้อมูลพื้นที่-ระบบระบายน้ำในพื้นที่กรณีศึกษา

ได้รับข้อมูลพื้นที่-ระบบระบายน้ำในพื้นที่กรณีศึกษาจากทางกองแผนงาน-กองยานพาหนะอาคารและสถานที่ โดยเป็นข้อมูลแผนที่ในปี พ.ศ. 2558 ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงให้เป็นตามจริงในปัจจุบัน จึงได้ทำการเดินสำรวจและรังวัดเพิ่มเติม ในส่วนของอาคาร, ทางเท้า, พื้นคอนกรีต, ลานจอดรถ และคูน้ำดาด ที่เพิ่มเติมขึ้นมาจากข้อมูลแผนที่ที่ได้รับ ร่วมกับการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในการก่อสร้างและบำรุงรักษาระบบระบายน้ำ ในช่วงเดือน กรกฎาคม – กันยายน 2565 จึงจะได้แบบที่น่าเชื่อได้ว่าสอดคล้องกับความเป็นจริงที่สุด

ระบบระบายน้ำของมหาลัยนั้นจะแยกเป็น 2 ส่วน คือระบบระบายน้ำผิวดิน และระบบระบายน้ำของเสียจากตัวอาคาร โดยงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลของระบบระบายน้ำผิวดินเพียงอย่างเดียวเนื่องจากระบบระบายน้ำของเสียจากตัวอาคารจะมีการเดินระบบระบายน้ำเป็นลักษณะท่อใต้ดิน ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นจะแก้ปัญหาน้ำท่วม-น้ำท่าที่เกิดขึ้นในพื้นที่กรณีศึกษา โดยเฉพาะระบบระบายน้ำผิวดินในพื้นที่ที่อยู่ใกล้ชิดกับถนนในพื้นที่มหาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน เป็นหลัก เพื่อจะได้ทราบถึงปัญหาน้ำท่วม-น้ำท่าที่เกิดขึ้นในพื้นที่กรณีศึกษา และวางแผนรับมืออย่างยั่งยืนต่อไป

ข้อมูลระยะทาง

เนื่องจากทางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ไม่ได้มีการรังวัดพื้นที่มาเป็นระยะเวลานาน จึงต้องทำการรังวัดเพิ่มเติมเพื่อหาข้อมูลระยะทางในพื้นที่กรณีศึกษา ในช่วงแรกได้ใช้ล้อวัดระยะในการรังวัดระยะทางของทางระบายน้ำ แต่ผลที่ได้ออกมานั้นมีความคลาดเคลื่อน ±10–15 เซนติเมตร ในการเดินรังวัดในจุดเดิม ทำให้งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลจากระบบดาวเทียมจาก Google Earth Pro (Minmin and Shuanggen, 2019) ซึ่งจากการทดสอบการใช้งานข้อมูลจากระบบดาวเทียมกับพื้นที่กรณีศึกษา มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ±30–50 เซนติเมตร ซึ่งยอมรับได้ จึงได้เลือกใช้ข้อมูลระยะทางจากการดึงข้อมูลจากระบบดาวเทียมด้วยโปรแกรม Google Earth Pro ในงานวิจัยนี้

พื้นที่รับน้ำย่อย (Sub-Catchment)

วิธีการแบ่งพื้นที่รับน้ำย่อยในพื้นที่กรณีศึกษาเริ่มต้นจากการแบ่งพื้นที่ตามเส้นถนนหลัก, เขตสิ่งปลูกสร้าง และสำรวจระบบระบายในแต่ละพื้นที่ตามลำดับ (Bai et al., 2018) ทำให้งานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้ 15 พื้นที่รับน้ำย่อย ดังแสดงในขอบเขตพื้นที่กรณีศึกษา ใน (Fig. 2)

ชนิดของระบบระบายน้ำภายในพื้นที่กรณีศึกษา

ในโปรแกรม SWMM ระบบระบายน้ำภายในพื้นที่กรณีศึกษาสามารถแบ่งได้ 4 ชนิดดังนี้ 1.ท่อกลม (Circular), 2.คูน้ำเปิดทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal), 3. บ่อน้ำ (Parabolic), 4.ท่อคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular)

ข้อมูลขนาดท่อและความลึกของระดับน้ำในพื้นที่กรณีศึกษาที่นำมาใช้ในโปรแกรม SWMM

ในส่วนของท่อกลมนั้น อ้างอิงจากข้อมูลของกองยานพาหนะอาคารและสถานที่และการสำรวจเพิ่มเติมจึงเลือกใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ส่วนคูน้ำเปิดทรงสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากไม่มีข้อมูลคูน้ำเปิดให้ จากการสุ่มรังวัดเพิ่มเติมถึง 10 จุด ทำให้ทราบว่าระดับน้ำในคูน้ำเปิดปัจจุบันมีลักษณะเป็นทางลาด โดยส่วนที่มีใบไม้ทับทบด้านใต้มีความลึกเฉลี่ย 1 เมตร ในส่วนที่ปลายน้ำอีกฝั่งของคูน้ำที่มีการทับทบของใบไม้ที่น้อยกว่าจะมีความลึกเฉลี่ยที่ 2 เมตร จากการสอบถามเพิ่มเติมและหารือกับทางกองยานพาหนะอาคารและสถานที่ คูน้ำเปิดในมหาวิทยาลัยในปัจจุบันมี ความลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.50 เมตร และเนื่องจากโปรแกรม SWMM สามารถใส่ความลึกของเส้นทางคูน้ำเปิดได้ระดับเดียวจึงเลือกใช้ระดับความลึกที่ 1.50 เมตร, ในส่วนของบ่อน้ำ เนื่องจากการรังวัดบ่อน้ำเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะต้องใช้ข้อมูล ณ จุดลึกสุดของบ่อน้ำมาใช้ ทำให้ผู้วิจัยเลือกขอบเขตพื้นที่กรณีศึกษาของมหาวิทยาลัยนั้นอยู่บริเวณในและมีจุดบ่อน้ำให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อน โดยใช้ข้อมูลเก่าที่ทางกองยานพาหนะอาคารและสถานที่ได้วัดเอาไว้มีค่าความลึก ณ จุดลึกสุดของบ่อน้ำที่ 1.50 เมตร, และในส่วนสุดท้าย ท่อคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสี่เหลี่ยม จากข้อมูลพบว่ามีขนาด 1.201.20 เมตร

ข้อมูลพื้นที่ที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ของแต่ละ พื้นที่รับน้ำย่อย

เริ่มจากนำพื้นที่พื้นที่รับน้ำย่อย แต่ละส่วนมาวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านด้วย อาคาร ทางเท้าพื้นคอนกรีต ลานจอดรถ และถนน จากข้อมูลแผนที่ได้รับจากกองแผนงานและการสำรวจเพิ่มเติมอัพเดทเป็นปัจจุบัน เนื่องจากขอบเขตพื้นที่กรณีศึกษาอยู่บริเวณในของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงทำให้มีค่าพื้นที่ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ในพื้นที่รับน้ำย่อยหนึ่งๆ น้อยที่สุดเท่ากับ 20% และมากที่สุดเท่ากับ 80% เนื่องจากบางพื้นที่เป็นบริเวณที่มีอาคารเรียนอยู่ค่อนข้างหนาแน่น

การสอบเทียบและการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ภายใต้เหตุการณ์วันที่ 7 กันยายน 2565

การสอบเทียบแบบจำลองเกิดจากองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ 1. จากข้อมูลในอดีตและการหารือกับกองแผนงาน-กองยานพาหนะอาคารและสถานที่, 2. จากข้อมูลรังวัดเพิ่มเติมและสังเกต และ 3. จากผลลัพธ์ของแบบจำลองในโปรแกรม SWMM เพื่อให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงของข้อมูลสถานการณ์ ณ เหตุการณ์วันที่ 7 กันยายน 2565 มากที่สุด

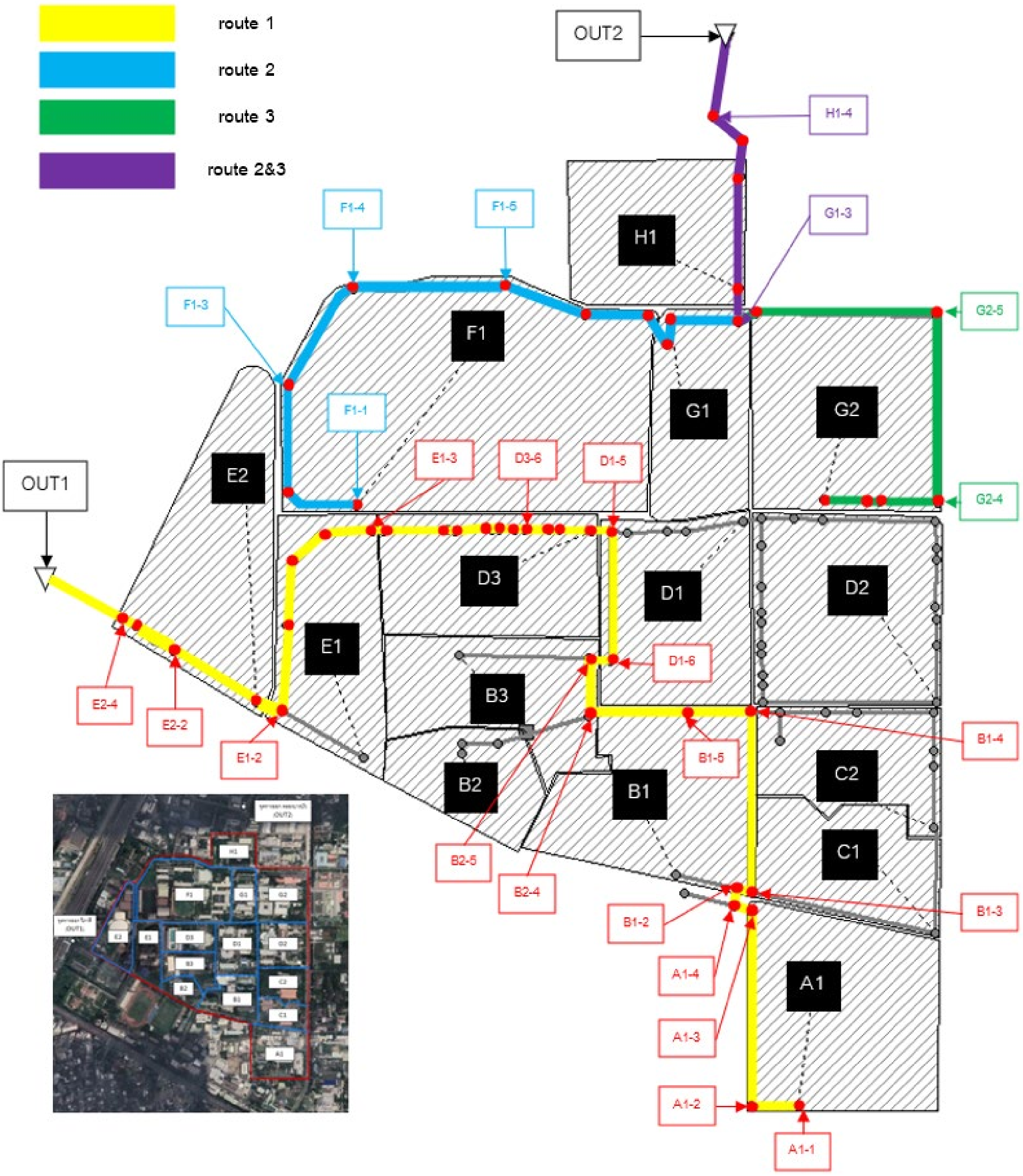


Fig. 2 Plan of the study area, sub-catchment area and drainage system in SWMM

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากแบบจำลองในโปรแกรม SWMM สรุปผลให้เห็นว่า มี จุดที่มีน้ำท่วม (Node Flooding) ทั้งหมด 8 จุด และพื้นที่รับน้ำย่อย ที่มีปัญหาน้ำท่วมทั้งหมด 5 พื้นที่ ซึ่งไม่ตรงกับความเป็นจริง ณ วันที่ 7 กันยายน 2565 ที่พื้นที่กรณีศึกษานั้น เกิดปัญหาน้ำท่วมแทบจะทุกจุดของพื้นที่กรณีศึกษา อันเป็นเนื่องมาจาก ณ วันดังกล่าวปริมาณฝนที่มากทำให้พื้นที่โดยรอบและจุดระบายน้ำออกนอกพื้นที่ของมหาลัยนั้น มีระดับน้ำที่สูงเช่นเดียวกัน ทำให้ทางมหาวิทยาลัยไม่สามารถระบายน้ำออกได้ตามปกติ อีกทั้งโปรแกรมยังมองระบบระบายน้ำนั้นว่างเปล่า ซึ่งในความเป็นจริงแล้วระบบระบายน้ำแบบคูน้ำเปิดภายในพื้นที่มหาลัยนั้น มีน้ำระดับน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ภายใน สองส่วนนี้ทำให้ตัวโมเดลมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง

เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของโมเดลดังกล่าว ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองเพิ่มเติม 2 แบบจำลองดังนี้

กรณีที่ 1: ปรับแก้ข้อมูลของระบบระบายน้ำคูน้ำและบ่อน้ำให้สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยคำนึงถึงระบบระบายน้ำคูน้ำในมหาวิทยาลัยนั้นมีน้ำหล่อเลี้ยงในคูน้ำตลอดเวลา โดยปรับเปลี่ยนระดับความลึกที่ใช้จาก 1.5 เมตร เป็นระดับความลึกที่ 0.6 เมตร ตามคำแนะนำที่ได้จากกองยานพาหนะอาคารและสถานที่ ผลลัพธ์ที่ได้คือ มี จุดที่มีน้ำท่วมทั้งหมด 20 จุด และ พื้นที่รับน้ำย่อย ที่มีปัญหาน้ำท่วมทั้งหมด 8 พื้นที่

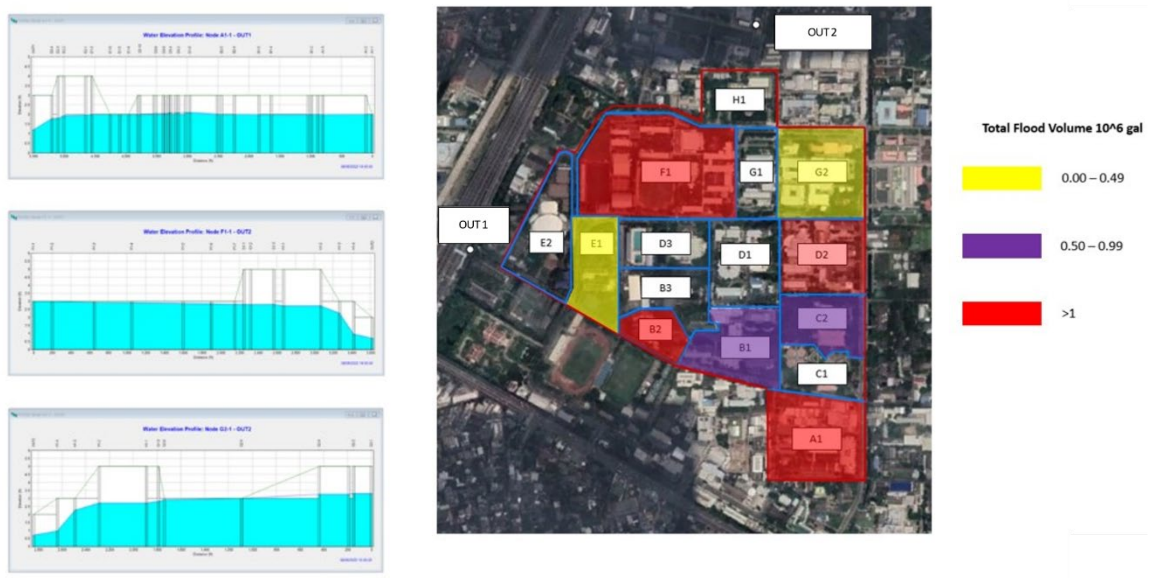


Fig. 3 Node Flooding, Water Elevation Profile route 1&2&3, flooding areas in case study 1

Summary Results

Topic: Node Flooding — Click a column header to sort the column.

Node	Hours Flooded	Maximum Rate CFS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10^6 gal	Maximum Ponded Depth Feet
A1-1	4.64	35.08	0	19:04	1.396	0.000
A1-5	3.05	4.41	0	18:38	0.087	0.000
B1-1	3.05	25.80	0	19:04	0.691	0.000
B2-1	2.12	4.01	0	19:05	0.071	0.000
B2-2	2.36	0.84	0	18:36	0.025	0.000
B2-3	2.73	13.39	0	18:39	0.328	0.000
B2-6	2.70	17.54	0	19:02	0.498	0.000
C2-4	3.17	23.14	0	19:06	0.619	0.000
C2-8	3.10	17.98	0	18:38	0.269	0.000
D2-17	2.71	21.85	0	18:38	0.586	0.000
D2-2	3.01	41.17	0	19:06	1.211	0.000
E1-1	0.46	14.81	0	19:05	0.072	0.000
E1-4	0.36	10.54	0	19:01	0.059	0.000
E1-5	0.30	4.88	0	19:22	0.013	0.000
E1-6	0.31	12.10	0	19:05	0.045	0.000
F1-1	3.03	46.75	0	19:05	1.214	0.000
F1-2	1.02	6.60	0	20:03	0.040	0.000
F1-3	0.14	4.13	0	20:31	0.004	0.000
F1-4	0.01	0.22	0	18:53	0.000	0.000
G2-5	0.68	12.16	0	19:10	0.144	0.000

Fig. 4 Node Flooding case study 1 in program SWMM

กรณีที่ 2: นอกจากแก้ไขข้อมูลระบบระบายน้ำแล้ว เพิ่มเติมแก้ไขทางออกทั้งสองจุดของพื้นที่กรณีศึกษาให้มีลักษณะเหตุการณ์ตรงกับความเป็นจริง ณ วันดังกล่าว ที่มหาวิทยาลัยไม่สามารถระบายน้ำออกนอกพื้นที่ได้ตามปกติ โดยการปรับเปลี่ยนให้ขนาดของท่อจุดทางออกมีขนาด 0.03 เมตร เนื่องจากโปรแกรม SWMM ไม่สามารถวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่มีทางออกได้จึง จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนให้จุดทางออกมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่โปรแกรมจะยอมรับได้แทน ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้ มี จุดที่มีน้ำท่วม ทั้งหมด 27 จุด และ พื้นที่รับน้ำย่อย ที่มีปัญหาน้ำท่วมทั้งหมด 10 พื้นที่

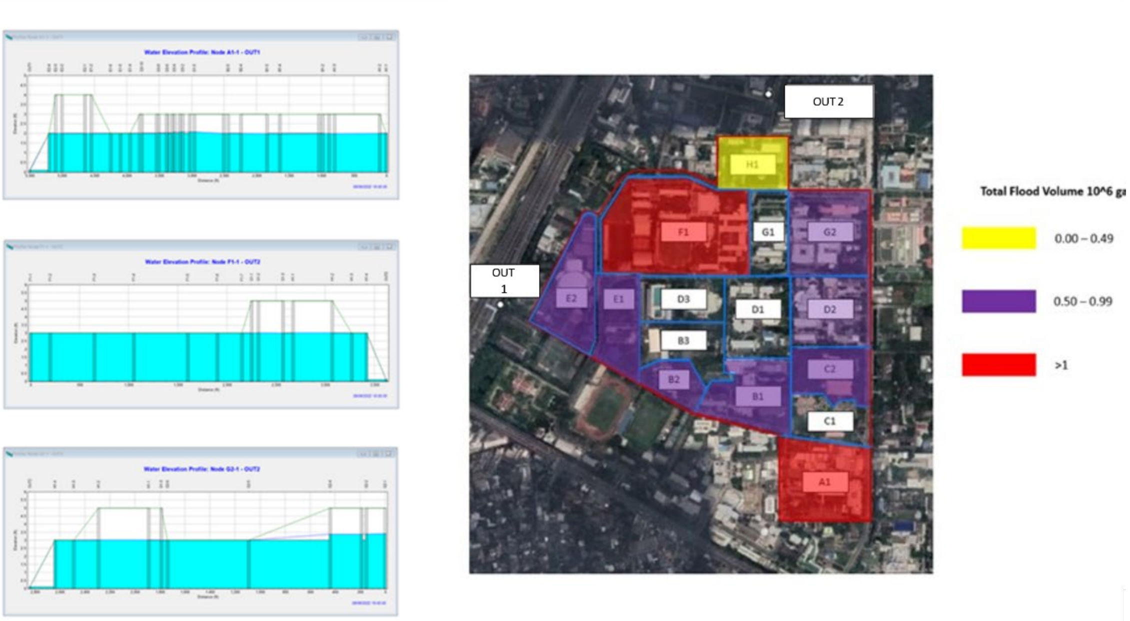


Fig. 5 Node Flooding, Water Elevation Profile route 1&2&3, flooding areas in case study 2

Topic: Node Flooding — Click a column header to sort the column.

Node	Hours Flooded	Maximum Rate CFS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10^6 gal	Maximum Ponded Depth Feet
A1-1	19.13	34.24	0	19:05	1.637	0.000
A1-5	15.26	3.71	0	18:44	0.082	0.000
B1-1	16.85	25.77	0	19:05	0.972	0.000
B2-1	19.11	4.19	1	00:20	0.177	0.000
B2-2	18.41	0.91	0	18:36	0.031	0.000
B2-3	20.01	13.95	0	18:45	0.429	0.000
B2-6	19.91	17.25	0	19:03	0.758	0.000
C2-4	17.48	23.43	0	19:06	0.814	0.000
C2-8	16.35	16.90	0	18:38	0.211	0.000
D2-17	22.64	22.27	0	18:44	0.818	0.000
D2-2	22.81	41.04	0	19:06	1.709	0.000
E1-1	20.19	18.31	0	19:14	0.808	0.000
E1-4	19.50	14.05	0	18:44	0.604	0.000
E1-5	18.57	8.10	0	18:40	0.234	0.000
E1-6	17.85	16.45	0	18:42	0.332	0.000
E2-4	21.31	12.73	0	19:06	0.509	0.000
F1-1	5.39	49.06	0	19:05	1.833	0.000
F1-2	4.07	3.49	0	18:42	0.017	0.000
F1-3	3.88	2.48	0	18:42	0.014	0.000
F1-4	3.75	0.63	0	18:43	0.005	0.000
F1-5	3.66	0.53	1	00:14	0.006	0.000
F1-6	3.60	0.21	0	18:44	0.003	0.000
F1-7	3.69	8.23	0	19:05	0.288	0.000
G2-5	4.08	20.40	0	19:19	0.801	0.000
G2-6	3.47	12.46	0	18:49	0.386	0.000
H1-3	1.73	7.03	0	18:47	0.079	0.000
H1-4	0.25	0.56	0	18:45	0.001	0.000

Fig. 6 Node Flooding case study 2 in program SWMM

สรุป

จากแบบจำลอง (Fig. 5) จะเห็นได้ว่าถ้าหาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เกิดปัญหาไม่สามารถระบายน้ำออกนอกพื้นที่ได้ตามปกติ จะเกิดปัญหาน้ำท่วมแทบจะทุกจุดรอบบริเวณมหาลัย แต่หากสามารถระบายออกนอกพื้นที่ได้ปกติ (Fig. 3) โดยใช้ปริมาณน้ำฝนเดิม ณ วันดังกล่าว ก็ยังเกิดปัญหาน้ำท่วมระบบระบายน้ำขึ้นได้หลายจุดในพื้นที่กรณีศึกษา แสดงให้เห็นว่าควรมีนโยบายหรือแนวทางในการจัดการน้ำจากพายุฝนในพื้นที่กรณีศึกษา (Changa et al., 2018) เนื่องจาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นั้นมีความจำเป็นต้องสร้างสิ่งก่อสร้างเพิ่มขึ้นทุกๆปี ทำให้พื้นที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้มีปริมาณน้อยลง เมื่อเกิดพายุฝนหรือปริมาณน้ำฝนจำนวนมาก จะทำให้มีโอกาสเกิดน้ำท่วมขังและปัญหาน้ำท่ามากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยส่วนต่อไป คณะผู้วิจัยจะจำลองการใช้มาตรการในการทดแทนพื้นที่ด้วยพื้นผิวที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ โดยใช้หลักการพัฒนาที่ส่งผลกระทบน้อย (Low Impact Development, LID) (Lim and Lu, 2016) ซึ่งในแต่ละพื้นที่จะมีความเหมาะสมในการเลือกใช้หลักการพัฒนาที่ส่งผลกระทบน้อยที่ต่างกันออกไป แบบจำลองพื้นฐานที่ปรับแก้ให้ถูกต้องจากงานวิจัยนี้ จะเป็นจุดตั้งต้นในการวิเคราะห์มาตรการที่เหมาะสมในการจัดการน้ำจากพายุฝนอย่างยั่งยืนในลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ศนิ ลิ้มทองสกุล. 2561. ปัญหาและอุปสรรค์การจัดการระบายน้ำฝนในบริบทเมืองที่มีการเติบโตทางกายภาพอย่างรวดเร็ว: กรณีศึกษาพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน. วารสารวิชาการ การออกแบบสภาพแวดล้อม 5: 2–19.

Barbosa, A.E., Fernandes. J.N., David, L.M. 2012. Key issues for sustainable urban stormwater management. Water Res. 46: 6787–6798. doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029

Environmental Protecting Agency. 2022. Storm water management model user's manual version 5. 2. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf, 15 September 2022.

Lim, H.S., Lu, X.X. 2016. Sustainable urban stormwater management in the tropics: An evaluation of Singapore's ABC Waters Program. Journal of Hydrology 538: 842–862.

Minminm, H., Shuanggen, J. 2019. A methodology for simple 2-D inundation analysis in urban area using SWMM and GIS. Nat. Hazards. 97: 15–43.

Changa, N.B., Lu, J.W., Chui, T.F.M., Hartshorn, N. 2018. Global policy analysis of low impact development for stormwater management in urban regions. Land Use Policy 70: 368–383.

Wulliman, J., Thomas, P. 2005. Learning from nature: Reducing urban stormwater impacts lake line magazine. Urban Drainage and Flood Control District. Colorado, CO, USA.

Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., Zeng, X. 2018. Storm water management of low impact development in urban areas based on SWMM. Water 11: 33. doi.org/10.3390/w11010033

การวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยพิบัติทางธรรมชาติด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงเพื่อการพยากรณ์

Risk analysis of natural disaster by risk matrix method for forecasting

อภิวัฒน์ รุ่งเรือง[a], **อนุเผ่า อบแพทย์**[b, *]

Apiwat Rungrueang[a], Anuphao Aobpaet[b, *]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Safety Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengaha@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยวิชาการฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางภัยพิบัติทางธรรมชาติในประเทศไทยช่วง 5 ปี (1 มกราคม 2560–1 มกราคม 2565) ด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Risk Matrix) เพื่อการพยากรณ์ล่วงหน้าถึงโอกาสในการเกิดความเสี่ยงและผลกระทบ/ความรุนแรงในปีที่ 6 (1 มกราคม 2565–1 มกราคม 2566) ผลวิจัยพบว่าอุทกภัยมีคะแนนการเกิดสถานการณ์และผลกระทบ/ความรุนแรงในระดับสูงที่สุดในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2564–1 มกราคม 2565 ที่ 67 คะแนน ภัยในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2562–1 มกราคม 2563 ที่ 71 คะแนน และวาตภัยในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2563–1 มกราคม 2564 ที่ 62 คะแนน และผลการพยากรณ์พื้นที่เกิดสถานการณ์ล่วงหน้าในปีที่ 6 พบว่าอุทกภัยมีโอกาสในการเกิดความเสี่ยงและผลกระทบ/ความรุนแรงจำนวน 66.25 พื้นที่ ภัยแล้งมีจำนวน 3.70 พื้นที่ และวาตภัยมีจำนวน 10.18 พื้นที่

คำสำคัญ: การจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยง, การพยากรณ์, การวิเคราะห์ความเสี่ยง, ภัยพิบัติทางธรรมชาติ

Abstract

This research presents a 5-year risk analysis of natural disasters risks in Thailand between 1 January 2017 and 1 January 2022 by the Risk Matrix method by applying knowledge to forecast the likelihood of the occurrence and impact/severity in the sixth year from 1 January 2022 to 1 January 2023. The research result has concluded that flood risk from 1 January 2021 to 1 January 2022 had the highest actual Impact/likelihood at 67 points. Drought risk from 1 January 2019 to 1 January 2020 had the highest score at 71 points, and windstorm risk from 1 January 2020 to 1 January 2021 had the highest score at 62 points. As for the forecasting results, we found that flood, drought and windstorm risk in the sixth year had a probability of likelihood of occurrence and impact/severity at 66.25, 3.70, and 10.18 areas respectively.

Keywords: Forecasting, Natural Disaster, Risk Analysis, Risk Matrix

คำนำ

สถานการณ์ภัยพิบัติทางธรรมชาติในประเทศไทยถือว่าเป็นภัยที่สร้างความเสียหายต่อเศรษฐกิจ ทรัพย์สิน ชีวิต และพื้นที่ทางการเกษตรเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุทกภัยและภัยแล้งเป็นภัยพิบัติที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดและสร้างความเสียหายต่อประเทศไทยมากที่สุด โดยมีการรวบรวมสถิติการเกิดภัยพิบัติและตัวเลขความเสียหายของศูนย์อำนวยการบรรเทาสาธารณภัย กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552–2561 พบว่า การเกิดอุทกภัยส่งผลให้มีผู้เสียชีวิต 1,727 คน มีผู้ได้รับผลกระทบมากกว่า 55 ล้านคน และมีมูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจกว่า 50,000 ล้านบาท และภัยแล้งที่เกิดขึ้นในระหว่างปี พ.ศ. 2551–2560 ส่งผลให้มีผู้ได้รับผลกระทบมากกว่า 100 ล้านคน สร้างความเสียหายต่อพื้นที่การเกษตรกว่า 14 ล้านไร่ และมีมูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจกว่า 6,000 ล้านบาท (อุ่นเรือน ,2565) ด้วยสถิติดังกล่าว ผู้วิจัยจึงต้องการใช้วิธีการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยง (Risk Matrix) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่มีตัวแปรสำคัญ 2 ตัวคือ โอกาสในการเกิดความเสี่ยง (likelihood) และผลกระทบ/ความรุนแรง (Impact) และต้องอาศัยข้อมูลปัจจัยในหลายรูปแบบมาวิเคราะห์ร่วมกันโดยใช้ Risk Matrix (UNISDR, 2017) การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดภัยพิบัติโดยจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่ก่อให้เกิดภัยพิบัติ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เช่น รายงาน สถิติความเสียหาย ผลการศึกษารวมไปถึงจากหน่วยงานที่มีความน่าเชื่อถือ (แพรวา และอนุเผ่า, 2565) ร่วมกับการใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมสารสนเทศภูมิศาสตร์และระบบคลังข้อมูลสาธารณภัย กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (DPM Portal) เพื่อช่วยในการพยากรณ์เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการวางแผนป้องกันหรือการลดความเสี่ยงภัยที่จะเกิดขึ้นในระดับจังหวัดของประเทศไทยในอนาคตต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นและผลกระทบ/ความรุนแรงที่สุดในช่วง 5 ปี
2. เพื่อพยากรณ์หาจำนวนพื้นที่ที่จะมีโอกาสในการเกิดความเสี่ยงและผลกระทบ /ความรุนแรงภัยพิบัติทางธรรมชาติในประเทศไทยในพื้นที่เกิดสถานการณ์ล่วงหน้าในปีที่ 6

วิธีการศึกษา

การกำหนดขอบเขตการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยพิบัติทั้ง 3 ภัยพิบัติดังนี้ อุทกภัย ภัยแล้งและวาตภัย ซึ่งในการวิเคราะห์ความเสี่ยงนั้นได้ดำเนินการจัดทำในพื้นที่ประเทศไทยมีพื้นที่อยู่ที่ประมาณ 513,115 ตารางกิโลเมตรหรือประมาณ 320.70 ล้านไร่ (วิชญ์, 2017)

ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 ในงานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลในทางสถิติในระดับจังหวัดจากฐานข้อมูลของระบบคลังข้อมูลสาธารณภัย กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (DPM Portal) ผ่านเว็ปไซต์ www. portal.disaster.go.th เพื่อเก็บข้อมูลใน 3 ภัยคืออุทกภัย ภัยแล้ง และวาตภัยตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 ถึง 1 มกราคม 2565 ตามรูปและผลได้แสดงอยู่ใน Figs. 2–3 ด้านล่างนี้

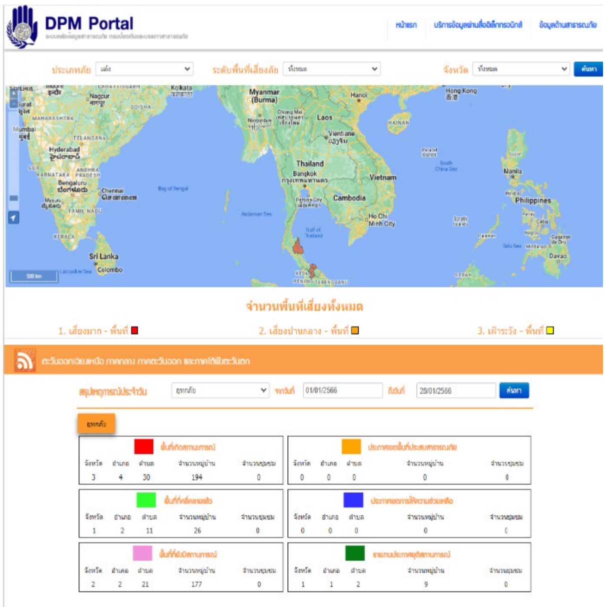


Fig. 1 DPM Portal Website

January 1, 2017 to January 1, 2018

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	12	54	312	2240	19
Declaration of a disaster affected area	8	24	96	445	0
Areas where there is still a situation	9	44	302	2215	19
Announcement of the area of assistance	0	0	0	0	0
Cleared area	67	650	3836	38623	729

January 1, 2018 to January 1, 2019

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	11	46	220	1766	0
Declaration of a disaster affected area	4	5	8	13	0
Areas where there is still a situation	11	36	132	773	0
Announcement of the area of assistance	5	7	19	97	0
Cleared area	64	417	1929	15861	184

January 1, 2019 to January 1, 2020

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	8	31	143	984	32
Declaration of a disaster affected area	1	3	26	161	0
Areas where there is still a situation	10	39	203	1516	42
Announcement of the area of assistance	2	7	34	314	0
Cleared area	57	367	1806	14774	227

January 1, 2020 to January 1, 2021

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	8	37	155	860	82
Declaration of a disaster affected area	5	12	46	289	4
Areas where there is still a situation	9	45	190	1135	86
Announcement of the area of assistance	4	18	79	553	0
Cleared area	64	503	2516	20722	483

January 1, 2021 to January 1, 2022

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	28	114	309	1706	203
Declaration of a disaster affected area	6	25	128	688	10
Areas where there is still a situation	27	137	572	4133	230
Announcement of the area of assistance	5	44	304	2518	8
Cleared area	73	635	3648	32350	643

Fig. 2 Hazard map and statistics of flood in Thailand of the DPM Portal as of November 5, 2022

January 1, 2017 to January 1, 2018

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	0	0	0	0	0
Declaration of a disaster affected area	0	0	0	0	0
Areas where there is still a situation	0	0	0	0	0
Announcement of the area of assistance	0	0	0	0	0
Cleared area	4	7	26	168	0

January 1, 2018 to January 1, 2019

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	0	0	0	0	0
Declaration of a disaster affected area	0	0	0	0	0
Areas where there is still a situation	0	0	0	0	0
Announcement of the area of assistance	0	0	0	0	0
Cleared area	15	83	491	5026	8

January 1, 2019 to January 1, 2020

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	3	10	40	346	0
Declaration of a disaster affected area	4	14	64	618	0
Areas where there is still a situation	8	24	105	964	6
Announcement of the area of assistance	2	2	7	51	6
Cleared area	41	284	1772	23087	95

January 1, 2020 to January 1, 2021

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	2	4	12	82	6
Declaration of a disaster affected area	4	14	38	268	0
Areas where there is still a situation	7	21	62	440	6
Announcement of the area of assistance	1	8	42	445	0
Cleared area	37	166	782	8152	12

January 1, 2021 to January 1, 2022

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	1	1	1	6	0
Declaration of a disaster affected area	2	2	5	16	0
Areas where there is still a situation	2	2	8	70	0
Announcement of the area of assistance	0	0	0	0	0
Cleared area	15	36	131	960	0

Fig. 3 Hazard map and statistics of drought in Thailand the DPM Portal as of November 5, 2022

January 1, 2017 to January 1, 2018

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	1	1	1	3	0
Declaration of a disaster affected area	1	1	1	1	0
Areas where there is still a situation	1	1	1	3	0
Announcement of the area of assistance	0	0	0	0	0
Cleared area	14	56	158	578	35

January 1, 2018 to January 1, 2019

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	17	30	73	248	3
Declaration of a disaster affected area	1	5	34	98	0
Areas where there is still a situation	13	26	64	173	3
Announcement of the area of assistance	2	2	2	2	0
Cleared area	73	744	3407	17400	122

January 1, 2019 to January 1, 2020

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	13	64	248	1073	10
Declaration of a disaster affected area	5	16	48	179	0
Areas where there is still a situation	12	68	280	1278	10
Announcement of the area of assistance	2	14	45	145	1
Cleared area	70	722	3787	22956	230

January 1, 2020 to January 1, 2021

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	15	97	363	1663	33
Declaration of a disaster affected area	3	4	6	15	0
Areas where there is still a situation	14	107	437	2127	33
Announcement of the area of assistance	2	3	4	23	0
Cleared area	75	685	3197	17727	141

January 1, 2021 to January 1, 2022

The nature of situation	Number of areas				
	Province	District	Sub-district	Village	Community
Situation area	11	58	145	441	13
Declaration of a disaster affected area	4	18	69	224	0
Areas where there is still a situation	10	57	155	542	1
Announcement of the area of assistance	3	28	189	2688	0
Cleared area	77	754	3805	20847	263

Fig. 4 Hazard map and statistics of windstorms in Thailand of the DPM Portal as of November 5, 2022

ขั้นตอนที่ 2 ใช้ชุดข้อมูลตัวเลขจำนวนพื้นที่ในระดับจังหวัดเท่านั้นตาม Figs. 2–4 มาใช้วิธีการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยตามสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า Mean, ค่าระหว่าง Mean กับ Minimum, ค่า Minimum, ค่าระหว่างค่า Minimum กับ Maximum และ ค่า Maximum ในโปรแกรม Microsoft Excel ดังแสดงใน Tables 1–3 เพื่อนำตัวเลขจากการคำนวณไปกำหนดขอบเขตช่วงคะแนนในตาราง Risk Matrix ดังแสดงใน Tables 4-6

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \qquad (1)$$

เมื่อ X = จำนวนพื้นที่ในระดับจังหวัด

N = จำนวนลักษณะสถานการณ์

Table 1 Risk Analysis and Mathematical Method Displays of flood

The nature of situation	Flood				
	Mean	Mean: Min	Min	Min: Max	Max
Situation area	13.4	10.7	8	20.7	28
Declaration of a disaster affected area	4.8	2.9	1	6.4	8
Areas where there is still a situation	13.2	11.1	9	20.1	27
Announcement of the area of assistance	3.2	1.6	0	4.1	5
Cleared area	65	61	57	69	73

Table 2 Risk Analysis and Mathematical Method Displays of drought.

The nature of situation	Drought				
	Mean	Mean: Min	Min	Min: Max	Max
Situation area	1.2	0.6	0	2.1	3
Declaration of a disaster affected area	2	1	0	3	4
Areas where there is still a situation	3.4	1.7	0	5.7	8
Announcement of the area of assistance	0.6	0.3	0	1.3	2
Cleared area	22.4	13.2	4	31.7	41

Table 3 Risk Analysis and Mathematical Method Displays of windstorm.

The nature of situation	Windstorm				
	Mean	Mean: Min	Min	Min: Max	Max
Situation area	11.4	6.2	1	14.2	17
Declaration of a disaster affected area	17.2	9.1	1	46.1	75
Areas where there is still a situation	10	5.5	1	12	14
Announcement of the area of assistance	1.8	0.9	0	2.4	3
Cleared area	61.8	37.9	14	69.4	77

ขั้นตอนที่ 3 สร้างตาราง Risk Matrix เพื่อกำหนดขอบเขตช่วงคะแนนโดยใช้ 5 ลักษณะสถานการณ์ โดยมีการกำหนดระดับคะแนนของโอกาสในการเกิดความเสี่ยงจากต่ำมากถึงสูงมาก และผลกระบทบ/ความรุนแรงจากระดับรุนแรง

มากถึงรุนแรงต่ำมากตามลำดับ และนำผลการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยจาก Tables 1–3 มากำหนดช่วงตัวเลขใน Risk Matrix ที่แยกในแต่ละภัยธรรมชาติดังตารางข้างล่างนี้

Table 4 5×5 Risk Matrix of flood

		Likelihood				
		Very Low (Score 1 point)	Low (Score 2 points)	Moderate (Score 3 points)	High (Score 4 points)	Very High (Score 5 points)
Impact / Severity	Situation area (Score 5 points)	8-9.34	9.35-12.04	12.05-17.04	17.05-24.34	24.35-28
	Declaration of a disaster affected area (Score 4 points)	1-1.94	1.95-3.84	3.85-5.5	5.6-7.1	7.2-8
	Areas where there is still a situation (Score 3 points)	9-10.4	10.5-12.14	12.15-16.64	16.65-23.54	23.55-27
	Announcement of the area of assistance (Score 2 points)	0-0.7	0.8-2.3	2.4-3.64	3.65-4.54	4.55-5
	Cleared area (Score 1 point)	71-73	67-70	63-66	60-62	59-57

Table 5 5x5 Risk Matrix of drought

		Likelihood				
		Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)
Impact / Severity	Situation area (Score 5 points)	0-0.3	0.4-0.9	1.0-1.65	1.66-2.55	2.56-3
	Declaration of a disaster affected area (Score 4 points)	0-0.5	0.6-1.5	1.6-2.5	2.6-3.5	3.6-4
	Areas where there is still a situation (Score 3 points)	0-0.85	0.86-2.55	2.56-4.55	4.56-6.85	6.86-8
	Announcement of the area of assistance (Score 2 points)	0-0.15	0.16-0.45	0.46-0.95	0.96-1.65	1.66-2
	Cleared area (Score 1 point)	36.36-41	27.06-36.35	17.9-27.05	8.7-17.8	4-8.6

Table 6 5x5 Risk Matrix of windstorm

		Likelihood				
		Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)	Very Low (Score 1 point)
	Situation area (Score 5 points)	1-3.6	3.7-8.8	8.9-12.8	12.9-15.6	15.7-17
	Declaration of a disaster affected area (Score 4 points)	1-5.05	5.06-13.15	13.16-31.65	31.66-60.55	60.56-75
	Areas where there is still a situation (Score 3 points)	1-3.25	3.26-7.75	7.76-11	11.01-13	13.01-14
	Announcement of the area of assistance (Score 2 points)	0-0.45	0.46-1.35	1.36-2.1	2.2-2.7	2.8-3
	Cleared area (Score 1 point)	73.3-77	65.6-73.2	49.86-65.6	25.96-49.85	14-25.95

ผลการวิจัย

ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลตาราง Risk Matrix ในแต่ละภัยเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นและผลกระทบ/ความรุนแรงที่สุดในช่วง 5 ปี ใช้ชุดข้อมูลตัวเลขจำนวนพื้นที่ในระดับจังหวัดเท่านั้นตาม Figs. 2–4 ในการวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis) โดยใช้ผลคูณของ Tables 4–6 เป็นการกำหนดหรือจัดระดับความสำคัญของความเสี่ยงจากโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง (Likelihood) และผลกระทบ/ความรุนแรงที่เกิดขึ้น (Impact) (Zlateva and Velev, 2016) โดยที่

ความเสี่ยง (Risk) = โอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง (Likelihood) และผลกระทบ ที่เกิดขึ้น (Impact)

$$R = f(P \times C) \quad (2)$$

Table 7 Summary table of flood

Flood	Days, Months and Years				
	1/1/60-1/1/61	1/1/61-1/1/62	1/1/62-1/1/63	1/1/63-1/1/64	1/1/64-1/1/65
Situation area	12	11	8	8	28
Declaration of a disaster affected area	8	4	1	5	6
Areas where there is still a situation	9	11	10	9	27
Announcement of the area of assistance	0	5	2	4	5
Cleared area	67	64	57	64	73
Scores summary	37	41	21	31	67

Table 8 Summary table of drought

Drought	Days, Months and Years				
	1/1/60-1/1/61	1/1/61-1/1/62	1/1/60-1/1/61	1/1/63-1/1/64	1/1/60-1/1/61
Situation area	0	0	3	2	1
Declaration of a disaster affected area	0	0	4	4	2
Areas where there is still a situation	0	0	8	7	2
Announcement of the area of assistance	0	0	2	1	0
Cleared area	4	15	41	37	15
Scores summary	19	18	71	66	39

Table 9 Summary table of windstorm

Windstorm	Days, Months and Years				
	1/1/60-1/1/61	1/1/60-1/1/61	1/1/60-1/1/61	1/1/60-1/1/61	1/1/60-1/1/61
Situation area	1	17	13	15	11
Declaration of a disaster affected area	1	1	5	75	4
Areas where there is still a situation	1	13	12	14	10
Announcement of the area of assistance	0	2	2	2	3
Cleared area	14	73	70	75	77
Scores summary	19	51	44	62	39

ขั้นตอนที่ 5 นำข้อมูลพื้นที่เกิดสถานการณ์ของทั้ง 3 ภัยพิบัติทางธรรมชาติในช่วง 5 ปีมาพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กโปแนนเชีนลซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Exponential Smoothing) (อภิชัย, 2561) และตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์โดยใช้เกณฑ์ส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Deviation: MAD) ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error, MSE) และ ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ตาม Tables 10–12

1) วิธีการปรับเรียบแบบเอ็กโปแนนเชียลซ้ำหนึ่งครั้ง (Single Exponential Smoothing) โดยมีสูตรดังนี้

$$F_{t-1}=F_t+\alpha(X_t-F_t) \quad (3)$$

โดย $0\leq\alpha\leq1$

เมื่อ F_t = ค่าพยากรณ์ได้ในงวดที่ t

X_t = ค่าของข้อมูลในงวดที่ t

ดังนั้น $X_t - F_t$ = ความผิดพลาดในการพยากรณ์

2) ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation: MAD) สามารถคำนวนได้จากสูตร

$$MAD=\frac{\sum|X_t-F_t|}{n} \quad (4)$$

3) ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error, MSE)

$$MSE=\frac{\sum(X_t-F_t)^2}{n} \quad (5)$$

4) ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE)

$$MAPE=\frac{\sum\frac{|X_t-F_t|}{X_t}x100}{n} \quad (6)$$

Table 10 Forecast method of flood

D/M/Y	Total	Forecast	Forecast	MAD		MSE		MAPE	
	Actual Impact/likelihood	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.9$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.9$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.9$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.9$
1/1/60-1/1/61	12								
1/1/61-1/1/62	11	11.00	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%
1/1/62-1/1/63	8	12.00	12.00	4.00	-4.00	16	16	50.00%	80.00%
1/1/63-1/1/64	8	10.60	7.40	2.6	0.60	6.76	0.36	32.50%	12.00%
1/1/64-1/1/65	28	7.74	8.54	20.26	19.46	410.47	378.69	72.36%	389.20%
1/1/65-1/1/66	66.25		$\sum$	26.86	16.06	433.23	395.05	154.86%	481.20%
	MSE	α=0.9		5.37	3.21	86.65	79.01	30.97%	96.24%

Table 11 Forecast method of drought

D/M/Y	Total	Forecast	Forecast	MAD		MSE		MAPE	
	Actual Impact/likelihood	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$
1/1/60-1/1/61	0								
1/1/61-1/1/62	0	0.00	11.00	0.00	-11.00	0.00	121.00	0.00%	220.00%
1/1/62-1/1/63	3	0.00	-9.90	3.00	12.90	9	166.41	100.00%	258.00%
1/1/63-1/1/64	2	0.30	11.61	1.7	-9.61	2.89	92.35	85.00%	192.20%
1/1/64-1/1/65	1	3.00	-5.65	2.00	6.65	4.00	44.21	200.00%	132.98%
1/1/65-1/1/66	3.70		$\sum$	6.70	-1.06	15.89	423.97	385.00%	803.18%
	MSE α=0.1			1.34	-0.21	3.18	84.79	77.00%	160.64%

Table 12 Forecast method of windstorm

D/M/Y	Total	Forecast	Forecast	MAD		MSE		MAPE	
	Actual Impact/likelihood	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.9$
1/1/60-1/1/61	1								
1/1/61-1/1/62	17	11.00	11.00	6.00	6.00	36.00	36.00	35.29%	120.00%
1/1/62-1/1/63	13	1.60	6.40	11.40	6.60	129.96	43.56	87.69%	132.00%
1/1/63-1/1/64	15	18.14	22.94	3.14	-7.94	9.86	63.04	20.93%	158.80%
1/1/64-1/1/65	11	12.69	5.85	1.69	5.15	2.84	26.48	15.33%	102.92%
1/1/65-1/1/66	10.18		$\sum$	22.23	9.81	178.66	169.08	159.25%	513.72%
	MSE α=0.9			4.45	1.96	35.73	33.82	31.85%	102.74%

สรุป

ผลวิจัยการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางภัยพิบัติทางธรรมชาติในประเทศไทยช่วง 5 ปี (1 มกราคม 2560–1 มกราคม 2565) ด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Risk Matrix) พบว่าอุทกภัยมีคะแนนการเกิดสถานการณ์และผลกระทบ/ความรุนแรงในระดับสูงที่สุดในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2564–1 มกราคม 2565 ที่ 67 คะแนน ภัยในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2562–1 มกราคม 2563 ที่ 71 คะแนน และวาตภัยในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2563–1 มกราคม 2564 ที่ 62 คะแนน ตาม Tables ที่ 7–9 ผลการพยากรณ์พื้นที่เกิดสถานการณ์ล่วงหน้าในปีที่ 6 โดยวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กโปแนนเชียลซ้ำหนึ่งครั้ง และตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์โดยใช้เกณฑ์ส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MSE) และ ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) โดยเลือก MSE $\alpha = 0.9$ กับ MSE $\alpha = 0.1$ ในค่าพยากรณ์มาใช้ในการคำนวนทั้ง 3 ภัยพิบัติทางธรรมชาติพบว่าอุทกภัยมีโอกาสในการเกิดความเสี่ยงและผลกระทบ/ความรุนแรงจำนวน 66.25 พื้นที่ ภัยแล้งมีจำนวน 3.70 พื้นที่ และวาตภัยมีจำนวน 10.18 พื้นที่ ตาม Tables ที่ 10–12 ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์เมื่อเทียบข้อมูลกับปีที่ 5 พบว่าอุทกภัยและภัยแล้งมีพื้นที่การเกิดสถานการณ์ที่มีโอกาสในการเกิดความเสี่ยงและผลกระทบ/ความรุนแรงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับสถิติสาธารณภัย กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย งานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงเพื่อหาโอกาสในการเกิดความเสี่ยงและผลกระทบ/ความรุนแรงในระดับอื่นๆได้ เช่น อำเภอ ตำบล หมู่บ้าน ชุมชน หรือในเขตพื้นที่ๆมีการรวบรวมสถิติข้อมูลด้านการเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติในพื้นที่นั้นๆ รวมถึงการพยากรณ์ล่วงหน้าในปีถัดไปหรือล่วงหน้า 5 ถึง 10 ปีข้างหน้า

เอกสารอ้างอิง

อุ่นเรือน เล็กน้อย. สถาบันวิจัยสังคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สถานการณ์และแนวโน้มการเกิดภัยพิบัติ. http://www.cusri.chula.ac.th, 2 ตุลาคม 2565

แพรวา วิจิตรธนสาร, อนุเผ่า อบแพทย์. 2565. การพัฒนาแผนที่ความเสี่ยงภัยพิบัติทางธรรมชาติในประเทศไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27. เชียงราย.

ระบบคลังข้อมูลสารณภัย กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (DPM Portal). http://portal.disaster.go.th/portal/public/index.do?ms=1671749999871, 5 พฤศจิกายน 2565.

วิชญ์ จอมวิญญาณ์. 2560. ภูมิศาสตร์ประเทศไทย คณะมนุษย์ และสังคมศาสตร์. มหาวิทยาลัยราชภัฎอุดรธานี. อุดรธานี.

อภิชัย พรมอ่อน. 2561. การศึกษาการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา (TIME SERIES) เพื่อการวางแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบ กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วนท่อยางรถยนต์. สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น. กรุงเทพฯ.

The United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2017. National Disaster Risk Assessment. The United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland

Zlateva, P,. Velev, D. 2016. A method for risk assessment from natural disasters using an actuarial model. Journal of Economics, Business and Management 4: 395–399.

การประยุกต์ใช้จีโอแพ็กเกจเทคโนโลยีในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการฉายแผนที่ทรานส์เวิร์สเมอร์คาเตอร์

The applications of GeoPackage technology in exchanging transverse mercator projection data

อตินุช อาตฤณณชากร*,สรวิศ สุภเวชย์,อนุเผ่า อบแพทย์

Atinuch Artrinnachakorn*, Soravis Supavetch, Anuphao Aobpaet

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: atinuch.a@ku-th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้ข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ในโครงการออกแบบ-ก่อสร้างขนาดใหญ่นั้นมีข้อมูลการฉายแผนที่ 2 ชุด คือ การฉายแผนที่ระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม (UTM) และการฉายแผนที่ทรานส์เวิร์สเมอร์คาเตอร์ (TM) โดยการฉายแผนที่ 2 ระบบนี้เกิดขึ้นจากโครงการฯนั้นมีพื้นที่ขนาดใหญ่ และแนวเส้นทางของโครงการฯตั้งอยู่บนแผนที่ UTM Zone 47 และ 48 ทำให้มีการใช้การฉายแผนที่ TM เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนให้ไม่เกินตามข้อกำหนด ทำให้ทางโครงการฯมีข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ 2 ชุด ซึ่งการนำไปใช้งาน หรือการส่งมอบข้อมูลไปยังส่วนอื่นนั้นอาจทำให้ข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้ การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี GeoPackage ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการฉายแผนที่ให้มีข้อมูลเพียงชุดเดียว โดยสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ต่อยังซอฟต์แวร์สารสนเทศภูมิศาสตร์อื่นได้อย่างสะดวกและง่าย มีความเป็นมาตรฐานสากล และยังลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้ จากผลการศึกษาพบว่ามีค่าความเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ RMSE = 0.00048 ม.

คำสำคัญ: การฉายแผนที่, จีโอแพ็กเกจ, ทรานส์เวิร์สเมอร์คาเตอร์, ระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม

Abstract

Nowadays, the applications of Geographic Information System (GIS) data in massive design and construction projects have two sets of map projection data: the Universal Transverse Mercator (UTM) and the Transverse Mercator (TM). The two systems of the map projection are used because the area covered by those projects is large. Also, the route alignment is located at UTM Zones 47 and 48 on the map, so the TM Map projection was applied to reduce the tolerance so that does not exceed the requirement; therefore, these projects have 2 sets of coordinate data. However, errors can occur during the implementation and transfer of these data to other working processes. In this study, the focus is on the GeoPackage Technology application to exchange those map projection data in one set that can be conveniently and easily implemented in other geographic information software meet international standards and decrease the possibility of mistakes. The result of the tolerance found in this study is in the acceptable range at RMSE = 0.00048 m.

Keywords: GeoPackage, Map projection, Transverse mercator, Universal transverse mercator

คำนำ

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้ข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ในโครงการออกแบบ-ก่อสร้างขนาดใหญ่จะมีข้อมูลการฉายแผนที่ 2 ชุด การฉายแผนที่ระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม UTM (Universal Transverse Mercator) และการฉายแผนที่ TM (Transverse Mercator) การฉายแผนที่ 2 ระบบนี้เกิดขึ้นจากโครงการฯนั้นมีพื้นที่ขนาดใหญ่ และแนวเส้นทางของโครงการฯตั้งอยู่บนแผนที่ UTM Zone 47 และ 48

ความคลาดเคลื่อนต่ำของการฉายแผนที่เป็นผลที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จากการแสดงถึงความโค้งมนบนพื้นผิวที่เรียบ เป็นการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างจุดต่างๆ ที่อยู่บนพื้นผิวโลกและการแสดงความสัมพันธ์บนระนาบ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้ไม่สามารถกำจัดได้ สิ่งที่ดีที่สุดที่สามารถทำได้คือการลดความคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด (Dennis, 2016)

ในการศึกษานี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี GeoPackage ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการฉายแผนที่ให้มีข้อมูลเพียงชุดเดียว โดยค่าพิกัดที่ถูกแปลงแล้วให้มีค่าความเคลื่อนนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

วัตถุประสงค์

เพื่อนำเทคโนโลยี GeoPackage มาประยุกต์ใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการฉายแผนที่จากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง โดยการจัดเก็บข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ให้ข้อมูลมีเพียงชุดเดียว เพื่อความสะดวก ง่าย และรวดเร็วต่อการส่งมอบข้อมูลไปใช้ต่อ อีกทั้งยังมีความเป็นมาตรฐานสากล และสามารถลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้

หลักการฉายแผนที่ทรานส์เวิร์สเมอร์คาเตอร์ (TM)

โครงการรถไฟความเร็วสูงช่วงกรุงเทพมหานคร - หนองคาย ได้กำหนดให้ความเพี้ยนของเส้นโครงแผนที่ที่จะใช้ในโครงการฯ ไม่เกิน 10 ppm ตามมาตรฐาน FGCC 1989 จึงมีขั้นตอนในการเลือกเส้นโครงแผนที่ของโครงการฯ ที่มีความเพี้ยนไม่เกินข้อกำหนด โดยคงการฉายแผนที่แบบเดิม คือ Transverse Mercator โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

กำหนดพื้นที่กรอบเส้นโครงแผนที่ของโครงการฯและหาค่าตัวแทนความสูงเฉลี่ยเหนือทรงรี

กำหนดพื้นที่บริเวณที่ต้องการใช้เส้นโครงแผนที่ โดยส่วนใหญ่จะกำหนดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้ครอบคลุมพื้นที่ของโครงการฯ และเลือกค่าความสูงเทียบกับทรงรีเฉลี่ยของพื้นที่ (Average ellipsoidal height)

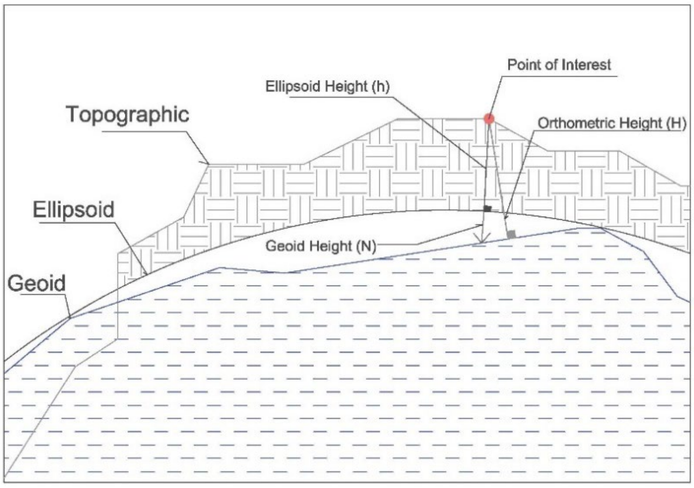


Fig. 1 Shows the elevation above the surface

เลือกเส้นโครงแผนที่และกำหนด Central Meridian ที่จุดใกล้จุดศูนย์กลางพื้นที่โครงการฯ

จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นลองจิจูดได้เป็น 102-31-09.5 องศา และเลือกเส้นกลางโครงแผนที่ Central Meridian เพื่อนำมาพิจารณาหาค่าความเพี้ยนครอบคลุมพื้นที่โครงการค่าลองจิจูดที่ 102-30-00 องศา

คำนวณหาค่า scale factor k_0 ที่แกน Central Meridian

เมื่อได้ความสูงเฉลี่ยของพื้นที่ (Average ellipsoidal height) มาแล้วจะนำมาคำนวณหาค่า scale factor ที่แกนของเส้นโครงแผนที่ ใช้สัญลักษณ์ k_0 โดยคำนวณได้ดัง Equation 1

$$K_0=1+\frac{h}{R} \qquad (1)$$

k_0 = ค่าสเกลแฟคเตอร์ที่เส้น Central Meridian

R = รัศมีของโลกที่ละติจูดกลางของพื้นที่โครงการ

h = ความสูงเหนือทรงรี

หาค่า distortion ของเส้นโครงแผนที่ครอบคลุมพื้นที่โครงการฯ

คำนวณค่า distortion หาได้ดังตาม Equation 2 ค่า k คือ grid scale factor ของจุดที่คำนวณค่าได้ตามเส้นโครงแผนที่

$$\text{distortion } (\delta)=k\frac{R}{(R+h)}-1 \qquad (2)$$

ถ้าได้ค่าเฉลี่ย distortion ที่ต่ำสุดแล้ว แต่ถ้าค่าที่ได้นั้นไม่เข้าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ต้องทำการคำนวณวนกลับไปที่การเลือกเส้น Central Meridian และการคำนวณหาค่า scale factor หลังจากนั้นจึงจะกำหนดค่าพารามิเตอร์และพื้นหลักฐานให้ชัดเจน โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะแสดงใน Table 3

วิธีการศึกษา

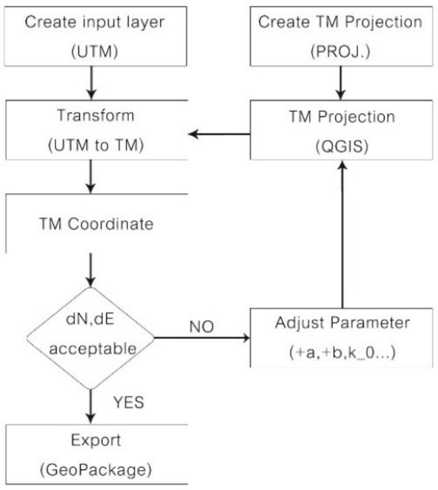


Fig. 2 Conceptual framework

การศึกษานี้มีกรอบแนวคิดแสดงดัง Fig. 2 ซึ่งประกอบด้วย เตรียมข้อมูลค่าพิกัดหมุดควบคุมระบบ UTM การแปลงระบบการฉายแผนที่โดยใช้ซอฟต์แวร์ไลบราลี่ PROJ Transform ค่าพิกัดหมุดควบคุมจากระบบ UTM ให้อยู่ในระบบการฉายแผนที่ TM และจัดเก็บไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบ GeoPackage

เตรียมข้อมูลค่าพิกัดหมุดควบคุมระบบ UTM

เตรียมข้อมูลค่าพิกัดหมุดควบคุมระบบ UTM ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ .CSV แล้วนำเข้าในซอฟต์แวร์ GIS ชื่อว่า QGIS เพื่อนำข้อมูลค่าพิกัดที่ได้นี้ไปทำการ Transform ต่อไป

	field_1	field_2	field_3	field_4
1		Point	East Coordinate in UTM	North Coordinate in UTM
2		GPS 0/1	188160.836	1656778.806
3		GPS 001	191149.997	1658480.466
4		GPS 002	192301.669	1660849.904
5		GPS 003	194107.847	1664528.769
6		GPS 004	195514.151	1667400.300
7		GPS 005	196902.765	1670203.403

Fig. 3 Sample data file in CSV format on the QGIS program

การแปลงระบบการฉายแผนที่โดยใช้ซอฟต์แวร์ไลบราลี่ PROJ

PROJ ชื่อเดิมคือ PROJ.4 เป็นซอฟต์แวร์การแปลงพิกัดทั่วไปที่แปลงพิกัดเชิงพื้นที่จากระบบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ (CRS) ไปยังอีกระบบหนึ่ง ซึ่งรวมถึงการคาดคะเนด้วยการทำแผนที่และการแปลงพิกัดทางภูมิศาสตร์ไลบรารีอิงตามงานของ Gerald Evenden ที่ United States Geological Survey (USGS) ตั้งแต่ปี 2019 เป็นโครงการ Open-Source Geospatial Foundation (OSGeo) ที่ดูแลโดย PROJ Project Steering Committee (PSC)

การแปลงพิกัดถูกกำหนดโดยคำศัพท์ของ PROJ เรียกว่า proj-strings โดย proj-string อธิบายการเปลี่ยนแปลงโดยไม่คำนึงว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นง่ายหรือซับซ้อนเพียงใด กรณีที่ง่ายที่สุดคือการฉายภาพพิกัดทางภูมิศาสตร์ proj-strings จะเก็บค่าพารามิเตอร์ของการแปลงพิกัดที่กำหนด ตัวอย่างเช่น การฉายแผนที่ TM โดย <> คือสัญญาลักษณ์ของพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้ต้องกำหนดเอง โดยคำอธิบายพารามิเตอร์จะแสดงตาม Table 1

+proj=tmerc +lat_0=<> +lon_0=<>+k_0=<>+x_0= <>+y_0=<>+a=<>+b=<> +units=m +no_defs

Table 1 List of PROJ parameters applied to coordinate system definitions

Parameter	Description
+a	Semi major radius of the ellipsoid axis
+b	Semi minor radius of the ellipsoid axis
+k_0	Scale factor. Determines scale factor used in the projection
+lat_0	Latitude of origin
+lon_0	Central meridian
+no_defs	Item ensures that no defaults are read from the default files
+proj	Projection name
tmerc	Alias of Transverse Mercator (TM) Projection
+units	meters, US survey feet, etc.
+x_0	False easting
+y_0	False northing

Transform ค่าพิกัดหมุดควบคุมจากระบบ UTM ให้อยู่ในระบบ TM

ทำโดยการ Export แล้วตั้งค่า CRS (Coordinate Reference System) ให้เป็นค่าที่ได้นิยามการฉายแผนที่ไว้ข้างต้น หลังจากนั้นจึงกดเพิ่มตารางค่าพิกัด TM ที่ได้มาจากการคำนวณของโปรแกรม

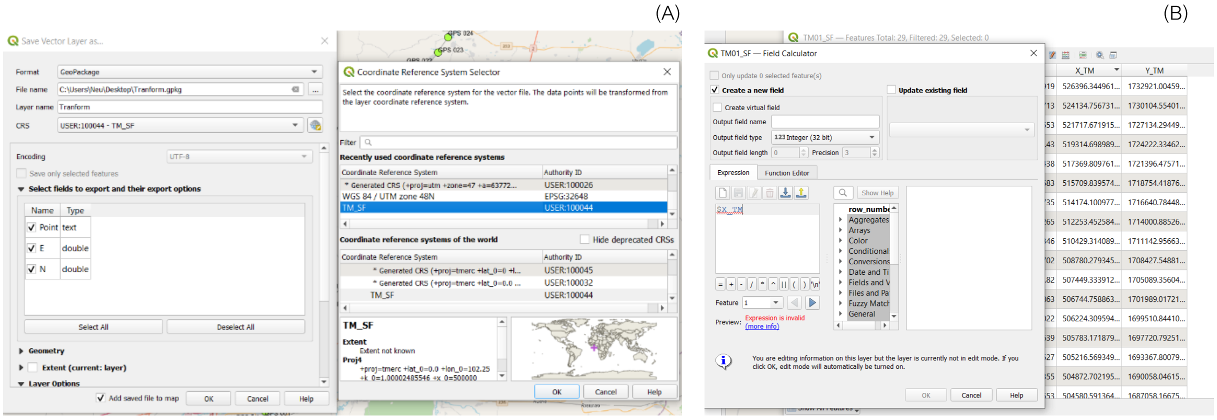


Fig. 4 (A) Setting CRS for transform UTM to TM; (B) Shown attribute table of coordinates that have been calculated

จัดเก็บไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบ GeoPackage

GeoPackage พัฒนาโดย Open Geospatial Consortium (OGC) เป็นไฟล์ฐานข้อมูล SQLite มีสกุลไฟล์ .gpkg โดยมีการออกแบบระบบจัดเก็บข้อมูลปริภูมิไว้เป็นโครงสร้างขยายของเทคโนโลยี SQLite ซึ่งเป็นระบบไฟล์ที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ง่าย และสามารถเปิดฐานข้อมูลได้โดยใช้โปรแกรมการจัดการข้อมูล เช่น DB Browser for SQLite

ภายในไฟล์ GeoPackage จะมีตารางของชั้นข้อมูลปริภูมิและตารางคำอธิบายชุดข้อมูล ชื่อว่า gpkg_contents และ gpkg_spatial_ref_sys ซึ่งจะเป็นตารางหลักในการควบคุมและจัดการตารางชั้นข้อมูลปริภูมิทั้งหมดที่อยู่ในไฟล์สกุล .gpkg โดย Table 2 จะเป็นคำอธิบายชื่อคอลัมน์ของ gpkg_contents และ pgk_spatial_ref_sys เก็บข้อมูลเกี่ยวกับระบบพิกัดอ้างอิง

Table 2 List of gpkg_contents table and pgk_spatial_ref_sys table definitions

gpkg_contents		pgk_spatial_ref_sys	
Col.Name	Description	Col. Name	Description
table_name	The name of the tiles	table_name	The name of the tiles, or feature table
data_type	Type of data stored in the table	srs_name	Human readable name of this SRS
identifier	A human-readable identifier	srs_id	Unique identifier for each SRS
description	A human-readable description	organization	Name of the defining organization
last_change	Information update status	Organization _coordsys_id	Numeric ID of the SRS by the organization
min_x,min_y	Bounding min (N,E,Lat,Long)	definition	Coordinate Transformation Services
max_x,max_y	Bounding max (N,E,Lat,Long)	description	Human readable description of this SRS
srs_id	Spatial Reference System ID		

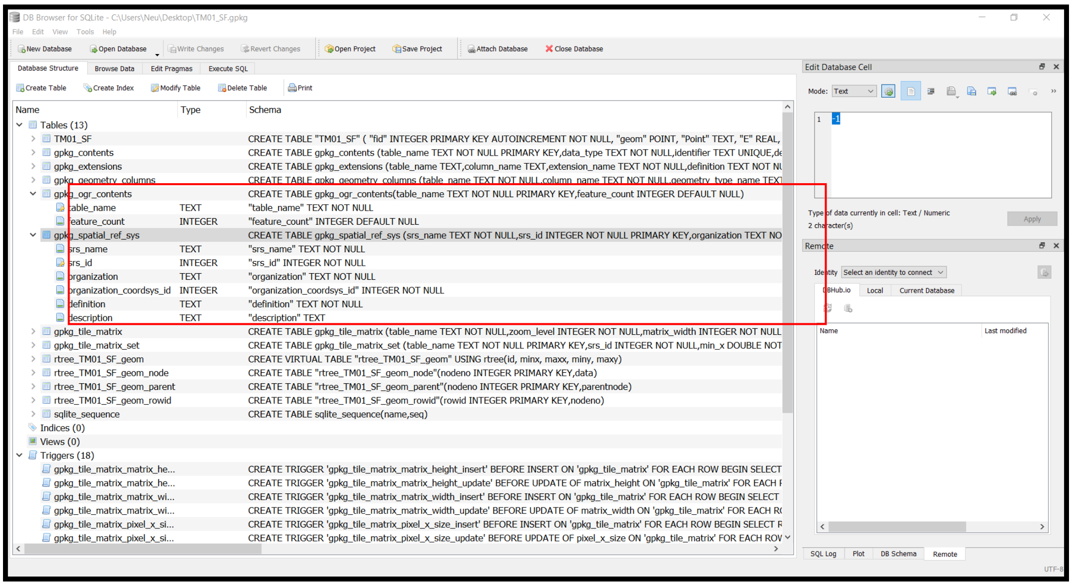


Fig. 5 Shows about Database Structure: gpkg_contents and pgk_spatial_ref_sys on the DB Browser for SQLite program

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อดังนี้ (1) การแปลงระบบการฉายแผนที่ (2) ผลจากการ Transform จากพิกัด UTM ให้อยู่ในระบบ TM (3) บันทึกข้อมูลในรูปแบบ GeoPackage และเปิดฐานข้อมูล SQLite ด้วยโปรแกรม DB Browser for SQLite

การนิยามการฉายแผนที่

จากการการนิยามการฉายแผนที่ขึ้นมาโดยใช้ซอฟต์แวร์ไลบราลี่ PROJ. จะได้ดังนี้ โดยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดแสดงตาม Table 3 โดยจะการนิยามนี้ทำการเพิ่มเข้าไปใน Custom Coordinate Reference System Definition โปรแกรม QGIS

+proj=tmerc +lat_0=0.0 +lon_0=102.25 +k_0=1.00002485546 +x_0=500000 +y_0=0 +a=6378137.0 +b=6356752.3142 +units=m +no_defs

Table 3 Used parameters

Parameter	Used parameters	Description
+a	6378137.0	Semi major radius of the ellipsoid axis
+b	6356752.314	Semi minor radius of the ellipsoid axis
+k_0	1.00002485546	Scaling factor
+lat_0	0.0	Latitude of origin
+lon_0	102.25	Central meridian
+proj	tmerc	Projection name
+units	m	meters, US survey feet, etc.

+x_0	500000	False easting
+y_0	0	False northing

ผลจากการ Transform จากพิกัด UTM ให้อยู่ในระบบ TM

จากการนิยามการฉายแผนที่และโปรแกรมได้คำนวนค่าพิกัดหมุดควบคุมจากระบบ UTM เป็นระบบ TM จะได้ค่าพิกัด TM ออกมา ดังแสดงใน Fig. 6 และจากการศึกษาครั้งนี้จะนำค่า TM ที่ได้จากการ Transform จากโปรแกรม QGIS มาหาค่าความต่างจากค่าพิกัดหมุดควบคุมจากแบบโครงการฯ โดยค่าที่กล่าวมาข้างต้นจะแสดงใน Table 4

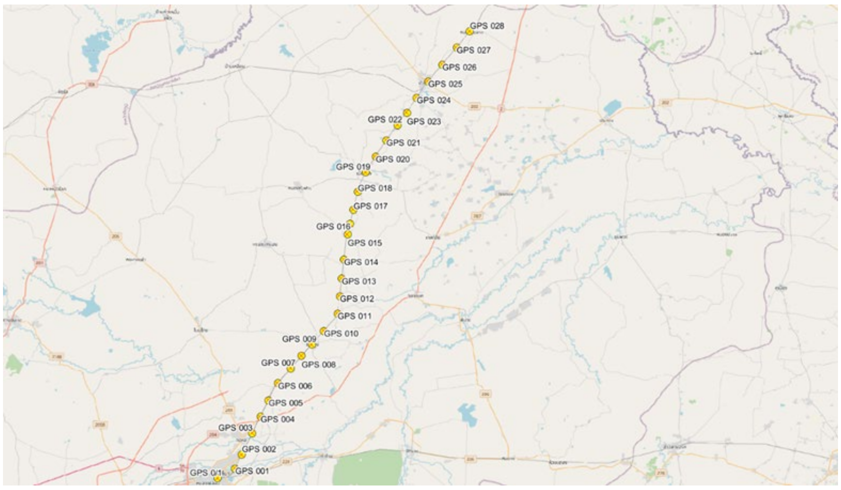


Fig. 6 Shows the control point that have transform from UTM to TM

Table 4 Coordinates comparison between TM and TM in Drawing plan projection

Point	Northing (TM)	Easting (TM)	Northing (TM) (drawing)	Easting (TM) (drawing)	dN	dE
GPS 0/1	1655448.6285	483960.1517	1655448.6280	483960.1513	0.0005	0.0004
GPS 001	1657185.9338	486925.6948	1657185.9340	486925.6943	-0.0002	0.0005
GPS 002	1659567.7179	488046.9919	1659567.7180	488046.9914	-0.0001	0.0005
GPS 003	1663266.0551	489805.9313	1663266.0550	489805.9310	0.0001	0.0003
GPS 004	1666152.8082	491175.3132	1666152.8080	491175.3136	0.0002	-0.0004
GPS 005	1668971.0246	492527.8276	1668971.0250	492527.8274	-0.0004	0.0002
GPS 006	1671919.3690	494102.6824	1671919.3690	494102.6819	0.0000	0.0005
GPS 007	1674527.2528	496312.9018	1674527.2520	496312.9020	0.0008	-0.0002
GPS 008	1676688.3403	498110.7376	1676688.3410	498110.7380	-0.0007	-0.0004
GPS 009	1678670.7511	499879.1707	1678670.7510	499879.1702	0.0001	0.0005
GPS 010	1681034.2376	501932.4499	1681034.2370	501932.4495	0.0006	0.0004
GPS 011	1684074.3331	504224.5437	1684074.3330	504224.5438	0.0001	-0.0001
GPS 012	1687058.1668	504580.5914	1687058.1670	504580.5914	-0.0002	0.0000

GPS 013	1690058.0462	504872.7022	1690058.0460	504872.7022	0.0002	0.0000
GPS 014	1693367.8008	505216.5693	1693367.8010	505216.5694	-0.0002	-0.0001
GPS 015	1697720.7925	505783.1719	1697720.7930	505783.1719	-0.0005	0.0000
GPS 016	1699510.8441	506224.3096	1699510.8440	506224.3096	0.0001	0.0000
GPS 017	1701989.0172	506744.7589	1701989.0170	506744.7588	0.0002	0.0001
GPS 018	1705089.3560	507449.3339	1705089.3560	507449.3339	0.0000	0.0000
GPS 019	1708427.5488	508780.2793	1708427.5480	508780.2793	0.0008	0.0000
GPS 020	1711142.9566	510429.3141	1711142.9570	510429.3141	-0.0004	0.0000
GPS 021	1714000.8853	512253.4526	1714000.8850	512253.4526	0.0003	0.0000
GPS 022	1716640.7845	514174.1010	1716640.7850	514174.1009	-0.0005	0.0001
GPS 023	1718754.4188	515709.8396	1718754.4190	515709.8396	-0.0002	0.0000
GPS 024	1721396.4757	517369.8098	1721396.4760	517369.8097	-0.0003	0.0001
GPS 025	1724222.3346	519314.6990	1724222.3350	519314.6990	-0.0004	0.0000
GPS 026	1727134.2945	521717.6719	1727134.2950	521717.6719	-0.0005	0.0000
GPS 027	1730104.5540	524134.7567	1730104.5540	524134.7568	0.0000	-0.0001
GPS 028	1732921.0046	526396.3450	1732921.0040	526396.3450	0.0006	0.0000

เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ หาได้จากสมการหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error) ตาม Equation 3 โดยคำนวณค่า RMSE = 0.00048 ม.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(dN+dE)^2}{n}} \quad (3)$$

dN และ dE คือ ค่าผลต่างของค่าพิกัด TM จากการ transfer และค่าพิกัดจากแบบของโครงการฯ n คือ จำนวนหมุด 29 หมุด

บันทึกข้อมูลในรูปแบบ GeoPackage และเปิดฐานข้อมูล SQLite ด้วยโปรแกรม DB Browser for SQLite

จาก Fig. 7 บันทึกข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ GeoPackage ซึ่งจากการนิยามแผนที่ TM ก็ถูกบันทึกลงไปที่ตาราง gpkg_spatial_ref_sys ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ถูกบันทึกเข้าไปด้วย

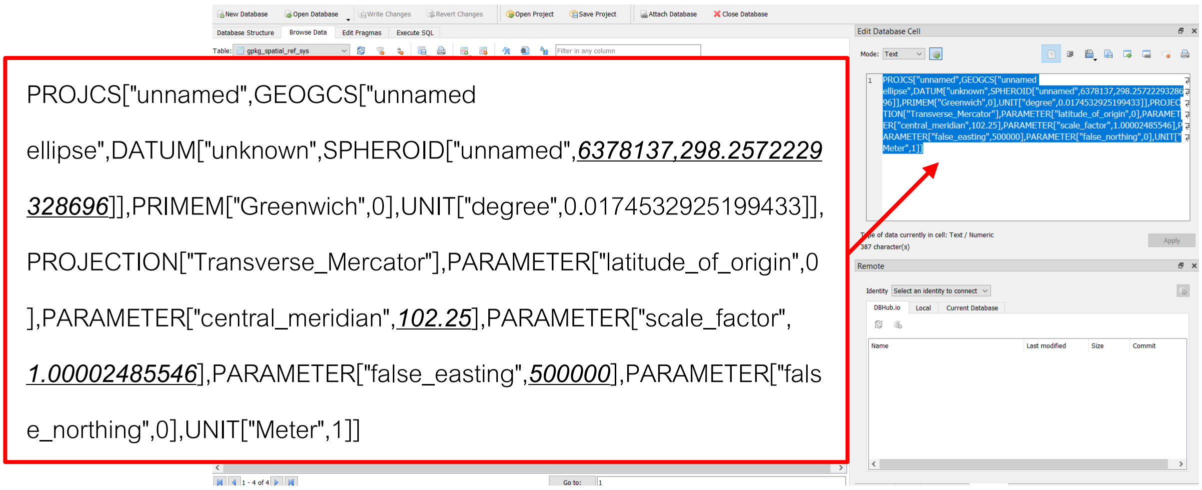


Fig. 7 Shows Data of TM Projection save to table gpkg_spatial_ref_sys of GeoPackage

สรุป

การนำซอฟต์แวร์ระบบข้อมูลทางภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการฉายแผนที่จากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่งนั้น สามารถทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากปัจจุบันซอฟต์แวร์มีมาตรฐานในการนิยามการฉายแผนที่ที่ดีขึ้น เช่น PROJ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งจากการศึกษานี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี GeoPackage ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการฉายแผนที่ให้มีข้อมูลเพียงชุดเดียวโดยสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ต่อยังซอฟต์แวร์สารสนเทศภูมิศาสตร์อื่นได้อย่างสะดวก มีความเป็นมาตรฐานสากล และยังลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้

จาการนำค่า TM ที่ได้จากการ Transform จากโปรแกรม QGIS มาหาค่าความต่างจากค่าพิกัดหมุดควบคุมจากแบบโครงการฯ โดยจะคำนวณค่า RMSE = 0.00048 ม. ซึ่งมีค่าน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าตัวแปรสำคัญที่จะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนต่ำนั้นคือค่าพารามิเตอร์ที่ระบุในการนิยามการฉายแผนที่ จึงต้องมีการระบุค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องก่อนนำมาใช้

เอกสารอ้างอิง

ไพศาล สันติธรรมนนท์,ประจวบ เรียบร้อย,ชาญชัย พัชรอาภา. 2564. ผลการศึกษาการฉายแผนที่ WGS-TM ในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน. วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา 2564:11–23.

สรวิศ สุภเวชย์. 2560. เอกสารคำสอนวิชา 012033572 Spatial Data Structure and Model. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Dennis L.D, 2019. Ground truth for the future low distortion projections and the state plane coordinate system of 2022. NOAA's National Geodetic Survey 2019: 12–17.

Dennis, L.D. 2016. Ground truth: Low Distortion map projections for engineering, surveying and GIS. In: Pipelines. pp. 857–869.

Federal Geodetic Control Committee. 1984. Standards and Specifications for Geodetic Control Networks. Maryland, MD, USA.

PROJ contributors. 2022. PROJ coordinate transformation software library. https://raw.githubusercontent.com/OSGeo/PROJ/gh-pages/proj.pdf, 19 September 2022.

Open Geospatial Consortium. 2014. GeoPackage. https://www.geopackage.org/,19 September 2022.

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียมสแมป

The development of model: To improve the accuracy of surface soil moisture datasets using the SMAP satellite system

ตนุภัทร พรมดี*, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์

Tanuphat Promdee*, Soravis Supavetch, Anuphao Aobpaet

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: tanuphat.pro@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP ที่ระดับความลึก 5 ซม. เป็นการวัดเชิงพื้นที่ใน 1 ตร.กม. กับความชื้นในดินจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน 10 สถานี ที่ระดับความลึก 10 ซม., 30 ซม., 60 ซม. และ 100 ซม. จากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เป็นการวัดเฉพาะจุด ระหว่างเดือนมิถุนายน 2564 ถึงเดือนตุลาคม 2565 โดยหาค่าความสัมพันธ์เบื้องต้นจากสมการเส้นตรง วิเคราะห์จากค่า R-squared สูงสุด และค่า *p*-value ผ่านเกณฑ์ ผลการวิจัยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินที่ระดับความลึก 10 ซม. ที่สถานี VLGE50 (ค่า R-squared = 0.83 และค่า *p*-value = 2.00×10^{-06}) ซึ่งมีระดับความลึกผิวดินใกล้เคียงกับการตรวจวัดความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP มีความสัมพันธ์ดีที่สุด ดังนั้นสมการเบื้องต้นที่จะนำไปใช้ คือ y = 53.48x + 17 เพื่อพัฒนาแบบจำลองและปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP

คำสำคัญ: ความชื้นในดิน, ความชื้นผิวดิน, ดาวเทียม SMAP

Abstract

The present study investigated correlation of surface soil moisture between SMAP satellites (at a depth of 5 cm.) and ground moisture stations (at a depth of 10, 30, 60 and 100 cm.). The collecting information of soil moisture content were conducted in 10 stations during June 2021 to October 2022. As a result, the correlation of surface soil moisture content data. It was found that the soil moisture data at a depth of 10 cm. The VLGE50 station has a similar surface depth to the measurements from SMAP satellites, a most significant that statistically significant at the correlation R-squared = 0.83 and p-value = 2.00×10^{-06} (Linear regression). Therefore, the results were selected using the equation; y = 53.48x + 17, to develop a model and improve the accuracy of surface soil moisture datasets using the SMAP satellite system.

Keywords: SMAP satellite, Soil moisture, Surface soil moisture

คำนำ

ความชื้นในดิน (Soil Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในดิน โครงสร้างของดินที่มีความแตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในดิน ความชื้นในดินมีผลต่อการระเหยของน้ำ การคายน้ำของพืชซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (อุมาพร, 2557) ผู้วิจัยได้ศึกษาดาวเทียม SMAP (Soil Moisture Active Passive) เป็นดาวเทียมดวงใหม่ที่สหรัฐอเมริกาส่งขึ้นไปยังอวกาศในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2557 โดยเครื่องมือ SMAP รวมถึง Radiometer และเรดาร์ที่ทำงานที่ช่อง L-band ความถี่ 1.2–1.41 GHz เครื่องมือถูกออกแบบวัดค่าปลดปล่อยและสะท้อนกลับ (surface emission and backscatter) ซึ่งจะสามารถตรวจจับสภาพของดิน ได้แก่ ความชื้นของดิน ระยะการแข็ง และการละลายของน้ำแข็งบนพื้นดินได้ในพื้นที่ที่มีสิ่งปกคลุมดินไม่หนาแน่นมาก ระยะทางการวัดเป็น 1,000 กิโลเมตร ซึ่งครอบคลุมระยะเวลา 3 วัน ที่ตำแหน่งศูนย์สูตร และ 2 วัน ที่ตำแหน่งละติจูด เหนือบริเวณภูมิอากาศแบบป่าสน (Boreal Forest) และในปัจจุบันประเทศไทยมีสถานีตรวจวัดความชื้นในดินด้วยระบบโทรมาตรอัตโนมัติติดตั้งโดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เพื่อตรวจวัดข้อมูลจากระยะไกล มีขนาดเล็กและติดตั้งง่าย สามารถวัดระดับน้ำ, ปริมาณน้ำฝน, อุณหภูมิ, ความชื้น, ความกดอากาศ, ความเข้มแสง, ความเร็วลม และความเค็ม โดยเชื่อมโยงข้อมูลอัตโนมัติผ่านระบบรับส่งข้อมูลของผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมทั้งแสดงผลข้อมูลในรูปแบบภูมิศาสตร์สารสนเทศบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทั่วประเทศ (Internet GIS)

โดยการวัดความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP เป็นการวัดเชิงพื้นที่ ส่วนการวัดความชื้นในดินด้วยสถานีตรวจวัดของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เป็นการวัดเฉพาะจุด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสามารถพัฒนาแบบจำลองและปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP ให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP และข้อมูลความชื้นในดินจากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) โดยวิเคราะห์จากค่า R-squared สูงสุด และค่า *p*-value ผ่านเกณฑ์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางภูมิศาสตร์ โดยจำแนกความชื้นผิวดินที่มีความแตกต่างกันในพื้นที่ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านเกษตรกรรมของประเทศไทยในอนาคต

วิธีการวิจัย

วิจัยนี้เป็นวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินจากดาวเทียม SMAP (ที่ระดับความลึก 5 ซม.) กับความชื้นในดินที่ตรวจวัดภาคพื้นดิน 10 สถานี (ที่ระดับความลึก 10 ซม., 30 ซม., 60 ซม. และ 100 ซม.) จากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) มาพัฒนาแบบจำลองและปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP โดยวิเคราะห์จากความสัมพันธ์เชิงเส้น

1) เตรียมข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากดาวเทียม SMAP ที่ Level 2 ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยข้อมูลจากดาวเทียม SMAP จะต้องคำนวณร่วมกับข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel เพื่อให้มีความละเอียด 1 กม. โหลดที่เว็บไซต์ https://search.earthdata.nasa.gov/search เลือกผลิตภัณฑ์ที่ชื่อว่า SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture V003

2) เตรียมข้อมูลความชื้นในดินจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) โหลดที่เว็บไซต์ https://partners.thaiwater.net:3007/soilMoisture ของแต่ละสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน 10 สถานี (มีระดับความลึก 10 ซม., 30 ซม., 60 ซม. และ 100 ซม.) ระหว่างเดือนมิถุนายน 2564 ถึงเดือนตุลาคม 2565 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3) นำข้อมูลความชื้นผิวดินดาวเทียม SMAP ความละเอียด 1 กม. ที่เป็นภาพย่อยขนาด ตร.กม. รายวันมาประกอบให้เป็นข้อมูลรายเดือน ทั้งพื้นที่ประเทศไทย โดยใช้วิธีการเฉลี่ยจุดภาพต่อจุดภาพในพื้นที่ที่มีการซ้อนทับของภาพระหว่างภาพรายวัน

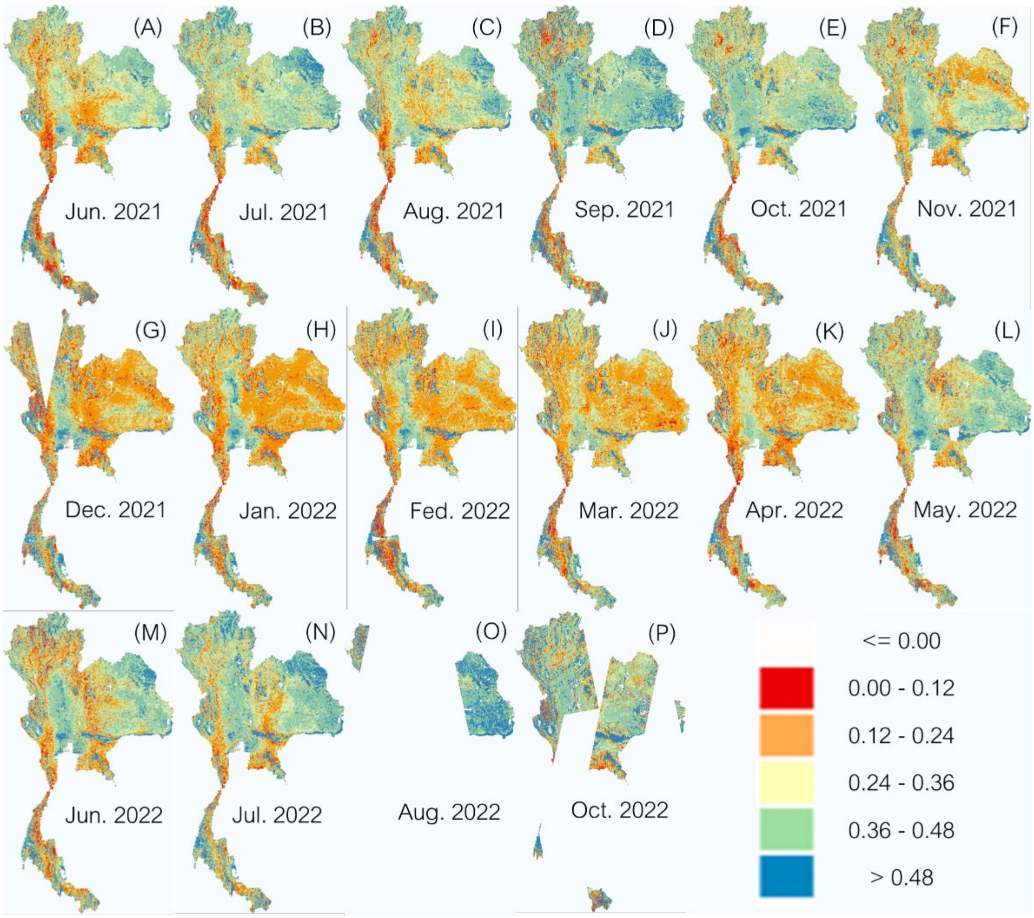


Fig. 1 Mapping surface soil moisture from space (SMAP satellite). Resolution 1 km.: (A) Jun. 2021; (B) Jul. 2021; (C) Aug. 2021; (D) Sep. 2021; (E) Oct. 2021; (F) Nov. 2021; (G) Dec. 2021; (H) Jan. 2022; (I) Feb. 2022; (J) Mar. 2022; (K) Apr. 2022; (L) May. 2022; (M) Jun. 2022; (N) Jul. 2022; (O) Aug. 2022; (P) Oct. 2022, from left to right, top to bottom, respectively.

4) อ่านข้อมูลจากดาวเทียม SMAP รายเดือน เทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) โดยใช้ตำแหน่งของสถานีตรวจวัดในการอ่านค่าความชื้นผิวดินในจุดภาพของข้อมูลจากดาวเทียม SMAP ที่ตำแหน่งกริดของข้อมูลดาวเทียมขนาด 1 กม. (เรียกว่า วิธีสุ่มค่าแบบ nearest neighbor) จำนวนทั้งหมด 10 สถานี ได้แก่ PAII, NMUB, BNKE, VLGE69, HNKA, WGYG, THAT, VLGE50, KKCN และ SWRO36

5) เตรียมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ โดยข้อมูลความชื้นในดินวัดได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1.ข้อมูลรายชั่วโมง คือ การอ่านข้อมูลรายชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินเทียบกับชั่วโมงที่ระบุในแหล่งที่มีจากดาวเทียม SMAP ว่ามีการวัดเวลาใด 2.นำข้อมูลรายชั่วโมงมาเฉลี่ยเป็นรายเดือน และข้อมูลความชื้นผิวดินจากระบบดาวเทียม SMAP แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1.ข้อมูลรายชั่วโมงของดาวเทียม SMAP ตรวจวัดที่จุดสถานี 2.นำข้อมูลรายชั่วโมงมาเฉลี่ยเป็นรายเดือน

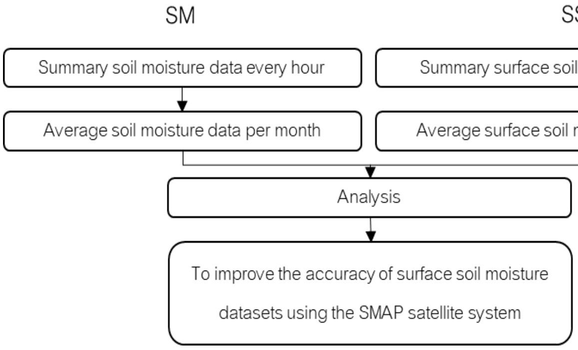


Fig. 2 Research methodology

6) นำข้อมูลระหว่างความชื้นในดินรายเดือนจากสถานีตรวจวัดกับความชื้นผิวดินรายเดือนจากดาวเทียม SMAP มาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) กับค่า R-squared จากสมการเชิงเส้น (Linear regression) และมาพัฒนาแบบจำลองและปรับปรุงความถูกต้องของข้อมูลความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดจากระบบดาวเทียม SMAP โดยเทียบกับข้อมูลความชื้นในดินของสถานีตรวจวัดจากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ตาม Equation 1

$$y = a(x) + b \qquad (1)$$

เมื่อ y = ค่าความชื้นในดินของสถานีตรวจวัดสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน)

x = ค่าความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP

หมายเหตุ: ค่า a และ b คือ การหาสัมประสิทธิ์ ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1) เปรียบเทียบที่ความลึก 10 ซม. ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น ผลจาก 10 สถานี มีค่า R-squared อยู่ระหว่าง 0.02-0.83 ซึ่ง 3 สถานีที่ดีที่สุด ได้แก่ สถานี VLGE50, VLGE49 และ BNKE ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (0.83, 0.73 และ 0.57 ตามลำดับ) ดังรูป จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้ง 3 สถานีพบว่าข้อมูลกระจายตัวน้อย ค่อนข้างรวมกันเป็นกลุ่ม ทำให้มีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำ อาจเนื่องจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินที่ระดับความลึก 10 ซม. ใกล้เคียงกับระดับการตรวจวัดผิวดินของดาวเทียม SMAP ที่ความลึก 5 ซม.

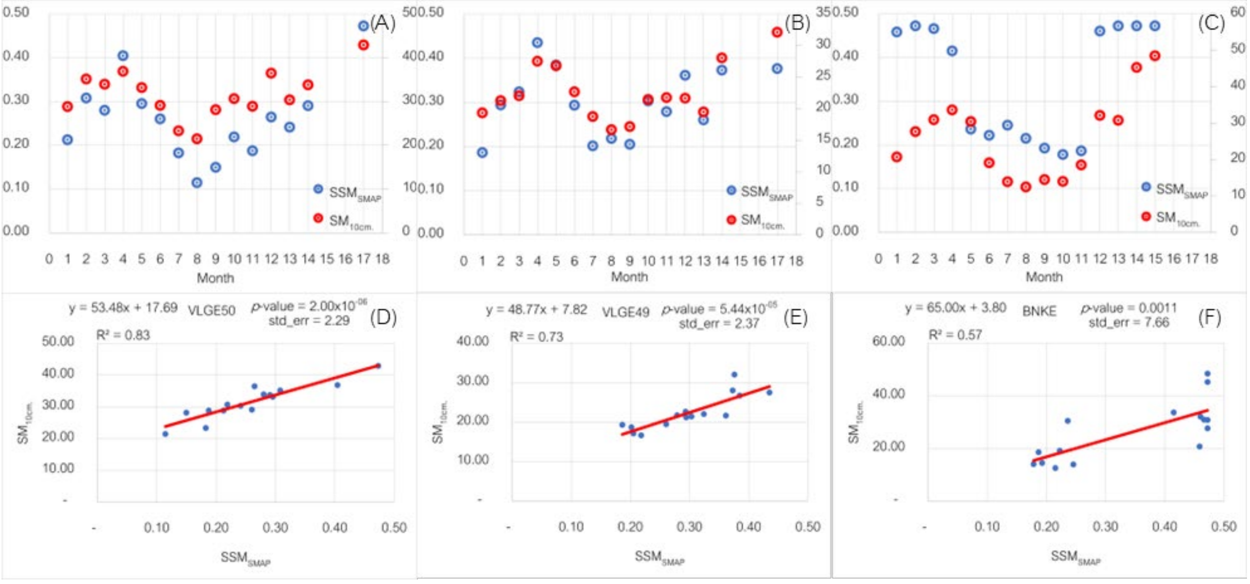


Fig. 3 Graph showing the correlation of soil surface moisture from SMAP satellite with soil moisture of 10 cm depth ground monitoring stations of VLGE50, VLGE49 and BNKE stations

2) เปรียบเทียบที่ความลึก 30 ซม. ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น ผลจาก 10 สถานี มีค่า R-squared อยู่ระหว่าง 0.004-0.71 ซึ่ง 3 สถานีที่ดีที่สุด ได้แก่ สถานี BNKE, VLGE50 และ SWRO36 ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (0.71, 0.42 และ 0.40 ตามลำดับ) ดังรูป จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้ง 3 สถานีพบว่าข้อมูลกระจายตัวจากน้อยไปมาก ทำให้มีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำไปสูง ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์เพียง 1 สถานี คือ BNKE อาจเนื่องจากเป็นการตรวจวัดที่ระดับความลึก 30 ซม. มีความห่างกับระดับการตรวจวัดผิวดินของดาวเทียม SMAP มากถึง 25 ซม.

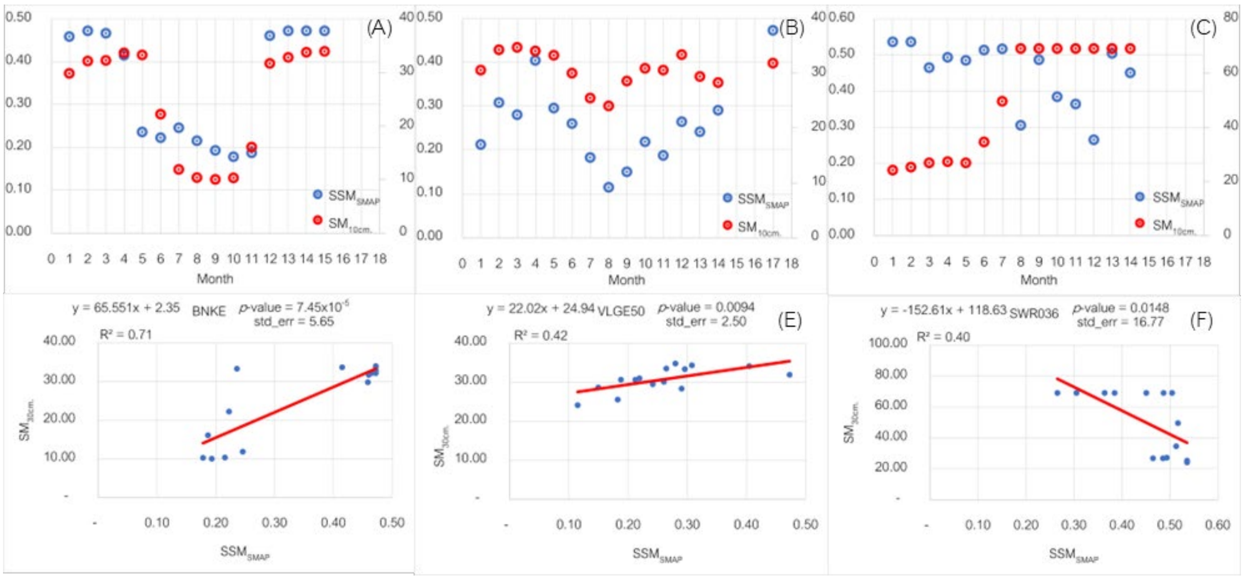


Fig. 4 Graph showing the correlation of soil surface moisture from SMAP satellite with soil moisture of 30 cm depth ground monitoring stations of BNKE, VLGE50 and SWRO36 stations

3) เปรียบเทียบที่ความลึก 60 ซม. ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น ผลจาก 10 สถานี มีค่า R-squared อยู่ระหว่าง 0.03-0.63 ซึ่ง 3 สถานีที่ดีที่สุด ได้แก่ สถานี BNKE, WGYG และ VLGE49 ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (0.63, 0.42 และ 0.39 ตามลำดับ) ดังรูป จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้ง 3 สถานีพบว่าข้อมูลกระจายตัวจากน้อยไปมาก ทำให้มีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำไปสูง ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์เพียง 1 สถานี คือ BNKE อาจเนื่องจากเป็นการตรวจวัดที่ระดับความลึก 60 ซม. มีความห่างกับระดับการตรวจวัดผิวดินของดาวเทียม SMAP มากถึง 55 ซม.

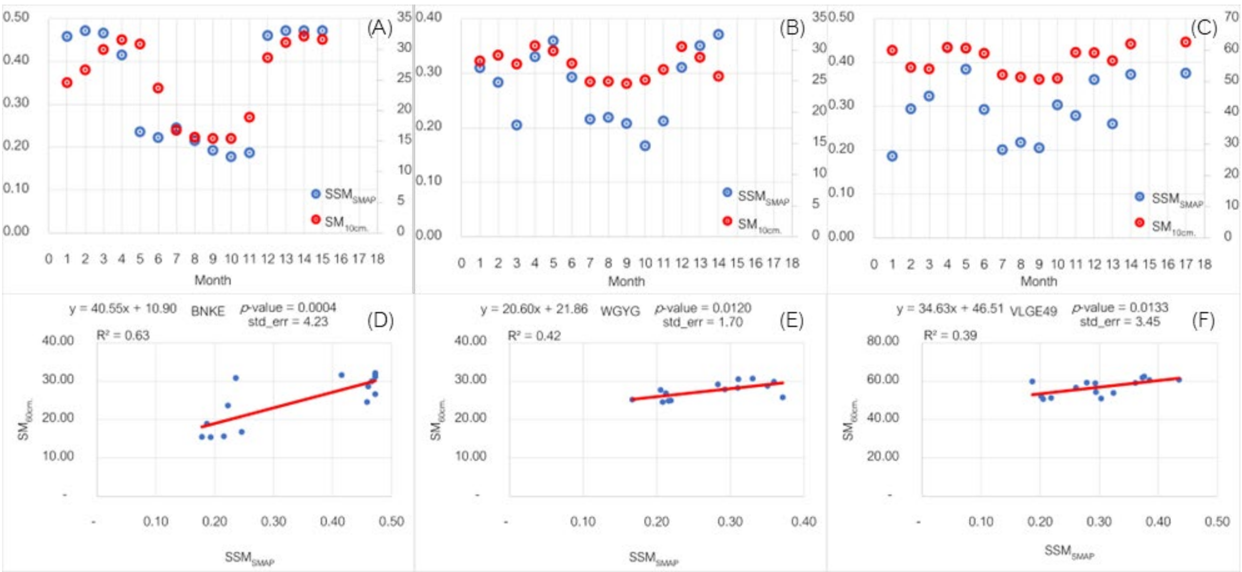


Fig. 5 Graph showing the correlation of soil surface moisture from SMAP satellite with soil moisture of 60 cm depth ground monitoring stations of BNKE, WGYG and VLGE49 stations

4) เปรียบเทียบที่ความลึก 100 ซม. ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น ผลจาก 10 สถานี มีค่า R-squared อยู่ระหว่าง 0.01-0.78 ซึ่ง 3 สถานีที่ดีที่สุด ได้แก่ สถานี NMUB, VLGE50 และ BNKE ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (0.77, 0.65 และ 0.47 ตามลำดับ) ดังรูป จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้ง 3 จากกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้ง 3 สถานีพบว่าข้อมูลกระจายตัวจากน้อยไปมาก ทำให้มีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำไปสูง ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์ด้วยกัน 2 สถานี คือ NMUB และ VLGE50 อาจเนื่องจากเป็นการตรวจวัดที่ระดับความลึก 100 ซม. มีความห่างกับระดับการตรวจวัดผิวดินของดาวเทียม SMAP มากถึง 95 ซม.

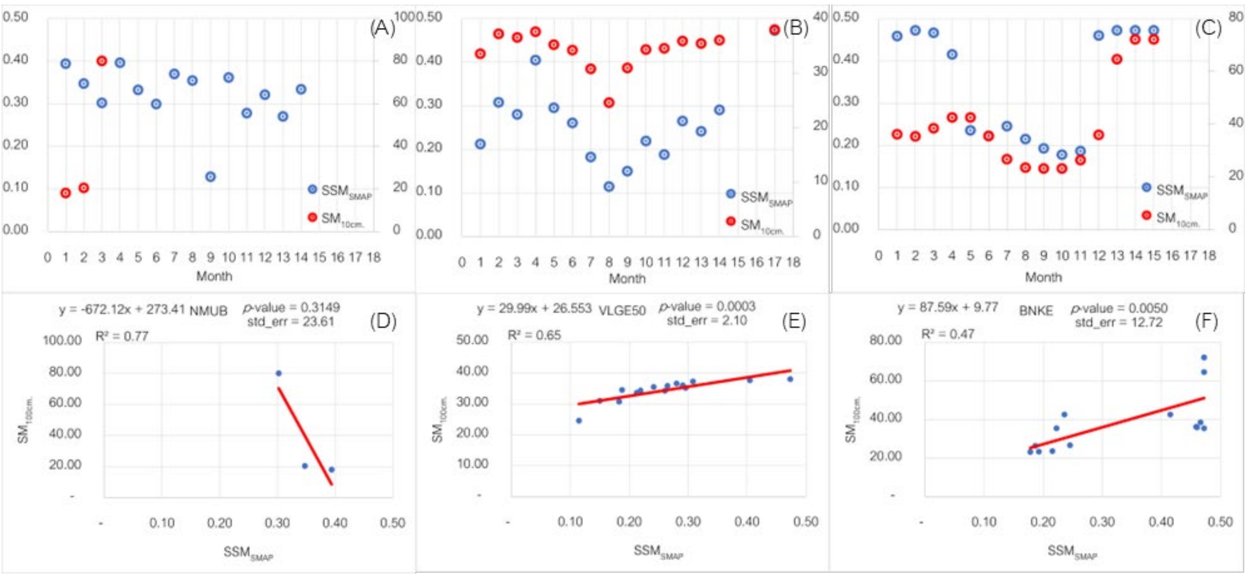


Fig. 6 Graph showing the correlation of soil surface moisture from SMAP satellite with soil moisture of 100 cm depth ground monitoring stations of NMUB, VLGE50 and BNKE stations

จากผลการทดลองพบว่าสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินที่ระดับความลึก 10 ซม. มีระดับความลึกใกล้เคียงกับระดับการตรวจวัดผิวดินของดาวเทียม SMAP โดยพบว่าข้อมูลกระจายตัวน้อย ค่อนข้างรวมกันเป็นกลุ่ม และข้อมูลมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้มีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำ จึงเลือกสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินที่ความลึก 10 ซม. ที่มีความสัมพันธ์ของข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ดี ให้เป็นตัวแทนในการปรับปรุงข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP และการศึกษาพื้นที่การเกษตร การศึกษานี้เป็นข้อสังเกตในเบื้องต้นที่ระดับความลึกในดินที่ต่างกัน ตำแหน่งแต่ละตำแหน่งมีชนิดของดินแตกต่างกัน ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณใกล้เคียงกันแตกต่างกัน งานวิจัยนี้ต้องการสังเกตโดยการตั้งสมมติฐานความลึกของดินที่แตกต่างกัน เนื่องจากดาวเทียม SMAP เป็นการวัดความลึกผิวดิน ค่าสหสัมพันธ์สูงสุดควรอยู่ที่ผิวดิน การรังวัดจากดาวเทียม SMAP เป็นการตรวจวัดการปล่อยพลังงานจากวัตถุพื้นผิว และการปล่อยพลังงานตรวจวัดโดยตรงจากดาวเทียม ประมวลผลร่วมกัน ดังนั้น ค่าประมาณที่ได้จากดาวเทียมควรมีสหสัมพันธ์สูงกับข้อมูลความชื้นในชั้นดินตื้นมากกว่าชั้นดินที่ลึกกว่า ซึ่งความผันแปรจากข้อมูลจากดาวเทียม (รังวัดโดยอ้อม) กับข้อมูลรังวัดโดยตรงจากสถานี มีความละเอียดเชิงพื้นที่ไม่เท่ากัน เพราะข้อมูลจากดาวเทียมเป็นความชื้นเชิงพื้นที่พื้นผิว ทำให้ความสอดคล้องขึ้นอยู่กับตำแหน่งตรวจวัดของสถานีตรวจวัดโดยตรงกับพื้นที่รอบข้าง รวมถึงปัจจัยความชื้นใต้ดินยังมีเรื่องของความละเอียด ความหนาแน่น, รูพรุน, รากพืช และอื่นๆ ที่ทำให้ปัจจัยท้องถิ่น (local) มีผลกับการเปรียบเทียบ

สรุป

เปรียบเทียบทั้ง 10 สถานีแล้ว ไม่ได้มีความสัมพันธ์ที่ดีทุกพื้นที่ พบว่าสถานี VLGE50, VLGE49 และ BNKE มีผลการศึกษาที่ดีในพื้นที่ 1 ตร.กม. โดยไม่ได้ตั้งอยู่ใกล้พื้นที่ส่งน้ำหรือพื้นไร่สวนที่มีการรดน้ำ และมีการเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมการใช้ประโยชน์ที่ดินน้อย เช่น เป็นพื้นที่ทำนาเป็นส่วนใหญ่ ทำให้การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูล ณ ตำแหน่งนั้น ๆ มีค่าความสัมพันธ์สูง ในทางกลับพบว่าสถานี PAII, NMUB, THAT, HNKA, WGYG, KKCN และ SWRO36 มีผลการศึกษาที่ไม่ดีในพื้นที่ 1 ตร.กม. โดยตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ชุมชน และอยู่ใกล้แหล่งส่งน้ำหรือพื้นไร่สวน ทำให้ข้อมูลมีความแปรปรวนสูง ส่งผลให้การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูล ณ ตำแหน่งนั้น ๆ มีค่าสัมพันธ์ต่ำ และข้อมูลตรวจวัดผิดพลาดได้ เนื่องจากแต่ละพื้นที่มีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันไปตามตัวแทนจากวิธีการตรวจวัด โดยการวัดความชื้นผิว

ดินจากดาวเทียม SMAP เป็นการวัดเชิงพื้นที่ ส่วนการวัดความชื้นในดินด้วยสถานีตรวจวัดของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เป็นการวัดเฉพาะจุด มีผลทำให้การใช้พื้นที่ตรงนั้นที่แตกต่างกันมาก เช่น ในพื้นที่สถานี BNKE ที่ความลึก 10 ซม. สถานีตั้งอยู่ในเขตชุมชน แต่พื้นที่รอบข้างเป็นพื้นที่การเกษตรกว่า 90% ใน 1 ตร.กม. ส่งผลให้ค่าของดาวเทียม SMAP แปรผันมากกับผลทำให้ค่า R-squared ต่ำ (R-squared = 0.53) กับค่า *p*-value (p = 0.0011) ส่วนสถานี VLGE50 ตั้งอยู่ในชุมชนเหมือนกัน แต่โดยรอบข้างเป็นพื้นที่เกษตร 70% ใน 1 ตร.กม. ได้ค่า R-squared สูง (R-squared = 0.83) กับค่า *p*-value ($p = 2.00\times10^{-6}$) ซึ่งดีกว่าสถานีที่มีการถูกรบกวนในพื้นที่มาก งานวิจัยนี้เลือกสถานี VLGE50 ความลึก 10 ซม. ที่มีความสัมพันธ์ของข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ดี ดังนั้นเลือกใช้เป็นตัวแทนสมการ $y = 53.48x + 17.69$ ไปใช้ในการปรับปรุงข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP เพื่อการศึกษาพื้นที่การเกษตร เนื่องจากเป็นชุดที่ตรวจสอบแล้วมีค่า R-squared สูงสุด และมีค่า *p*-value ผ่านเกณฑ์ ทั้งนี้การนำสมการนี้ไปใช้ควรทำการวิจัยเพิ่ม โดยการขยายจำนวนสถานีให้เป็นตัวแทนพื้นที่ในระดับ 1 ตร.กม. เพื่อเทียบกับการตรวจวัดจากดาวเทียม SMAP จึงลดความแตกต่างระหว่างแบบจุดกับแบบพื้นที่ได้

เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการจัดทำปทานุกรมปฐพีวิทยา. 2541. ปทานุกรมปฐพีวิทยา. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

อุมาพร จารุสมบัติ. 2557. ดาวเทียมดวงใหม่ตรวจวัดความชื้นของดิน. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 42: 16–20.

วรวิทย์. การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์. https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=8206, 1 มีนาคม 2564.

ไพโรจน์ เกรียงศิริ. 2537. ระบบ GIS กับวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ. วิศวกรรมสาร มก. 8: 28–32.

Al-Yaari, A., Wigneron, J.-P., Ducharne, A., et al. (2014). Global-scale comparison of passive (SMOS) and active (ASCAT) satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations (MERRA-Land). Remote Sens. Environ. 152: 614–626. doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.013

Jadidoleslam, N., Mantilla, R., Krajewski, W.F., Goska, R. 2019. Investigating the role of antecedent SMAP satellite soil moisture, radar rainfall and MODIS vegetation on runoff production in an agricultural region. J. Hydrol. 579: 124210. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124210

Li, Q., Wang, Z., Shangguan, W., Li, L., Yao, Y., Yu, F. 2021. Improved daily SMAP satellite soil moisture prediction over China using deep learning model with transfer learning. J. Hydrol. 600: 126698. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126698

Velpuri, N.M., Senay, G.B., Morisette, J.T. 2016. Evaluating new smap soil moisture for drought monitoring in the rangelands of the US high plains. Rangelands 38: 183–190. doi.org/10.1016/j.rala.2016.06.002

การประเมินความลึกท้องน้ำจากการรับรู้ระยะไกลด้วยภาพถ่ายดาวเทียม

Estimation of reservoir bathymetry from remote-sensing imagery

ธิติมา พงศ์พฤติ*, **สรวิศ สุภเวชย์**

Thitima Pongprute*, Soravis Supavetch

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Thitima.pkk@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอ การประมวลผลข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel-2 เป็นข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูงและมีความถี่ในการรับภาพพื้นที่เดิมทุกสัปดาห์ เพื่อประยุกต์ใช้ดัชนีความแตกต่างของน้ำปกติ MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวน้ำ และความลึกน้ำในอ่างเก็บน้ำ ด้วยวิธี Satellite Derived Bathymetry (SDB) ร่วมกับแบบจำลองอัตราส่วนช่วงคลื่น (Log–Band Ratio Method) เพื่อให้ได้ความลึกน้ำที่มีความแม่นยำสูง เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลที่ตรวจวัดของกรมชลประทาน จากนั้นใช้แบบจำลองกับภาพถ่ายดาวเทียมในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 28 ธันวาคม 2562 ผลวิจัยพบว่าค่าระดับความลึกน้ำจากวิธีการ SDB อยู่ในช่วง -3.19 ถึง -34.58 เมตร และ - 2.92 ถึง -20.23 เมตร และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.2000 และ 0.039 คำนวณปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำได้ประมาณ 297.0600 และ 220.9700 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นวิธีการทางเลือกในการสนับสนุนภารกิจการบริหารจัดการน้ำในการติดตามปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำ รวมทั้งได้กล่าวถึงข้อเสนอแนะสำหรับการนำวิธีการที่ได้จากการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นของประเทศต่อไป

คำสำคัญ: ดัชนีความแตกต่างของน้ำปกติ, เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล, ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

Abstract

This research presents data processing from Sentinel-2 satellite. That is highly resolution Imagery and frequent of Orbit in same area every week. To apply the MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) for analyzing water surface area and water depth in the reservoir by using Satellite Derived Bathymetry (SDB) together with the Log-Band Ratio Method to obtain water depth with high accuracy. Compared with the measurement database of the Royal Irrigation Department. Then the model was applied to satellite images on 18th Oct 2022 and 28th Dec 2019 The results showed that the water depth from the SDB method between -3.19 to -34.58 meters and -2.92 to -20.23 meters and the mean deviations of 0.2000 and 0.03900. The volume of water in reservoir can be calculated approximately 297.0600 and 220.9700 Million cubic meters. Therefor the study can be used as an alternative method to support the water management planning and reservoir operation monitoring. Including a suggestion can be used as a guildeline for assessing to apply in other areas of the country.

Keywords: MNDWI, Remote Sensing, Sentinel-2 satellite imagery

คำนำ

การสำรวจทางชลศาสตร์ (Bathymetric Survey) ได้ใช้เทคโนโลยีการสำรวจการหาความลึกน้ำด้วยระบบเสียงสะท้อน (Echo sounder Survey System) แบ่งเป็น 2 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบหยั่งน้ำแบบลำคลื่นเดี่ยว (Single-Beam Echo sounder System: SBES) ระบบหยั่งน้ำแบบหลายลำคลื่น (Multi Beam Echo sounder System: MBES) ทั้งสองระบบใช้เรือเป็นพาหนะในการสำรวจ ซึ่งการสำรวจข้อมูลด้วยวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดด้านงบประมาณ บุคลากร และระยะเวลาการสำรวจที่ใช้ระยะเวลานาน และในการรายงานสถานการณ์น้ำในแต่ละวันของกรมชลประทาน ในทางปฏิบัติใช้วิธีติดตั้งไม้วัดระดับน้ำ (Staff gauge) และอ่านค่าความลึกเฉลี่ย เพื่อคำนวณปริมาตรน้ำในพื้นที่อ่างเก็บน้ำ ซึ่งอาจทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณเนื่องจากมีจำนวนจุดตรวจวัดที่ไม่เพียงพอ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีจากการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) ด้วยข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมสามารถบันทึกปรากฏการณ์ต่างๆบนพื้นผิวโลก และจัดทำแผนที่พื้นที่ผิวน้ำ เพื่อใช้ในการสำรวจข้อมูลความลึกท้องน้ำในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพ การประเมินข้อมูลน้ำในสถานการณ์ต่างๆ เนื่องจากดาวเทียมสามารถถ่ายภาพครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้าง และเข้าถึงลำบากได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการสำรวจภาคสนาม และแรงงานในการลงสำรวจพื้นที่ มีการจัดเก็บภาพเป็นฐานข้อมูลที่สามารถสืบค้นย้อนหลังได้ นอกจากนี้ จากคุณสมบัติของดาวเทียมที่มีคาบโคจรวนกลับมาถ่ายภาพซ้ำได้ ทำให้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม มีความน่าเชื่อถือและเป็นข้อมูลใกล้เคียงกับเวลาจริง (Near Real-time)

งานวิจัยนี้จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการสำรวจความลึกท้องน้ำของอ่างเก็บน้ำจากภาพถ่ายดาวเทียม โดยใช้ดาวเทียม Sentinel-2 ในการเก็บภาพถ่ายดาวเทียม และใช้โปรแกรม QGIS ประมวลผลทางภูมิสารสนเทศทางภูมิศาสตร์มาเทียบปริมาตรของน้ำในอ่างเก็บน้ำกับฐานข้อมูลที่ตรวจวัดกับกรมชลประทาน โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาอ่างเก็บน้ำนฤบดินทรจินดาเป็นโครงการชลประทานขนาดใหญ่ พื้นที่อ่างเก็บน้ำตั้งอยู่ในเขตตำบลแก่งดินสอ และพื้นที่ชลประทานอยู่ในเขตตำบลแก่งดินสอ อำเภอนาดี ตำบลเมืองเก่า ตำบลบ่อทอง และตำบลบ้านนา อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี ลักษณะเป็นเขื่อนดินแบบแบ่งโซน (Zone Type Dam) ความสูงประมาณ 33 เมตร ความยาวประมาณ 3,970 เมตร และทำนบดินปิดช่องเขาต่ำ จำนวน 2 แห่ง พื้นที่อ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกัก +48.000 ม.รทก. มีความจุอ่างเก็บน้ำ 295.00 ล้าน ลบ.ม. มีพื้นที่อ่างเก็บน้ำประมาณ 16,250 ไร่ ครอบคลุมพื้นที่ชลประทาน 111,300 ไร่ ดังแสดงใน Fig. 1 ช่วยบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี จังหวัดปราจีนบุรี เป็นแหล่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคของราษฎรและการประปา ช่วยรักษาระบบนิเวศผลักดันน้ำเค็มและน้ำเน่าเสียในแม่น้ำปราจีนบุรี และแม่น้ำบางปะกง

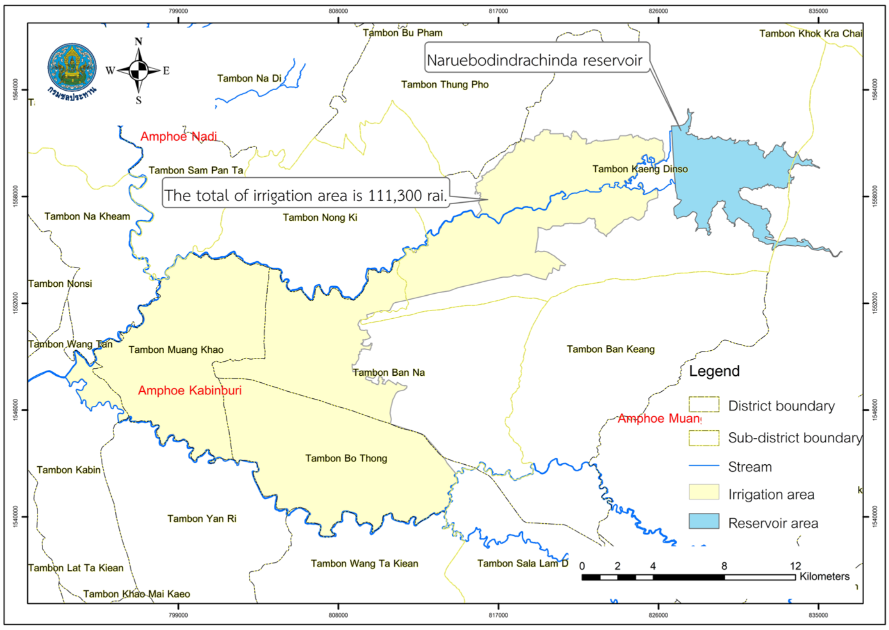


Fig. 1 The study area of Naruebodindrachinda reservoir in Naruebodindrachinda operation and maintenance project

ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2A และ Sentinel-2B บันทึกภาพ multispectral instrument (MSI) ประกอบด้วย 13 ช่วงคลื่น (band) ครอบคลุมตั้งแต่ช่วงคลื่นมองเห็น คลื่นใกล้อินฟราเรด และคลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) ขนาด 10, 20 และ 60 เมตร ตามช่วงคลื่นต่างๆ มีรอบการถ่ายภาพที่ตำแหน่งเดิมในรอบ 5 วัน โดยมีการบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเมฆโดยละเอียดจึงมีความพิเศษกว่าดาวเทียมสำรวจอื่น ๆ

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียม 2 วันในการสังเกตสัดส่วนความแตกต่าง เลือกวันที่ 28 ธันวาคม 2562 และ 18 ตุลาคม 2565 ในช่วงฤดูน้ำหลาก โดยทำการเลือกภาพที่มีความชัดเจน มีเมฆบดบังน้อย โดยมีรายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ให้ครอบคลุมพื้นที่อ่างเก็บน้ำนฤบดินทรจินดา จังหวัดปราจีนบุรี

Table 1 Sentinel-2 satellite image data details

Sentinel-2 images	Map sheet	UTC	cloud percentage	Spatial resolution
18/10/2565	47PQR	03:54:25	16.9	20
28/12/2562	47PRR	03:54:14	0	20

วิธีการวิจัย

การวิเคราะห์และแปลภาพถ่ายดาวเทียมได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 9 ขั้นตอน มีกระบวนการและขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

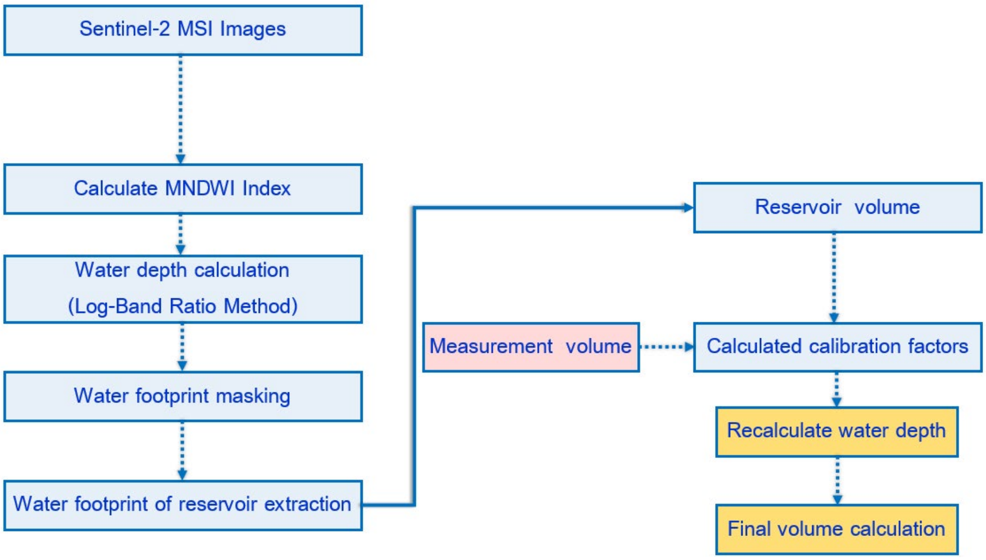


Fig. 2 Flowchart with the Sequence of steps in the Methodology

1) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ดาวน์โหลดจากองค์กรอวกาศของยุโรป (ESA) ที่ URL https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/ โดยเลือกภาพถ่ายดาวเทียมวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และวันที่ 28 ธันวาคม 2562 ครอบคลุมพื้นที่อ่างเก็บน้ำนฤบดินทรจินดา โดยเป็นข้อมูลภาพ Level-2A ซึ่งเป็นข้อมูลที่ให้ภาพสะท้อนด้านล่างของชั้นบรรยากาศ (BOA) ที่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ระดับ 1C ในที่นี้เลือกใช้ภาพช่วงคลื่น Band2 (Blue) ความยาวคลื่น 490 nm., Band3 (Green) ความยาวคลื่น 560 nm., Band11 (Swir) ความยาวคลื่น 1,610 nm. (ขนาดจุดภาพ 20 เมตร × 20 เมตร)

2) นำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Band3 (Green) และ Band11 (Swir) มาคำนวณพื้นที่ผิวน้ำด้วยวิธีดัชนีน้ำ MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006) โดยวิธีดัชนีน้ำมีรูปแบบตาม Equation 1

$$\text{MNDWI} = \frac{\rho_{Green} - \rho_{swir}}{\rho_{Green} + \rho_{swir}} \qquad (1)$$

โดยที่ ρ_{Green} และ ρ_{swir} คือ ค่า BOA Reflectance จากดาวเทียม Sentinel-2 ใน Band 3 และ Band 11 ตามลำดับ ทั้งนี้ MNDWI ที่ได้มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งโดยทั่วไปค่าที่เป็นบวก (MNDWI >0) แปลผลได้ว่าเป็นพื้นที่ผิวน้ำ

3) ในที่นี้เลือกใช้หลักการแบบจำลองอัตราส่วนช่วงคลื่น (Log-Band Ratio Method) (Stumpf et al., 2003) ตาม Equation 2 นำมาคำนวณหาค่าความลึกของน้ำ (Water depth) เพื่อประมาณค่าความลึกของน้ำ (Z) โดยใช้สัมประสิทธิ์คงที่ที่มีความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดสองค่า (m_0 & m_1) จากงานวิจัยของ ชนัตถพงศ์ และคณะตาม Equation 3

$$z = m_1 \times \frac{\ln(n(\lambda i))}{\ln(nRw(\lambda j))} - m_0 \qquad (2)$$

โดยที่ Z คือ ความลึกสัมบูรณ์ของน้ำด้วยวิธีการ SDB

m_1 คือ ค่าคงที่ที่ใช้ในการปรับอัตราส่วนต่อความลึก

Rw คือ การสะท้อนสเปกตรัมที่สังเกตุ

m_0 คือ ค่าชดเชยสำหรับความลึก 0 ม.

λi คือ ช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (Band 2)

λj คือ ช่วงคลื่นสีเขียว (Band 3)

$$Z = 2295.6 \times \frac{Band2}{Band3} - 2318.1 \quad (3)$$

4) ผลลัพธ์ค่าความลึกที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งยังไม่ได้ถูกสกัดพื้นที่ผิวน้ำ ออกจากจุดภาพประเภทอื่น โดยใช้วิธีการ Masking ทำการกรองจุดภาพ ผลลัพธ์จากวิธีการนี้จะทำให้จุดภาพบนพื้นที่ผิวอื่นๆ มีค่าเป็นศูนย์

5) เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีแหล่งน้ำอื่นอยู่ จึงใช้วิธีการ Clip raster by mask layer กับ Polygon ของอ่างเก็บน้ำ ให้ผลลัพธ์เหลือเพียงข้อมูลของอ่างเก็บน้ำเท่านั้น

6) ในการวิเคราะห์ปริมาตรน้ำในอ่าง คำนวณได้จากความลึกน้ำคูณกับขนาดของจุดภาพ (400 ตารางเมตร) ตาม Equation 4

$$Volume = Pixel\ Area \times water\ depth \quad (4)$$

โดยที่ Pixel Area คือ ขนาดจุดภาพ 20 เมตร × 20 เมตร

Water depth คือ ความลึกของน้ำ (เมตร)

7) ค่าความลึกน้ำที่ประเมินจากแบบจำลองอัตราส่วนช่วงคลื่น (Log-Band Ratio Method) โดยใช้สัมประสิทธิ์คงที่ (m_0 & m_1) จากภาพในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 28 ธันวาคม 2562 นำมาเทียบ (calibrate) กับข้อมูลปริมาณน้ำในอ่าง ตามวันที่ดังกล่าว จากปัจจุบันกรมชลประทานคำนวณปริมาตรน้ำในอ่างด้วยวิธีอ่านตัวเลขจากไม้ระดับ (Staff gauge) คำนวณร่วมกับ Rule Curve เพื่อให้ได้ปริมาตรน้ำ และนำค่าตัวเลขนี้ไปปรับแก้ต่อไป

8) คำนวณค่าปรับแก้ค่าความลึก เพื่อปรับแก้สมการตาม Equation 3 เนื่องจากเป็นสมการจากดาวเทียม Landsat ให้เป็นดาวเทียม Sentinel-2 ได้ โดยคำนวณจากสัดส่วน ปริมาตรน้ำในอ่างของกรมชลประทานที่วัดได้ในวันดังกล่าว หารด้วย ปริมาตรน้ำจากการคำนวณ ตาม Equation 4 ให้ผลลัพธ์ค่าปรับแก้ 0.0251 ในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 0.09272 ในวันที่ 28 ธันวาคม 2562

9) จากนั้นนำค่าปรับแก้ใช้ในการหาค่าความลึกน้ำของภาพถ่ายดาวเทียมในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 28 ธันวาคม 2562 แล้วนำค่าความลึกน้ำที่ปรับแก้แล้วไปหาปริมาตรน้ำในอ่างต่อไป

ผลการศึกษางานวิจัย

1) จากผลการวิเคราะห์ค่าสถิติของข้อมูลภาพ MNDWI ทั้งภาพในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 28 ธันวาคม 2562 ดังตาราง ข้อมูล MNDWI ของทุกประเภทพื้นผิวมีค่าอยู่ระหว่าง -0.26 ถึง 0.86 แต่ช่วงค่า MNDWI บนพื้นที่ผิวน้ำ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0543–0.5400 ในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0069–0.8600 ในวันที่ 28 ธันวาคม 2562 ซึ่ง

จะนำช่วงค่าดังกล่าวนี้ไปใช้กรองจุดภาพที่ใช้คำนวณปริมาตรแยกในแต่ละวัน สำหรับค่า MNDWI ของทุกประเภทพื้นผิวมีค่าดัง Table 2

Table 2 Statistics of MNDWI images of the Naruebodindrachinda reservoir

Sentinel-2 images	Mean	Minimum	Maximum	Standard deviation
18/10/2565	-0.26	-0.54	0.54	0.07
28/12/2562	-0.48	-0.69	0.86	0.13

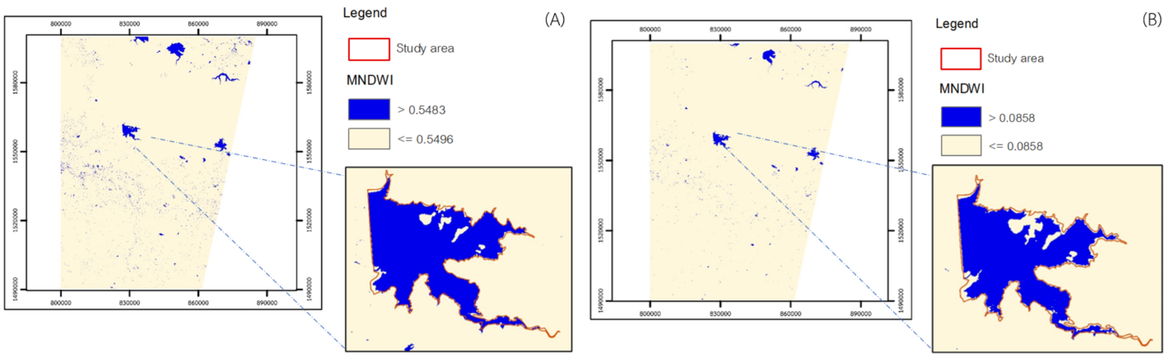


Fig. 3 Calculation of MNDWI: (A) 18 Oct. 2022; (B) 28 Dec. 2019 from left to right, respectively

2) จากผลการคำนวณหาค่าความลึกน้ำ ในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 28 ธันวาคม 2562 พื้นที่อ่างเก็บน้ำ ให้ความลึกสูงสุด และค่าความลึกน้อยที่สุด -38.5100 และ -373.0427 เมตร และ -116.6800 เมตร และ -806.0700 เมตร ตามลำดับ โดยก่อนปรับแก้พบว่าความลึกน้ำค่อนข้างมาก (Overestimate) เนื่องจากประยุกต์ตาม Equation 3 ใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Landsat

Table 3 Statistics of water depth before adjustment factor

Sentinel-2 images	Mean (m)	MIN (m)	MAX (m)	Standard deviation
18/10/2565	-109.1101	-298.9678	0	62.1836
28/12/2562	-333.7428	-702.9968	0	190.4222

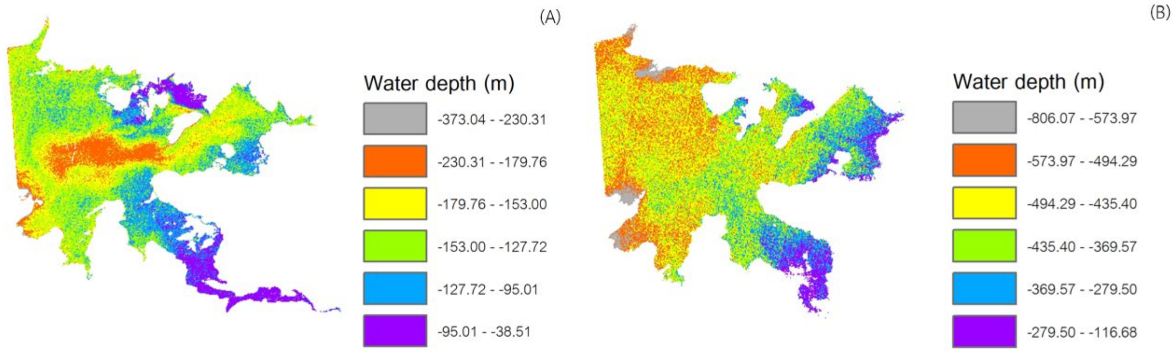


Fig. 4 Water depth distribution map before adjustment factor: (A) 18 Oct. 2022; (B) 28 Dec. 2019 from left to right, respectively

3) สำหรับค่าความลึกอ่างเก็บน้ำนฤบดินทรจินดาจากภาพถ่ายดาวเทียม ให้ผลจากการปรับแก้พบว่าความลึกน้ำของอ่างเก็บน้ำอยู่ในช่วง -3.1900 ถึง -34.5800 เมตร ในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ -2.9200 ถึง -20.2300 เมตร ในวันที่ 28 ธันวาคม 2562 โดยบริเวณที่มีความลึกมาก (สีน้ำเงินเข้ม) ส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณกลางอ่างเก็บน้ำ และท้ายอ่างอยู่เล็กน้อย เนื่องจากเป็นทางน้ำธรรมชาติเดิม

Table 4 Statistics of water depth after adjustment factor

Sentinel-2 images	Mean (m)	MIN (m)	MAX (m)	Standard deviation
18/10/2565	-10.1166	-27.7202	0	5.7656
28/12/2562	-8.3769	-17.6452	0	4.7795

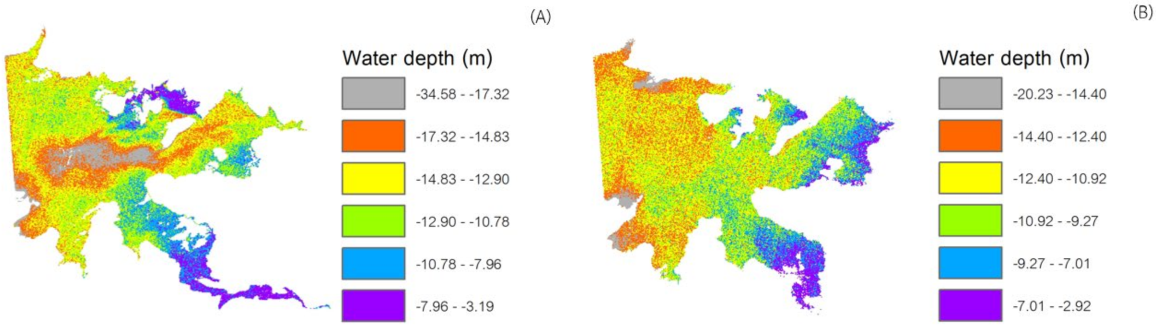


Fig. 5 Water depth distribution map after adjustment factor: (A) 18 Oct. 2022; (B) 28 Dec. 2019 from left to right, respectively

4) จากผลการคำนวณปริมาตรน้ำที่ไม่ผ่านการปรับแก้ 3,203 ล้านลูกบาศก์เมตร ในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 8,801 ล้านลูกบาศก์เมตร ในวันที่ 28 ธันวาคม 2562

Table 5 Statistics of reservoir Volume before adjustment factor

Sentinel-2 images	Mean (Million cu.b.)	MIN (Million cu.b.)	MAX (Million cu.b.)	Standard deviation
18/10/2565	46,747.2823	-2,433.3386	149,217.1093	24,024.3546
28/12/2562	133,497.1343	0	281,198.7187	76,168.8926

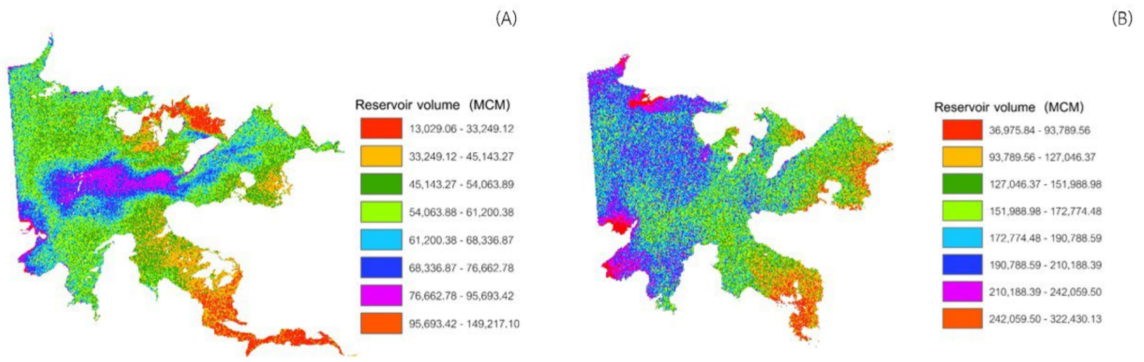


Fig. 6 Volume of Naruebodindrachinda reservoir before adjustment factor (Million cubic meters): (A) 18 Oct. 2022; (B) 28 Dec. 2019 from left to right, respectively

5) ปริมาตรน้ำรวมที่ผ่านการปรับแก้ลดลงเป็น 297.0600 ล้านลูกบาศก์เมตร ในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 220.9700 ล้านลูกบาศก์เมตร ในวันที่ 28 ธันวาคม 2562 พบว่าปัจจัยตัวคูณค่อนข้างประเมินได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.2000, 0.0390 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ตรวจวัดจริงของกรมชลประทาน 296.86 ในวันที่ 18 ตุลาคม 2565 และ 220.96 ล้านลูกบาศก์เมตร ในวันที่ 28 ธันวาคม 2562 โดยค่าต่างของปริมาตรน้ำที่ได้จากการคำนวณ กับกรมชลประทาน มีค่า error โดยประมาณ จากวิธีการตรวจวัดของกรมชลประทานในการอ่านค่าไม้ระดับ (Staff gauge) ทั้งนี้ในงานวิจัยยังไม่มีค่าที่เหมาะสมสำหรับอ่างเก็บน้ำโดยเฉพาะ

Table 6 Statistics of reservoir Volume after adjustment factor

Sentinel-2 images	Mean (Million cu.b.)	MIN (Million cu.b.)	MAX (Million cu.b.)	Standard deviation
18/10/2565	4,046.6773	0	11,088.1181	2,306.2682
28/12/2562	3,350.7780	0	7,058.0878	1,911.8392

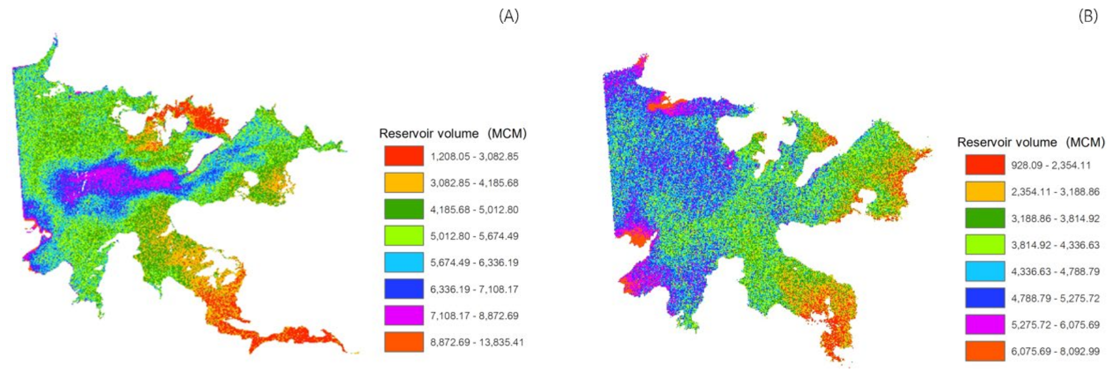


Fig. 7 Volume of Naruebodindrachinda reservoir after adjustment factor (Million cubic meters): (A) 18 Oct. 2022; (B) 28 Dec. 2019 from left to right, respectively

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการนำเทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลมาประยุกต์ใช้ในการประเมินความลึกท้องน้ำของอ่างเก็บน้ำ จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ร่วมกับวิธีการ SDB และแบบจำลองอัตราส่วนช่วงคลื่น (Log-Band Ratio Method) (ชนัตถพงศ์ และคณะ, 2565) โดยการพัฒนาค่าปรับแก้ จากการต่อยอด Equation 3 ซึ่งค่าปรับแก้นี้เป็นค่าสังเกตเฉพาะเวลาเพื่อทดสอบสมมุติฐานในการปรับปรุง Equation 3 เท่านั้น การวิจัยหาค่าปรับแก้ที่เหมาะสมต่อไปจะต้องทำการศึกษาโดยเพิ่มจำนวนตัวอย่าง และระยะเวลาให้ครอบคลุมทุกฤดูกาล เพื่อสังเกตค่าทางสถิติ และพิจารณาค่าปรับแก้แบบค่าคงที่ต่อไป โดยแนวทางการคำนวนค่าปรับแก้จากงานวิจัยนี้ ทำให้การคำนวณปริมาตรรายจุดภาพ แล้วคำนวณผลรวมเป็นปริมาตรน้ำทั้งอ่างฯ มีปริมาตรใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณโดยประมาณของกรมชลประทาน แต่วิธีการคำนวณด้วยจุดภาพข้อมูลจากภาพถ่ายจากดาวเทียม ยังสามารถให้ข้อมูลประกอบที่สำคัญคือความลึกของท้องน้ำอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้แบบอื่น เช่น การประเมินปริมาตรน้ำในพื้นที่น้ำท่วมได้ และสามารถประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นๆ ได้ ซึ่งใช้งบประมาณต่ำ ใช้บุคลากรน้อย และรวดเร็วในการดำเนินการสำรวจเมื่อเปรียบเทียบกับการสำรวจหยั่งน้ำด้วยเสียง อันจะช่วยพัฒนาการสำรวจให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จะก่อเกิดประโยชน์กับการบริหารจัดการน้ำ และติดตามปริมาตรน้ำในอ่างของกรมชลประทานในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ชนัตถพงศ์ เสืองามเอี่ยม. 2565. การหยั่งความลึกน้ำทะเลจากการรับรู้ระยะไกลในอ่าวไทยด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท 8. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5: 121–135.

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, G., Li, W., Li, X. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. Remote Sens. 8: 354. doi.org/10.3390/rs8040354

Stumpf, R., Holderied, K., Sinclair, M. 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. Limnol. Oceanogr. 48: 547–556. doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547

Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. Int. J. Remote Sens. 27: 3025-3033. doi.org/10.1080/01431160600589179

การศึกษาปริมาณความต้องการใช้น้ำของมะพร้าวที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศ (Climate change): กรณีศึกษาพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาดำเนินสะดวก

A study of climate change impact on irrigation water requirement. The case study of Damnoen Saduak Operation and Maintenance Project.

ธีรภัทร อรุณวงศ์*, สรวิศ สุภเวชย์

Teerapat Arunwong*, Sorawich Suphawach

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civill Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail adress: teerapat.charoe@ku.th

บทคัดย่อ

ภาวะโลกร้อน (Global Warming) เกิดจากการที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศบนโลกสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอากาศใกล้ผิวโลก หรือน้ำในมหาสมุทร อันเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ที่ทำให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) ในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นจนก่อเกิดเป็นภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) สาเหตุสำคัญของวิกฤติการณ์โลกร้อนที่เรากำลังเผชิญอยู่ในปัจจุบัน จากการคาดการณ์โดยใช้ RCM สภาพอากาศในอนาคตมีการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะอุณหภูมิและปริมาณฝนส่งผลโดยตรงแก่ความต้องการใช้น้ำของพืช เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวงานวิจัยนี้จัดทำเพื่อประเมินว่า สภาพอากาศรวมถึงความต้องการใช้น้ำของพืชในอนาคตเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด รวมถึงมาตรการเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว ให้สามารถเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป ผลการศึกษาคือปริมาณความต้องการใช้น้ำของพืชที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศ, แบบจำลองภูมิอากาศภูมิภาค, ภาวะโลกร้อน

Abstract

Global warming is caused by the increase in the average temperature of the air on Earth. Whether the air is close to the earth's surface or ocean water this causes climate change as a result of human activities that increase the amount of greenhouse gases in the atmosphere. Until causing a greenhouse Effect. A major cause of the global warming crisis that we are facing today. From the case where RCM is deposited, as a result, the crop water requirement will be impacted directly from the change Take the water foreshadowing any event including measures to exclude it to continue to compete with competitors. The result of the study is that the amount of water demand of plants has been found to increase compared to the current situation. Therefore, it is necessary to find ways to reduce such impacts.

Keywords: Climate change, Global warming, Regional climates models

คำนำ

ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของระบบภูมิอากาศ เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ต่างๆ ทั่วโลก (เจียมใจ, 2553) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากปริมาณการใช้น้ำของพืชหรือค่าการคายระเหยของพืชขึ้นอยู่กับปัจจัยของระบบภูมิอากาศเป็นสำคัญ ดังนั้นสภาวะโลกร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในอดีต ปัจจุบัน และในอนาคตย่อมส่งผลต่อสถานการณ์น้ำโดยเฉพาะน้ำเพื่อการเกษตรกรรม ซึ่งร้อยละ 70 ของแหล่งน้ำจืดทั่วโลกเป็นแหล่งน้ำที่ใช้ในด้านการเกษตรกรรม เมื่อเกิดสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงทำให้ผลผลิตทางการเกษตรไม่ได้ผลลัพธ์อย่างที่ควร เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ฝนที่ตกน้อยลง และผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนคือ ภัยแล้ง ที่มาเร็วกว่าปกติ เมื่อผลผลิตขาดแคลนก็จะทำให้การส่งออกผลผลิตทางการเกษตรภายในประเทศและต่างประเทศได้รับผลกระทบไปด้วย

การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่การการศึกษาปริมาณความต้องการใช้น้ำของพืชที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศ (Climate change) โดยนำผลการพยากรณ์จากแบบจำลอง RCM มาเปรียบเทียบกับข้อมูลในพื้นที่โครงการฯ รวมถึงวิเคราะห์ความต้องการใช้น้ำของพืชได้แก่ มะพร้าวซึ่งเป็นพืชที่ปลูกเป็นวงกว้างในพื้นที่ โดยใช้โปรแกรม CROPWAT เพื่อเสนอแนวทางเพื่อลดผลกระทบผลจากภาวะสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาดำเนินสะดวก เป็นเป็นโครงการชลประทานประเภทเก็บกักน้ำ ระบายน้ำ และป้องกันน้ำเค็ม ในสังกัดกรมชลประทาน สำนักชลประทานที่ 13 ทำหน้าที่ในการส่งน้ำเพื่อการเกษตร การอุปโภค-บริโภค และบำรุงรักษาอาคารชลประทานในเขตของโครงการฯ พื้นที่ของโครงการตั้งอยู่ในเขตระหว่าง 2 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำแม่กลอง และลุ่มน้ำท่าจีน มีพื้นที่ชลประทาน (IRRGATION AREA) 125,500 ไร่ ซึ่งร้อยละ 66% ของพืชที่ปลูกภายในพื้นที่ชลประทานของโครงการฯ คือ มะพร้าว

Fig. 1 Area of case study

วิธีการศึกษา

กรอบความคิดในการศึกษา

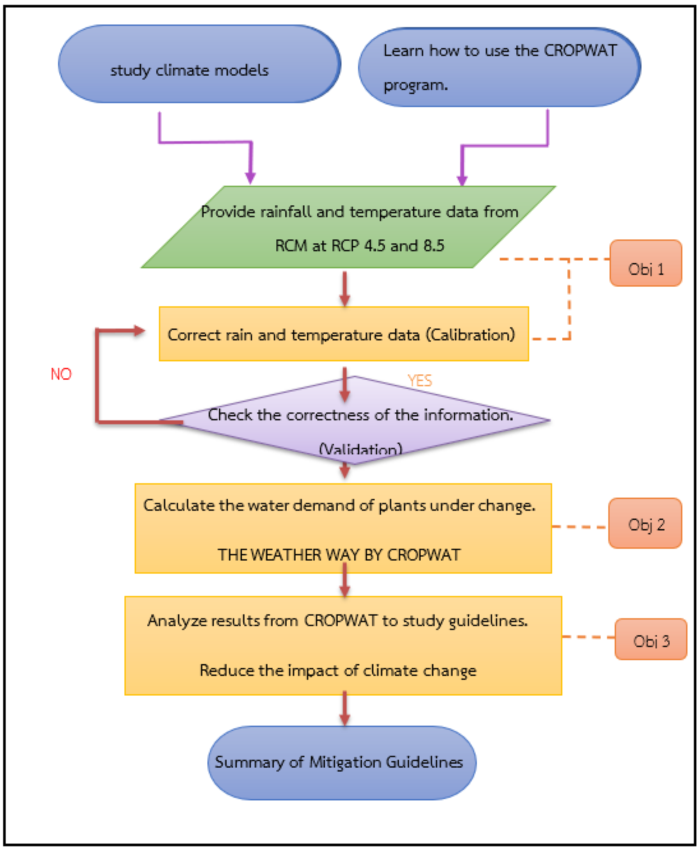


Fig. 2 Protocol

ขั้นตอนการศึกษาความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลองภูมิอากาศภูมิภาค RCMS (Regional Climates Models) ในการพยากรณ์ความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ (Climate change) ซึ่งเป็นโมเดลที่ สถาบัน/หน่วยงาน เช่น ACCESS (Australian Community Climate and Earth System Simulation), MPI (Max Planck Institute), CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับการพยากรณ์ความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศให้มีความเหมาะสมและแม่นยำขึ้นในการวิเคราะห์สภาพอากาศในเชิงพื้นที่ โดยการพยากรณ์ของโมเดลจะใช้วิธีการ linear regression method ในการปรับแก้ (Calibrate) ความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ซึ่งแบบจำลอง RCM เป็นแบบจำลองที่ถูกลดขนาดมาจาก แบบจำลองสภาพอากาศของโลก (Global Climate Model : GCM) จึงมีความละเอียดแม่นยาและสอดคล้องกับภูมิประเทศมากกว่า โดยจะใช้ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ 3 วิธี ของRCM คือ ACCESS ,MPI, CNRM

เส้นตัวแทนความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ RCP (Representative Concentration Pathways) (รพีพัฒน์, 2562) เป็นศัพท์เทคนิคหมายถึงฉากทัศน์การปล่อยแก๊สเรือนกระจกซึ่งใช้ในรายงานการประเมินฉบับที่ 5 ของไอพีซีซี โดยแบ่งออกเป็น 4 สถานการณ์คือ RCP2.6 RCP4.5 RCP6 และ RCP8.5 สะท้อนระดับการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สี่ระดับซึ่งเป็นผลลัพธ์ของนโยบายรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระหว่าง ค.ศ. 2000 ถึง

2100 ในการศึกษาครั้งนี้ เลือกศึกษาที่สถานการณ์ RCP4.5 และ RCP8.5 เนื่องจาก RCP4.5 เป็นกรณีที่ใกล้เคียงกับสภาวะการณ์ปัจจุบันที่สุด และ RCP8.5 เป็นกรณีที่ร้ายแรงที่สุด

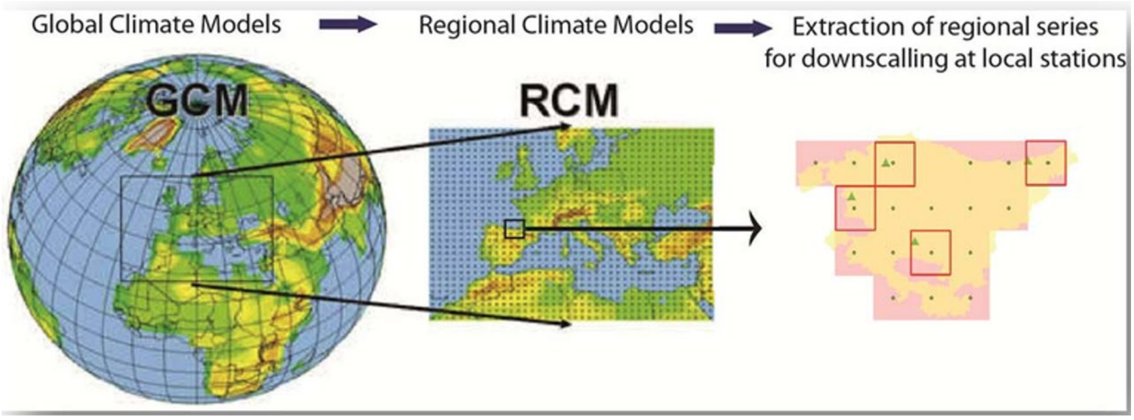


Fig. 3 Global climate models

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชด้วยโปรแกรม CROPWAT

CROPWAT 8.0 เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาโดย FAO เพื่อใช้สำหรับคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชและความต้องการน้ำชลประทานโดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศและพืช นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถจัดทำกำหนดการให้น้ำชลประทาน สำหรับพืชที่มีแบบแผนการเพาะปลูกต่างๆ กัน โดยมีสมการที่ต้องใช้ดังต่อไปนี้

1. ค่าการคายระเหยอ้างอิง (Reference Evapotranspiration, ETo) ด้วยสมการ Penman-Monteith ซึ่งเป็นสมการมาตรฐานสาหรับการหาค่าการคายระเหยอ้างอิง (Allen et al., 1998) โดยหลักการคำนวณพิจารณาจากผลของรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพภูมิอากาศโดยรอบหน่วยเป็น (มม./วัน) ตาม Equation 1

$$ETo = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{(T+273)}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \qquad (1)$$

2. ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc) ในกรณีศึกษานี้คือ มะพร้าว ซึ่งเป็นข้อมูลจากกรมชลประทาน (2555) โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะพร้าวตามช่วงอายุการเจริญเติบโต ซึ่งมะพร้าว มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ สูงที่สุดตลอดอายุการเจริญเติบโต มีค่าเท่ากับ 0.73 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะพร้าวเฉลี่ยตลอดช่วงอายุของการเจริญเติบโต พบว่า มะพร้าว มีค่าเท่ากับ 0.54, 0.73 และ 0.65 ตามลำดับ

3. การคายระเหยของมะพร้าว (Crop Evapotranspiration, ETc) คำนวณได้จากค่าการคายระเหยอ้างอิง (ETo) และสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะพร้าว (Kc) ซึ่งพิจารณาตามช่วงเวลาการคายระเหยของมะพร้าวในแต่ละช่วงอายุ ตาม Equation 2

$$ETc = Ks \times Kc \times ETo \qquad (2)$$

เมื่อ ETc คือ ค่าการคายระเหยของมะพร้าว (มม./วัน), Ks คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ปริมาณการใช้น้ำ โดยการศึกษานี้พิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 1 มม. เนื่องจากพื้นที่ศึกษาอยู่ในเขตพื้นที่ชลประทาน มีความชุ่มชื้น ไม่อยู่ในสภาวะขาดน้ำ, Kc คือ สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะพร้าว และ ETo คือ ค่าการคายระเหยอ้างอิง (มม./วัน)

ข้อมูลภูมิอากาศที่ต้องใช้

1. ข้อมูลสภาพอากาศ (Climate data) อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด เฉลี่ยรายปี, ลม, ความชื้น, ปริมาณแดด, จากสถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี

2. ข้อมูลฝน (Rain data) ปริมาณฝนเฉลี่ยรวมรายปี, จากสถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี

3. ข้อมูลพืช (Crop data) ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc), จากกรมชลประทาน

4. ข้อมูลดิน (Soil data) ประเภทของดินในพื้นที่ศึกษา

ต่อมาเป็นขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิต่ำสุด และ อุณหภูมิสูงสุด ย้อนหลังจากสถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี โดยเก็บข้อมูลภูมิอากาศย้อนหลังในอดีต 25 ปี (ค.ศ. 1994–2019) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี มาจัดแจงค่าเพื่อที่จะนำข้อมูลที่จัดแจงค่าแล้วไปใช้ใน RCM ต่อไป

Table 1 Table of data from the Thai Meteorological Department that has been sorted out

Month	Precipitation (mm)	Temperature max	Temperature min
1	3.9	32.1	20.3
2	6.5	33.9	21.7
3	31.2	35.2	23.7
4	43.5	36.5	25.0
5	159.9	34.9	25.4
6	137.0	33.8	25.2
7	123.2	33.2	24.8
8	108.0	33.1	24.9
9	229.6	32.8	24.6
10	226.1	31.8	24.3
11	62.3	31.3	23.0
12	7.2	30.7	20.6

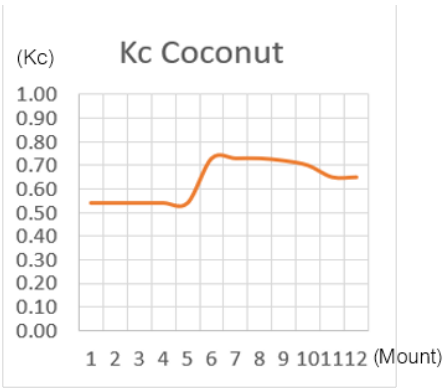
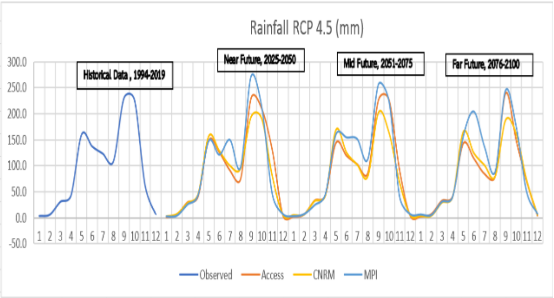


Fig. 4 Kc of Coconut

ผลและวิจารณ์การศึกษา

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศ

นำผลการพยากรณ์จากแบบจำลอง RCM มาเปรียบเทียบกับข้อมูลในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาดำเนินสะดวก โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในช่วงอดีต 25 ปี (ค.ศ. 1994–2019) และอนาคต 75 ปี (ค.ศ. 2025–2100) โดยแบ่งค่าผลของการพยากรณ์ออกเป็นสามช่วง คือ Near Future(ค.ศ. 2025–2050), Mid Future (ค.ศ. 2051–2075) , Far Future(ค.ศ. 2076–2100 พบว่าค่าฝนเฉลี่ยรวมรายปีมีแนวโน้มลดลง และ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดเฉลี่ยรายปี มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับ Historical ส่งผลทำให้ค่าความต้องการใช้น้ำของมะพร้าวสูงขึ้น



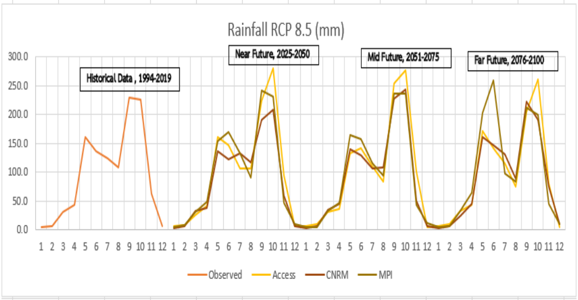


Fig. 5 and Fig. 6 Comparison graph of the rainfall data from the measurement and from the results of the RCM model after error correction in the case of RCP 4.5 and RCP 8.5

Table 2 Comparison Table of the rainfall data from the measurement and from the results of the RCM model after error correction in the case of RCP 4.5 and RCP 8.5

Month	Historical	Near (2025-2050)	Mid (2051-2075)	Far (2076-2100)
RCM	RCP 4.5	Access (mm)		
1	3.9	1.6	2.9	3.3
2	6.5	6.4	7.1	7.8
3	31.2	30.2	33.9	33.5
4	43.5	41.5	43.3	41.7
5	159.9	148.4	143.9	142.7
6	137.0	126.0	119.2	114.3
7	123.2	91.4	103.2	84.8
8	108.0	74.4	85.8	79.4
9	229.6	229.6	225.6	239.0
10	226.1	209.3	226.4	148.5
11	62.3	129.4	91.7	69.1
12	7.2	5.0	4.6	4.8
Month	Historical	Near (2025-2050)	Mid (2051-2075)	Far (2076-2100)
RCM	RCP 4.5	CNRM (mm)		
1	3.9	3.1	5.3	4.1
2	6.5	7.5	6.8	4.3
3	31.2	28.6	32.7	29.7
4	43.5	45.8	43.2	40.1
5	159.9	157.4	169.5	165.6
6	137.0	129.1	125.6	124.8
7	123.2	100.6	102.3	101.6
8	108.0	95.1	79.6	79.4
9	229.6	194.7	202.5	188.5
10	226.1	191.0	164.0	161.4
11	62.3	79.8	68.3	71.3
12	7.2	5.8	5.5	6.3
Month	Historical	Near (2025-2050)	Mid (2051-2075)	Far (2076-2100)
RCM	RCP 4.5	MPI (mm)		
1	3.9	2.2	2.8	6.0
2	6.5	3.9	6.9	5.2
3	31.2	25.2	24.4	30.6
4	43.5	43.2	44.9	40.0
5	159.9	147.5	160.1	155.5
6	137.0	121.0	154.0	203.8
7	123.2	149.5	151.2	136.7
8	108.0	96.4	112.1	87.6
9	229.6	271.7	255.9	244.8
10	226.1	212.5	223.8	174.3
11	62.3	44.4	40.3	47.9
12	7.2	6.8	6.7	7.5

Month	Historical	Near (2025-2050)	Mid (2051-2075)	Far (2076-2100)
RCM	RCP 8.5	Access (mm)		
1	3.9	6.2	6.3	6.7
2	6.5	7.6	9.5	10.2
3	31.2	25.8	31.4	32.6
4	43.5	41.1	36.4	42.9
5	159.9	161.3	133.0	170.3
6	137.0	147.2	140.9	140.8
7	123.2	107.1	109.5	114.9
8	108.0	106.6	83.9	74.7
9	229.6	223.0	253.4	204.6
10	226.1	280.3	276.0	260.5
11	62.3	94.0	100.5	80.8
12	7.2	6.5	5.3	5.4
Month	Historical	Near (2025-2050)	Mid (2051-2075)	Far (2076-2100)
RCM	RCP 8.5	CNRM (mm)		
1	3.9	3.3	2.1	2.5
2	6.5	6.3	6.5	5.7
3	31.2	31.8	33.8	23.8
4	43.5	38.2	45.0	45.8
5	159.9	136.2	139.3	159.9
6	137.0	122.7	129.8	146.6
7	123.2	131.9	106.8	130.1
8	108.0	116.7	108.5	88.4
9	229.6	190.6	227.1	222.6
10	226.1	207.3	243.9	190.7
11	62.3	58.5	49.8	73.9
12	7.2	5.6	6.6	9.2
Month	Historical	Near (2025-2050)	Mid (2051-2075)	Far (2076-2100)
RCM	RCP 8.5	MPI (mm)		
1	3.9	4.3	4.6	4.8
2	6.5	7.3	5.1	5.6
3	31.2	31.7	32.4	33.5
4	43.5	48.1	46.3	63.5
5	159.9	153.3	163.5	203.0
6	137.0	169.6	157.7	258.2
7	123.2	131.9	114.4	97.1
8	108.0	90.5	94.7	84.1
9	229.6	241.9	235.4	211.0
10	226.1	231.4	235.5	198.7
11	62.3	46.6	44.0	44.6
12	7.2	10.5	11.4	9.2

Table 3 Comparison table of maximum-minimum temperature data from the measurements and from the results of the RCM model after tolerance correction in the case of RCP 4.5 and RCP 8.5

Month	Historical		Near (2025-2050)		Mid (2051-2075)		Far (2076-2100)	
RCM	RCP 4.5		Access (°C)					
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	32.1	20.3	32.9	20.6	33.5	21.2	32.8	21.4
2	33.9	21.7	34.6	22.1	35.0	23.1	36.8	23.8
3	35.2	23.7	36.2	24.3	36.6	24.9	37.2	25.2
4	36.5	25.0	37.3	25.7	37.6	26.2	37.9	26.8
5	34.9	25.4	35.6	26.1	35.8	26.6	36.5	26.8
6	33.8	25.2	34.8	25.9	35.1	26.4	35.2	26.6
7	33.2	24.8	34.8	25.7	34.6	26.2	35.5	26.4
8	33.1	24.9	34.9	25.7	34.8	26.2	34.0	26.3
9	32.8	24.6	34.0	25.6	34.1	26.0	33.7	26.5
10	31.8	24.3	33.2	25.4	33.4	25.8	32.6	26.1
11	31.3	23.0	32.5	24.3	32.8	24.8	32.5	25.0
12	30.7	20.6	31.6	21.6	32.1	22.1	32.0	22.5

Month	Historical		Near (2025-2050)		Mid (2051-2075)		Far (2076-2100)	
RCM	RCP 4.5		CNRM (°C)					
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	32.1	20.3	32.5	20.9	32.9	21.0	33.4	21.4
2	33.9	21.7	34.5	21.9	34.7	22.0	35.5	22.4
3	35.2	23.7	35.8	24.2	35.8	24.4	36.4	24.7
4	36.5	25.0	36.7	25.4	36.8	25.9	37.1	26.1
5	34.9	25.4	35.0	25.8	35.2	26.3	35.8	26.6
6	33.8	25.2	34.3	25.6	34.4	26.0	35.1	26.3
7	33.2	24.8	33.9	25.4	34.0	25.6	34.1	26.1
8	33.1	24.9	33.9	25.3	34.7	25.8	34.8	26.1
9	32.8	24.6	33.5	25.3	33.9	25.8	34.1	25.9
10	31.8	24.3	33.2	25.6	33.3	25.9	33.5	26.2
11	31.3	23.0	32.3	24.3	32.4	24.1	32.9	24.6
12	30.7	20.6	31.7	21.5	32.4	22.5	32.7	22.5

Month	Historical		Near (2025-2050)		Mid (2051-2075)		Far (2076-2100)	
RCM	RCP 4.5		MPI (°C)					
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	32.1	20.3	32.9	20.8	33.5	21.1	33.5	21.8
2	33.9	21.7	34.6	21.9	34.7	22.4	35.1	22.3
3	35.2	23.7	35.9	24.3	36.5	24.8	36.5	24.9
4	36.5	25.0	37.4	25.6	37.9	26.2	37.9	26.5
5	34.9	25.4	35.7	26.2	36.1	26.7	36.3	26.8
6	33.8	25.2	34.6	26.0	34.7	26.4	35.0	26.5
7	33.2	24.8	34.1	25.6	34.0	26.0	34.4	26.1
8	33.1	24.9	34.1	25.5	34.4	25.9	34.8	26.3
9	32.8	24.6	33.4	25.4	34.1	25.8	34.1	26.2
10	31.8	24.3	32.5	24.8	33.2	25.2	33.1	25.7
11	31.3	23.0	32.2	23.5	32.9	24.1	33.0	24.2
12	30.7	20.6	32.0	21.8	32.3	21.7	32.6	21.8

Month	Historical		Near (2025-2050)		Mid (2051-2075)		Far (2076-2100)	
RCM	RCP 8.5		Access (°C)					
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	32.1	20.3	32.6	21.4	34.0	22.5	35.9	23.4
2	33.9	21.7	34.3	22.3	35.4	23.5	37.3	24.1
3	35.2	23.7	36.2	24.5	37.0	25.6	38.9	26.2
4	36.5	25.0	37.5	26.0	38.7	27.1	40.6	27.5
5	34.9	25.4	35.4	26.3	36.8	27.5	38.7	27.8
6	33.8	25.2	34.5	26.1	35.8	27.3	37.7	27.6
7	33.2	24.8	34.0	26.0	35.2	27.0	37.1	27.4
8	33.1	24.9	34.2	26.0	35.3	27.1	37.2	27.3
9	32.8	24.6	34.0	25.8	34.8	26.9	36.7	27.3
10	31.8	24.3	32.7	25.9	33.9	26.8	35.8	27.2
11	31.3	23.0	32.3	24.4	33.6	25.3	35.5	26.1
12	30.7	20.6	31.6	21.8	32.7	22.8	34.6	23.7

Month	Historical		Near (2025-2050)		Mid (2051-2075)		Far (2076-2100)	
RCM	RCP 8.5		CNRM (°C)					
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	32.1	20.3	32.9	20.8	34.0	21.4	34.8	22.6
2	33.9	21.7	34.4	21.8	35.6	23.0	36.4	23.8
3	35.2	23.7	35.9	24.3	36.5	25.1	38.0	26.1
4	36.5	25.0	37.3	25.5	37.6	26.3	38.8	27.4
5	34.9	25.4	35.8	26.1	36.4	26.9	37.4	28.0
6	33.8	25.2	34.6	25.9	35.4	26.6	36.3	27.6
7	33.2	24.8	33.8	25.7	35.0	26.3	35.7	27.3
8	33.1	24.9	33.8	25.4	35.2	26.3	36.4	27.3
9	32.8	24.6	33.6	25.4	34.5	26.4	35.6	27.4
10	31.8	24.3	32.7	25.1	33.6	26.0	35.0	27.0
11	31.3	23.0	32.4	24.0	33.6	24.9	34.7	26.6
12	30.7	20.6	31.6	21.5	32.7	22.4	33.7	24.2

Month	Historical		Near (2025-2050)		Mid (2051-2075)		Far (2076-2100)	
RCM	RCP 8.5		MPI (°C)					
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	32.1	20.3	33.2	21.2	33.9	21.6	34.2	21.7
2	33.9	21.7	34.3	22.4	35.4	23.1	35.9	23.9
3	35.2	23.7	36.0	24.3	37.1	25.3	37.3	23.3
4	36.5	25.0	37.2	25.8	38.3	27.0	38.5	27.3
5	34.9	25.4	35.7	26.5	36.8	27.5	32.6	27.8
6	33.8	25.2	34.3	26.1	35.4	27.1	35.6	27.9
7	33.2	24.8	34.1	25.6	34.9	26.5	35.3	27.1
8	33.1	24.9	34.5	25.8	35.8	26.6	36.4	26.7
9	32.8	24.6	33.7	25.7	34.8	26.6	35.5	26.8
10	31.8	24.3	32.7	25.1	33.9	26.0	34.2	27.4
11	31.3	23.0	32.5	24.2	33.8	25.0	34.3	25.9
12	30.7	20.6	31.7	21.7	32.8	22.8	33.6	23.6

สรุป

จากการคำนวณความต้องการใช้น้ำของมะพร้าวที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพอากาศ ของ 3 ฐานข้อมูลแบบจำลอง ได้แก่ ACCESS, CNRM และMPI โดยโปรแกรม CROPWAT โดยแบ่งช่วงเวลาของการศึกษา (ค.ศ.1994–ค.ศ. 2019) เป็นปีฐาน และช่วงปีในอนาคตแบ่งเป็น 3 ช่วงคืออนาคตอันใกล้ (ค.ศ. 2025–ค.ศ.2050), อนาคตช่วงกลาง (ค.ศ.2051–ค.ศ. 2075) และอนาคตอันไกล (ค.ศ. 2076–ค.ศ. 2100)

Table 4 Comparison table of information on water demand of coconuts

Irr. Req. (mm/dec)	Historical (1994-2019)	Near 4.5 (2025-2050)	Mid 4.5 (2051-2075)	Far 4.5 (2076-2100)	Near 8.5 (2025-2050)	Mid 8.5 (2051-2075)	Far 8.5 (2076-2100)
Access	346.7	378 (+9.0%)	367.9 (+6.1%)	398.1 (+14.8%)	349.8 (+0.9%)	379.3 (+9.4%)	417.9 (+20.5%)
CNRM	346.7	357.3 (+3.0%)	373.5 (+7.7%)	383.8 (+10.7%)	360.5 (+4.0%)	381.1 (+9.9%)	387.8 (+11.8%)
MPI	346.7	385.9 (+11.3%)	381.9 (+10.1%)	386.3 (+11.4%)	370.5 (+6.8%)	388.4 (+12.0%)	399.1 (+15.1%)

จะเห็นได้ว่าในอนาคตปริมาณความต้องการใช้น้ำของมะพร้าวเพิ่มขึ้นทุกช่วงเวลาเมื่อเทียบกับปีฐาน ตามลำดับความรุนแรง หากคิดพื้นที่เพาะปลูก 82,830 ไร่ = 132,528,000 ตร.ม.ปริมาณความต้องการใช้น้ำปัจจุบันจะเป็น 1,677 ล้าน ลบ.ม./ปี และเพิ่มขึ้นเป็น 2,012 ล้านลบ.ม./ปี, 2,415ล้าน ลบ.ม./ปี, 2,898ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ หรือคิดเป็น 20%/ ปี ทำให้จำเป็นต้องมีมาตรการในการลดผลกระทบดังกล่าวดังต่อไปนี้ 1. การดาดคอนกรีตคลองภายในพื้นที่ของโครงการฯเนื่องจากปัจจุบันโครงการฯส่งน้ำอยู่ที่ 3,082 ล้าน ลบ.ม./ปี แต่ประสิทธิภาพคลองชลประทานอยู่ที่ 60% เนื่องจากเป็นคลองดิน ปริมาณน้ำที่ส่งถึงแปลงจึงเหลือเพียง 1,849ล้าน ลบ.ม./ปี หากดาดคอนกรีตคลองจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพคลองชลประทานได้อีก 40% คิดเป็น 1,232 ล้าน ลบ.ม./ปี ทำให้สามารถส่งน้ำได้คลอบคลุมกับปริมาณความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้น 2. ปรับปรุงปตร.บางนกแขวกที่รับน้ำจากแม่น้ำแม่กลองซึ่งปัจจุบันมีช่องรับน้ำ 2 ช่อง หากปรับปรุงให้เป็น 4 ช่อง จะทำให้สามารถรับน้ำได้มากขึ้น 3. สร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งตลอดแนวคลองเพื่อเพิ่มศักยภาพในการรับน้ำของคลองให้มากขึ้นและเพื่อป้องกันการกัดเซาะของน้ำตลอดแนวริมตลิ่ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สรวิศ สุภเวชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ให้ความรู้ แนะแนวทางในการศึกษา รวมถึงสละเวลาช่วยเหลือ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้การวิจัยเล่มนี้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณนายปัณณวิชญ์ เฟืองทอง อาจารย์จากวิทยาลัยการชลประทาน ที่ได้ให้ความรู้ ได้สละเวลาช่วยเหลือ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นให้การวิจัยเล่มนี้มีความสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

รพีพัฒน์ อิงคสิทธิ์. 2562. เส้นตัวแทนความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Representative Concentration Pathways, RCP). http://www.salforest.com/blog/climate-model-rcp-ssp, 28 มกราคม 2565.

เจียมใจ เครือสุวรรณ. 2553. การจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสำหรับประเทศไทยด้วยแบบจำลองภูมิอากาศ MM5. (Climate change Model MM5). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพฯ.

การศึกษาการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำโดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์

The study of the movement of floating solar cells using synthetic aperture radar satellite imagery

<u>กิตติภพ สิมะโชคชัย</u>*, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์

<u>Kittiphop Simachokchai</u>*, Anuphao Aobpaet, Soravis Supavetch

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kittiphop.si@ku.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีรับรู้ระยะไกลใช้ในการติดตามการเคลื่อนตัวของสิ่งปกคลุมโดยจำแนกสิ่งปกคลุมพื้นที่ที่อยู่บนพื้นผิวโลกและสังเกตการเปลี่ยนแปลงสิ่งปกคลุมดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับการใช้ติดตามโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาทิศทางการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำโดยใช้ข้อมูลชนิดเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) จากดาวเทียม Sentinel-1 ที่บันทึกในระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2564 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565จำนวน 14 ภาพ ที่มีความละเอียด 10*10 เมตร มาตรวจจับการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำซึ่งวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ข้อมูลชนิดเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์หลายนั้นสามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำที่มีการเคลื่อนตัวได้อย่างชัดเจนและสามารถระบุตำแหน่งของทิศทางการเคลื่อนตัว ดังนั้นการใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมสามารถติดตามการเคลื่อนตัวของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำได้โดยผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการติดตามการเคลื่อนตัวการศึกษาพื้นที่บริเวณกว้างและสามารถสำรวจบริเวณพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้อย่างสะดวกมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การเคลื่อนตัว, โซลาร์เซลล์ลอยน้ำ, ภาพถ่ายจากดาวเทียม

Abstract

Remote sensing technology is currently utilised to monitor the movement of the surface. It detects land cover on the Earth's surface and monitors changes in the land cover through an efficient and quick direction. As a result, it is appropriate for floating solar monitoring. This research aims to investigate the movement of floating solar using synthetic aperture radar (SAR) data from Ssentinel-1 satellites. Fourteen images were collected between July 2021 and August 2022. A resolution of 10 * 10 meters, detecting the floating solar and analysing the movement of floating solar. The results displayed that it was feasible to accurately observe the change and direction of the floating solar with the movement of the floating solar utilising time-Series synthetic aperture radar type data. The Study of the movement of floating solar cells using Synthetic Aperture Radar satellite imagery conclusion is to be able to watch the movement of floating solar. The findings can be used to detect the movement of large region and more effectively explore unfavorable locations.

Keywords: Floating solar, Monitor, Satellite images

คำนำ

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจาก Floating Solar หรือโซลาร์เซลล์ลอยน้ำถือเป็นที่ยอมรับในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่หลายประเทศและรวมถึงประเทศไทยนำแผงโซลาร์เซลล์และระบบผลิตไฟฟ้ามารวมกันและอยู่บนผิวน้ำ (Kakaew, 2020) โดยไม่มีผลกระทบต่อระบบผลิตกระแสไฟฟ้า แหล่งน้ำที่เหมาะแก่การนำไปติดตั้ง ได้แก่ อ่างเก็บน้ำ เขื่อน หรือบ่อเก็บน้ำ วัสดุที่นำมาเป็นทุ่นลอยต้องสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและแรงลมได้ ประโยชน์อื่นของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ คือสามารถช่วยลดการระเหยของน้ำได้ ซึ่งเหมาะสมกับเขื่อนที่ต้องการกักเก็บน้ำให้ได้ตลอดทั้งปี และการระเหยของน้ำยังช่วยลดอุณหภูมิใต้แผงโซลาร์เซลล์ ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ทำได้อย่างเต็มที่ เป็นการนำพื้นที่เหนือแหล่งน้ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์และลดการใช้พื้นที่ที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ได้

เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลสามารถเข้าถึงง่ายและมีความหลากหลายของข้อมูล ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ที่อยู่บนพื้นผิวโลกได้อย่างครอบคลุม ถูกต้อง และรวดเร็ว เทคโนโลยี Synthetic Aperture Radar (SAR) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีบทบาทมาก มีการประยุกต์ใช้ในด้านสิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ (Agency et al., 2020) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศ การเปลี่ยนแปลงของสิ่งปลูกสร้าง ความเสียหายจากภัยพิบัติ และติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ เป็นต้น

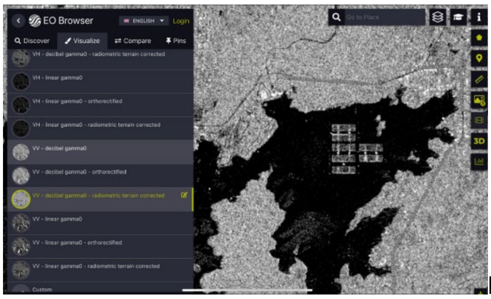
ดังนั้น ในการวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาทิศทางการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ (floating solar) ที่มีผลกระทบที่จะตามมาจากการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวโครงสร้างที่ยึด โดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar หรือ SAR) ภาพถ่ายจากดาวเทียมจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากมีราคาที่ถูกเมื่อเทียบกับการลงพื้นที่ตรวจสอบและยังมีระยะเวลาที่นาน ภาพถ่ายจากดาวเทียมสามารถทำการตรวจสอบได้บ่อยเท่าที่ต้องการตามการโคจรของดาวเทียม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทิศทางการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำโดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม

ข้อมูลและขั้นตอนการดำเนินวิจัย

ในการติดตามการเคลื่อนตัวของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำได้มีการใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม ที่เป็นที่นิยมใช้ในงานทางด้านการสำรวจและภูมิสารสนเทศที่มีการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ใช้ในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม sentinel-1 เป็นข้อมูล C-band (C-band Synthetic-Aperture Radar : C-SAR) มีคลื่นความถี่ 5.405 GHz ที่มีการบันทึกข้อมูลแบบระนาบคลื่น (polarization) แบบคู่ ในแนวนอน (horizontal) และแนวตั้ง (vertical) ในการส่งและรับสัญญาณ (ยุทธนา, 2563) เป็นข้อมูลที่รับการประมวลผล การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงรังสีและผ่านการแปลงเป็นข้อมูลที่มีหน่วยวัดเป็น decibel (Eosdataanalysis, 2022) โดยเลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมช่วงเวลา เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2565 สามารถโหลดข้อมูลได้จากเว็บไซต์ https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom ดัง Fig. 1



F

Source: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom

Fig. 1 website window https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom

การวิเคราะห์ข้อมูลเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ (Floating Solar) ประกอบด้วยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ (Floating Solar) โดยใช้เครื่องมือทางภูมิสารสนเทศมาเป็นตัวช่วยในการดำเนินโครงการ (Murashkin et al., 2018) และประมวลผลการดำเนินการให้เห็นภาพผลลัพธ์ที่ชัดเจน

ภาพถ่ายจากดาวเทียมที่สามารถทำการแปลงชนิดของข้อมูลที่มาเป็นข้อมูล vector โดยมีหลากหลายวิธีที่สามารถทำการแปลงได้ในที่นี้ใช้วิธี raster to polygon โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูล vector ที่มีตารางของข้อมูลด้านในผลลัพธ์เป็นข้อมูลที่มีค่าเป็น 1 และ 0 (Luo et al., 2014) ดังตัวอย่างผลลัพธ์ใน Fig. 2 สีชมพูจะแสดงผลลัพธ์เป็นข้อมูลที่มีค่าเป็น 1 และสีน้ำเงินจะแสดงผลลัพธ์เป็น 0 ก่อนเพื่อนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์หรือนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอื่นๆ นอกเหนือจากตัวโครงการวิจัยนี้ได้

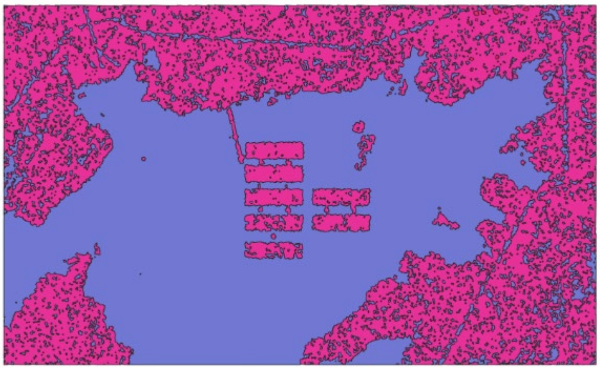


Fig. 2 output vector data from raster to polygon method

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำนั้นจะต้องใช่ข้อมูลบริเวณส่วนของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำเท่านั้นเพื่อหาการเคลื่อนที่ได้แม่นยำจึงต้องทำการเลือกเฉพาะส่วนที่ใช้การหาการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ออกมาจากข้อมูลที่ทำการแปลงข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมมาจากส่วนที่ไม่ได้ใช้ในการวิเคราะห์ออกจากกันในที่นี้ส่วนที่ไม่ได้ใช้ทำการวิเคราะห์คือส่วนของพื้นที่ที่เป็นบริเวณพื้นน้ำและส่วนที่เป็นบริเวณพื้นดินโดยรอบจึงจะใช้วิธีการเลือก polygon จากภาพที่มีค่าในตารางข้อมูลเป็น 1และอยู่ในบริเวณที่เป็นแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำแสดงตัวอย่างใน Fig. 3 ด้วยเครื่องมือ select (Costa et al., 2021)

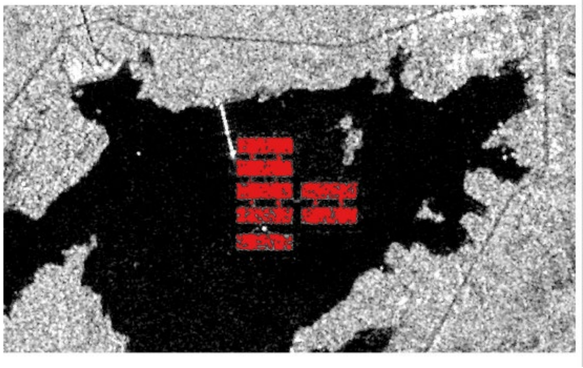


Fig. 3 The extracted data of the floating solar area

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำจะไม่ได้ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่จากจุดที่มุมใดมุมหนึ่งของแผงโซลาร์เซลล์หรือทั้งหมดของแผลงโซลาร์เซลล์แต่จะใช้จุดศูนย์กลางของแผงโซลาร์เซลล์แต่ละแผงส่วนที่แยกออกจากกันมาใช้ในการวิเคราะห์ในการหาการเคลื่อนที่ โดยจะใช้คำสั่งในการหาจุดศูนย์กลางของแต่ละแผงโซลาร์เซลล์เพื่อใช้ในการหาค่าของพิกัดทางภูมิศาสตร์ ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนแสดงใน Fig. 4

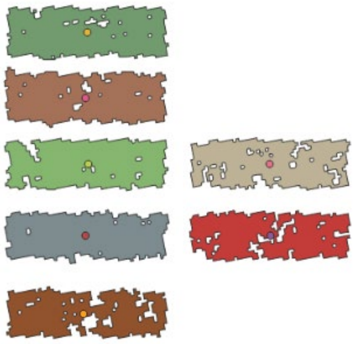


Fig. 4 The central position of the Floating Solar

หลังจากที่ได้จุดศูนย์กลางของแต่ละแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำแล้วเนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจะเป็นข้อมูลที่ยังไม่มีตารางข้อมูลของค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ จึงต้องเข้าไปสร้างข้อมูลของแต่ละจุดศูนย์กลางด้วยโปรงแกรม Qgis ในเครื่องมือ Add field ของข้อมูลที่แสดงผลเป็นตารางให้มีข้อมูลของค่าพิกัดภูมิศาสตร์ทั้งข้อมูลของแนวแกน x และแนวแกน y โดยสามารถใช้เครื่องมือ field calculator ในการที่จะสร้างตารางของข้อมูลที่เพิ่มขึ้นจากข้อมูลที่มีอยู่แล้ว

การสร้างตารางข้อมูลเริ่มจากต้องทราบว่าเราต้องการใช้งานข้อมูลอะไรบ้างและตัวข้อมูลที่มีอยู่แล้วมีข้อมูลอะไรบ้างเพื่อลดข้อมูลที่มี โดยสามารถเลือกชนิดของข้อมูลและหัวข้อของตารางได้ การหาค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ทั้งแกนแนว x และแนวแกน y สามารถเขียนสมการในการสั่งให้คอมพิวเตอร์คำนวณออกมาในรูปแบบตารางข้อมูลได้ จากการเขียนสมการในส่วน Expressions ดัง Equation 1

X * ($geometry) (1)

ผลที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์การติดตามการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำโดยเราจะดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม เดือนละหนึ่งวันในช่วงเวลา เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2564 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565 จะทำให้มีชุดข้อมูลของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำทั้งหมด 14 ชุด มาวิเคราะห์ที่การเคลื่อนในแต่ละเดือน

Table 1 Example x and y coordinates of the central position of the Floating Solar

Date	central Point	x	y
11/12/2021	1	547500.95725	1680454.85976
	2	547495.48767	1680236.98756
	3	547491.20829	1680016.41407
	4	547490.02952	1679780.66304
	5	547485.42946	1679522.17786
	6	548106.69980	1680018.73134
	7	548109.89553	1679777.41637

ผลการศึกษาวิจัย

Table 2 Results the movement of floating solar in July 2021–August 2022

Central Point	x	y
1	11.98110492	-2.96910997
2	10.83161145	-2.92551731
3	5.129988835	-1.24145001
4	14.89444312	-2.65423892
5	9.26298106	-0.67798527
6	12.9603422	-5.44716041
7	8.340179742	2.3585698

จากการศึกษาการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำในตลอดระยะยาวที่กินเวลา 1 ปี ผลปรากฏว่าพบการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางเดียวกันของทุกแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำโดยมีการเคลื่อนตัวไปในทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ดังที่ได้แสดงให้เห็นใน Fig. 5 จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในทุกๆเดือนเพื่อให้เห็นการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำที่มากยิ่งขึ้นจึงจะแสดงผลการศึกษาในรอบการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำในทุกๆ เดือนจึงพบว่ามีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำจะแสดงให้เห็นใน Table 3

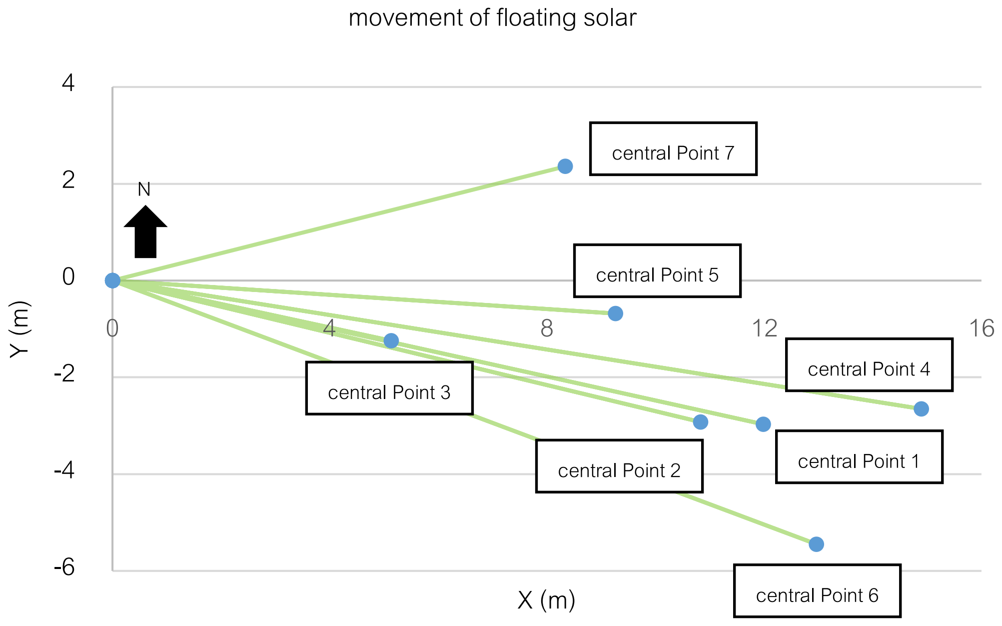


Fig. 5 Results the movement of floating solar in July 2021–August 2022

Table 3 Results the movement of floating solar in July–November 2021

Date	7/26/2021		8/25/2021		9/24/2021		10/25/2021		11/23/2021	
central Point	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1			2.79390959	-1.5901523	-5.5565165	-4.2925124	-9.7155881	8.1291293	8.55051865	-3.3816978
2			-1.6915729	-0.6920783	0.65452124	-2.0957217	-4.8975551	3.25256865	-0.4295495	-4.5366877
3			3.69438804	-0.6182893	-2.0166889	0.08378894	3.29905804	1.8484561	-0.2856006	-0.9814054
4			3.40538505	-3.6937389	3.11612272	-4.6989772	-1.4770072	5.40501651	5.55695696	-2.0697981
5			-3.5251101	-1.9863016	0.08855138	0.73931082	-13.613639	-1.47837655	11.19019	-3.9067322
6			-3.8636032	2.80003638	-6.3723992	0.86977571	8.25567202	-2.44740454	-1.3412802	1.09505463
7			3.52661594	-2.7193306	1.20758972	-0.295639	1.64333102	5.14962932	-4.6794081	-11.114316

Table 4 Results the movement of floating solar in December 2021–April 2022

Date	12/21/2021		1/22/2022		2/19/2022		3/23/2022		4/20/2022	
central Point	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	17.7199945	-7.3920966	-12.376295	5.3215332	9.3421825	0.0942065	-10.82066	2.7865201	15.8146439	-3.01723667
2	7.79607407	-2.2648138	-5.0833259	8.056507	16.826847	-7.972741	-18.50463	2.6491287	13.6002246	-6.89194885
3	5.41024468	-7.1414443	-7.7426581	8.5260868	11.179122	-3.655142	-7.60559	4.7048415	9.12366006	-1.17399341
4	9.8986158	-4.193552	-8.802779	3.1355988	8.4666617	-0.830777	-12.4242	4.1824584	13.4178034	-8.15572918
5	12.1187246	-4.7711918	-2.870392	12.043227	0.7769299	-4.793408	-6.095367	-1.361047	10.7453077	-1.61315463
6	16.5978851	-3.0633344	-18.453346	6.5219604	7.4660525	-2.708128	-9.141478	2.6710075	13.6013575	-1.10796687
7	15.7003309	-1.9035047	-9.7101918	6.2003421	7.5431873	-2.572567	-16.34965	0.9676554	19.2272592	0.50969334

Table 5 Results the movement of floating solar in June–August 2022

Date	5/22/2022		6/22/2022		7/25/2022		8/21/2022	
central Point	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-17.25436	1.0409902	-1.328903	-4.410563	20.399996	0.5624651	-17.111226	2.21509
2	-16.95004	8.2447042	1.2370738	-4.674877	14.890404	2.6162865	-25.467205	2.602734
3	-11.9651	-6.160325	-2.894286	6.1235178	12.322214	-4.03412	-19.951875	3.218927
4	-14.79514	6.3465989	-0.285993	1.8949743	15.628789	-7.363792	-19.281593	4.454797
5	-12.72065	4.3090505	-7.153103	2.2286739	13.271316	-4.060639	-11.275294	3.276761
6	-12.03606	-1.119688	4.6382405	3.6110443	5.8820979	-6.969445	-14.795323	7.643956
7	-14.70976	2.190308	-3.68659	0.1861201	15.680697	0.3215169	-13.051546	0.202733

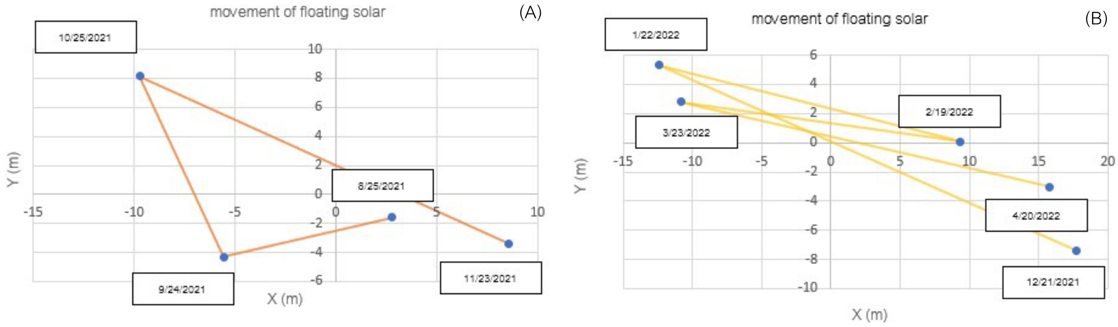


Fig. 6 Results the movement of floating solar: (A) in July–November 2021; (B) in December 2021–April 2022

จากผลการศึกษาพบว่ามีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำในทุกๆ เดือนที่ได้มีการศึกษาโดยในเดือนที่ 1 และเดือนที่ 2 พบว่ามีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปทิศใต้ ต่อมาในเดือนที่ 3 ได้มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทางทิศเหนือ ในเดือนที่ 4 จนถึงตอนนี้พบว่าระดับน้ำในเขื่อนมีการเพิ่มขึ้นมาตั้งแต่เดือนที่ 1 ของการศึกษาถึงเดือนที่ 4 และในเดือนนี้มีการเคลื่อนตัวสลับกับมาเป็นการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ ดังที่ได้แสดงใน Fig. 6A

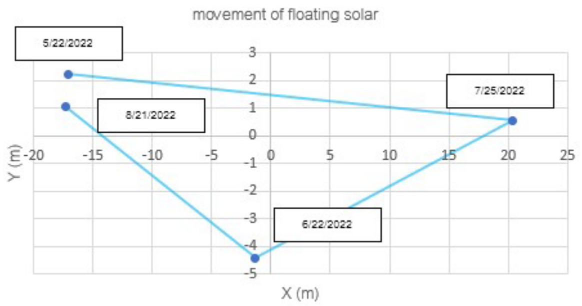


Fig. 7 Results the movement of floating solar in June–August 2022

ในเดือนที่ 5 และในเดือนที่ 7 พบว่ามีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางเดียวกันคือไปในทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ ในเดือนที่ 6 และในเดือนที่ 8 มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ ในเดือนที่ 9 มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ ดังที่ได้แสดงใน Fig. 6B

เดือนที่ 10 มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ เดือนที่ 11 มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางใต้ เดือนที่ 12 มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ และในเดือนที่ 13 มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำไปในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือดังที่แสดงใน Fig. 7 จะเห็นได้ว่าสามารถติดตามการเคลื่อนตัวของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำได้ทุกเดือน

สรุป

จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า การใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมชนิดข้อมูลเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) สามารถใช้ในการติดตามการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำได้ จะเห็นได้ว่าสามารถระบุตำแหน่งของการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำเพื่อใช้ในค้นหาการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำรวมถึงการบอกถึงทิศทางที่มีการเคลื่อนตัวของโซลาร์เซลล์ลอยน้ำที่จะมีผลกระทบตามมาจากการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปที่ก่อให้เกิดปัญหาตามมาที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างการยึด ด้วยการใช้เครื่องมือทางภูมิสารสนเทศร่วมกับการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพถ่ายจากดาวเทียม แต่การศึกษาในครั้งนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านความคลาดเคลื่อนของการจำแนกประเภทของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำออกจากสิ่งปกคลุมดินชนิดอื่นๆบนพื้นผิวโลกที่มีค่าการสะท้อนกลับ (backscattering) ที่มีความใกล้เคียงกับแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ แต่ข้อดีจากการใช้ข้อมูลชนิดเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) สามารถผ่านอุปสรรคจากปัญหาเมฆบดบังน้อยทำให้สามารถเก็บข้อมูลที่ต้องการใช้ในการศึกษาได้ในทุกช่วงเวลา ดังนั้นการใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมชนิดข้อมูลเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) เป็นตัวเลือกทางหนึ่งที่มีงบประมาณที่ถูก และสามารถตรวจสอบการเคลื่อนตัวที่มีความถี่ได้มากขึ้นทำให้ลดการลงพื้นที่ตรวจสอบรวมไปถึงลดของงบประมาณจำนวนมาก ผลที่ได้สามารถนำไปวางแผนการสำรวจการติดตามการเปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นที่ขนาดใหญ่หรือพื้นที่ที่คนไม่สามารถเข้าถึงได้เพื่อลดระยะเวลาการสำรวจและงบประมาณในการทำงาน

เอกสารอ้างอิง

นายยุทธนา เถิงล้อม. 2563. การศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-1 และSentinel-2 สำหรับ คาดการณ์ปริมาตรไม้สัก บริเวณสวนป่าทองผาภูมิจังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

Agency, E.S. 2020. Sentinel -1 mission. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1, 1 September 2022.

Dmitrii, G.S.M., Huntemann, M., Dierking, W. 2018. Method for detection of leads from Sentinel 1 SAR images. Eosdataanalysis. 2022. Sentinel-1 Overview. https://eos.com/find-satellite/sentinel-1/, 1 September 2022.

Kakaew, W. 2020. Solar resource map of Thailand. https://ienergyguru.com/2015/07/solar-resource-map-of-thailand/, 8 September 2022.

Luo, J., Ma, R., Duan, H., Hu, W., Zhu, J., Huang, W., Lin, C. 2014. A new method for modifying thresholds in the classification of tree models for mapping aquatic vegetation in Taihu Lake with satellite images. Remote Sens. 6: 7442–7462. doi.org/10.3390/rs6087442

da Costa, M.V.C.V., de Carvalho, O.L.F., Orlandi, A.G., et al. 2021. Remote sensing for monitoring photovoltaic solar plants in Brazil using deep semantic segmentation. Energies 14: 2960. doi.org/10.3390/en14102960

การประเมินข้อมูล SAR สำหรับการทำแผนที่และการติดตามชีวมวลป่าไม้

Evaluation of SAR data for mapping and monitoring forest biomass

ปิยะวรรณ วีระไพบูลย์*, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์

Piyawan Werapaiboon*, Anuphao Aobpaet, Soravis Supavetch

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Piyawan.wee@ku.th

บทคัดย่อ

ป่าไม้มีบทบาทสำคัญในวัฏจักรคาร์บอนทั่วโลก โดยจะกักเก็บคาร์บอนมากกว่า 25% ที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ เนื่องจากป่าเป็นแหล่งดูดซับและกักเก็บคาร์บอน การใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลสำหรับการทำแผนที่และการตรวจสอบชีวมวลของป่าไม้ ในบรรดาเทคนิคการรับรู้ทางไกลนั้น ระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar: SAR) สามารถนำมาใช้ในการกำหนดลักษณะพารามิเตอร์โครงสร้างของป่าและการประมาณค่าชีวมวลบนพื้นดินได้ ซึ่งสัญญาณการสะท้อนกลับจะแปรผันไปตามพารามิเตอร์ของป่าไม้ รวมไปถึงโพลาไรซ์เซชัน เช่น VV กับ VH จะส่งผลต่อการสะท้อนกลับที่แตกต่างกัน ในการศึกษานี้จะนำข้อมูล SAR มาใช้หาค่าชีวมวลบนพื้นดินจากป่า เปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดจากภาคสนาม ผลลัพธ์จากกระบวนการศึกษาจะเป็นวิธีการและเทคนิคในการประมาณค่าชีวมวลเหนือพื้นดินของป่าและติดตามการเปลี่ยนแปลงจากระบบดาวเทียม SAR สำหรับการประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอน

คำสำคัญ: การกักเก็บคาร์บอน, ค่าชีวมวลบนดิน, ระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์

Abstract

Forests play an essential role in the global carbon cycle. It stores more than 25% of the carbon released into the atmosphere because forests are a source of carbon absorption and storage. Using remote sensing data to map and monitor forest biomass. Synthetic Aperture Radar (SAR) systems can estimate aboveground biomass in which the backscatter signal varies according to the parameters of the forest. Polarization, such as VV and VH, will have different reflectivity. This study used SAR data to determine terrestrial biomass from forests. Compare with measurement data from the field. The results of the study process will be methods and techniques for estimating forest aboveground biomass and tracking changes from the SAR satellite system, for estimating carbon sequestration values and further use of the forest.

Keywords: Above ground biomass, Carbon storage, Synthetic aperture radar (SAR)

คำนำ

ประเทศไทยได้ให้สัตยาบันสารเข้าร่วมเป็นภาคี “ความตกลงปารีส” เมื่อวันที่ 21 กันยายน 2559 โดย พล.อ. ประยุทธ์ จันทร์โอชา นายกรัฐมนตรี เข้าร่วมการประชุมสมัชชาสหประชาชาติสมัยสามัญ ครั้งที่ 71 ที่นครนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา และได้มอบสัตยาบันสารเข้าเป็นภาคีความตกลงปารีสของไทยให้กับนายบัน คีมูน เลขาธิการสหประชาชาติ ณ สำนักงานใหญ่สหประชาชาติ ทั้งนี้ ประเทศไทยได้ให้ข้อเสนอการมีส่วนร่วมของประเทศในการลดก๊าซเรือนกระจกและการดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กับประชาคมโลก (National Determined Contribution – NDC) โดยตั้งเป้าลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงให้ได้ร้อยละ 20–25 ภายในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งมีเป้าหมายร่วมกันเพื่อควบคุมการเพิ่มของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้ต่ำกว่า 2 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดก๊าซเรือนกระจกที่ดีที่สุดรูปแบบหนึ่ง คือ การปลูกป่าเพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวการสำคัญหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Green Network, 2021)

ในปัจจุบันการใช้ข้อมูลดาวเทียมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในประเทศไทย เนื่องจากป่าในประเทศไทยกำลังลดลง และการประเมินทรัพยากรป่าไม้โดยใช้ข้อมูลดาวเทียมเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar: SAR) ในช่วงเริ่มต้นการถ่ายภาพเรดาร์ ระบบเรดาร์เป็นการถ่ายภาพในแนวเฉียงจะสังเคราะห์ความกว้างของลำแสงที่แคบ ดังนั้นระบบ SAR จะใช้สายอากาศสั้น และสามารถใช้ช่วงคลื่นที่ยาวขึ้นได้ ทำให้การถ่ายภาพเรดาร์ จะได้ภาพที่มีความละเอียดโดยเลือกใช้ดาวเทียม Sentinel-1 ในการหาค่า VV และ VH จะเป็นทิศทางการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Polarization) ในทิศทางการแผ่กระจายทั้งแนวตั้ง (Vertical: V) และแนวนอน (Horizontal: H) (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ, 2552) ต่อมาเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 คือ การประมวลภาพมาคำนวณค่าดัชนีความต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) (Kriegler et al., 1969) จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า VV VH และ NDVI เพื่อพัฒนาแบบจำลองชีวมวลจะได้สมการค่าของชีวมวลของป่าไม้ (Forest Biomass) นำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าคาร์บอนเครดิต (carbon credit) ต่อไป

"ตลาดคาร์บอน" (Carbon Market) หรือ ตลาดซื้อขายคาร์บอนเครดิต เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ใช้บรรเทาผลกระทบจากภาวะโลกร้อนที่สามารถช่วยให้การลดก๊าซเรือนกระจกสุทธิลดลง การลดก๊าซเรือนกระจกมีราคา และตลาดคาร์บอนจะเป็นสื่อการในการซื้อขาย แลกเปลี่ยน “คาร์บอนเครดิต” ตลาดคาร์บอนในประเทศไทยยังดำเนินการในรูปแบบ “ตลาดคาร์บอนแบบภาคสมัครใจ (Voluntary carbon market)” โดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์กรมหาชน) (T-VER, 2564)

วิธีการ

พื้นที่และข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

โครงการป่าวังจันทร์ตั้งอยู่ทางทิศเหนือของอำเภอวังจันทร์ โดยมีระยะ ห่างจากอำเภอวังจันทร์ประมาณ 11 กิโลเมตร อำเภอวังจันทร์ มีพื้นที่ประมาณ 149.528 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 93.456 ไร่ เป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่สมบูรณ์มากถึงร้อยละ 90 ของพื้นที่ เป็นไม้ยืนต้นในกลุ่มสวนผลไม้ ยางพารา ปาล์มน้ำมัน และพืชผักทางการเกษตร (สถาบันปลูกป่าและระบบนิเวศ ปตท, 2558) ดังแสดงใน Fig. 1

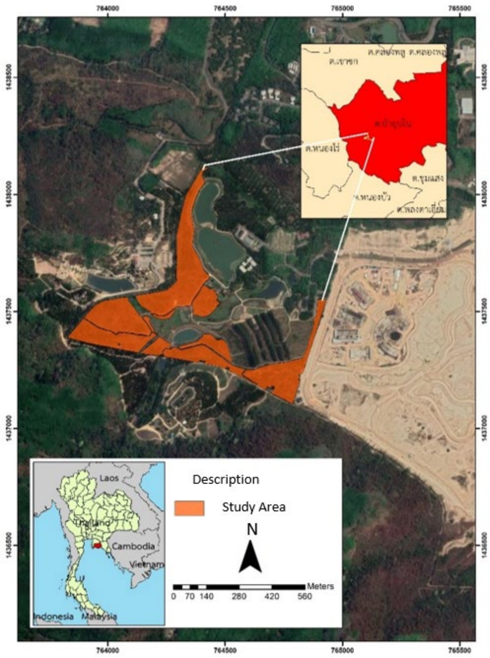


Fig. 1 Wang Chan forest study area

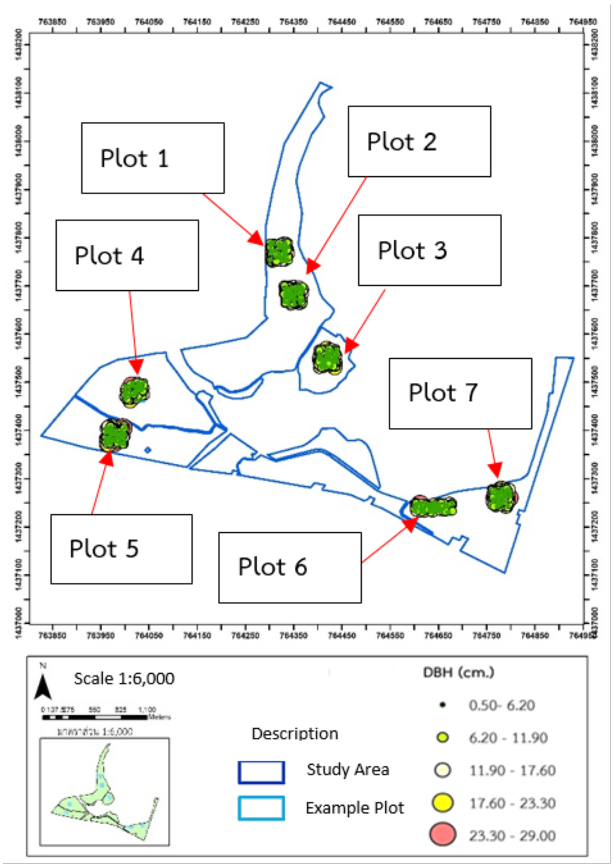


Fig. 2 The experimental plots were divided into 7 plots

2) ศึกษาและเก็บข้อมูลภาคสนาม เพื่อให้ง่ายต่อการเก็บข้อมูลไม้ยืนต้นทุกต้นที่ปรากฏในแต่ละแปลง ทำการคัดเลือกมีต้นไม้ทั้งหมด 1,383 ต้น แบ่งแปลงศึกษาจำนวนทั้งหมด 7 แปลงใหญ่ โดยเก็บข้อมูลในแปลงตัวอย่างดังกล่าว

ในเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2564 โดยจัดแปลงใหญ่ขนาด 40×40 เมตร จำนวน 6 แปลง และขนาด 80×20 เมตร จำนวน 1 แปลง แสดงใน Fig. 2 จากนั้นแบ่งแปลงใหญ่เป็นแปลงย่อยขนาด 10×10 เมตร จำนวนแปลงย่อยทั้งหมด 16 แปลงต่อ 1 แปลงใหญ่ โดยมีภาพขยายตัวอย่างการกระจายตัวของต้นไม้และแสดงขนาด DBH ในแปลงทดลองที่ 1, 6 และ 7 ดังภาพที่แสดงใน Fig. 3

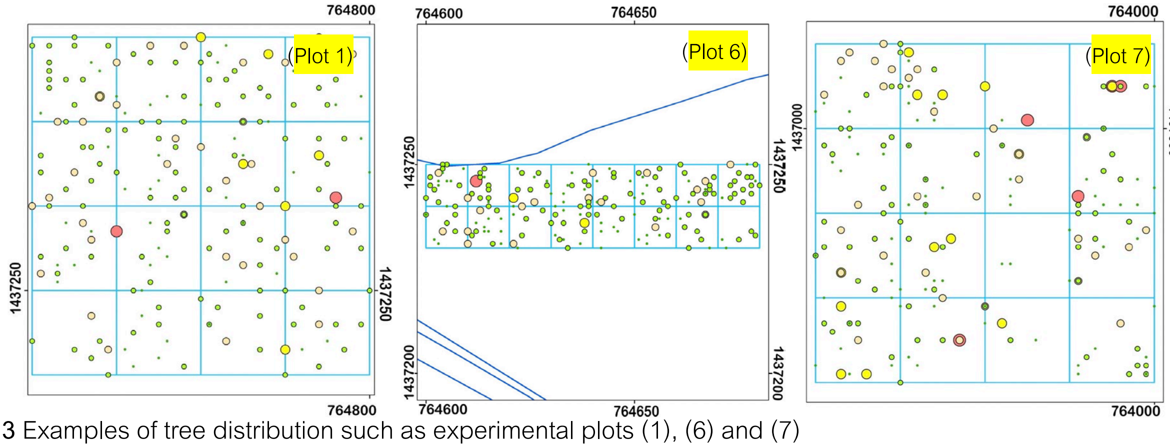


Fig. 3 Examples of tree distribution such as experimental plots (1), (6) and (7)

3) ค่ามวลชีวภาพหรือค่าชีวมวลป่าไม้ (Forest Biomass) สามารถคำนวณได้จากสมการแอลโลเมตริก (allometric equations) ได้จำแนกการหาตามชนิดของป่าในประเทศไทย ซึ่งโครงการป่าวังจันทร์นั้นถูกจำแนกเป็นประเภทป่าดิบแล้ง (Dry Evergreen Forest) (TGO, 2564) โดยใช้สมการตาม Equations 1-6

$$W_S = 0.0509D^2H^{0.8737} \quad (1)$$

$$W_B = 0.00893D^2H^{0.977} \quad (2)$$

$$W_L = 0.0140D^2H^{0.699} \quad (3)$$

$$AGB = W_{above} = W_S + W_B + W_L \quad (4)$$

$$W_{below} = 0.26W_{above} \quad (5)$$

$$\text{Forest Biomass} = W_{above} + W_{below} \quad (6)$$

เมื่อ ค่า D หรือ DBH คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตรงสูงเพียงอกที่ 1.30 เมตรเหนือพื้นดิน (ซม.) โดยมี H คือความสูงทั้งหมดของต้นไม้ ส่วนค่า W_S, W_B, และ W_L คือ น้ำหนักแห้ง (กิโลกรัม) ของลำต้น (stem),กิ่ง (branch) และใบ (leaf) ตามลำดับ ซึ่งผลรวมของทั้ง 3 ค่า ผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่า W_{above} หรือ AGB คือ มวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมด (กิโลกรัม)

4) การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของป่าไม้ คำนวณจากการนำมวลชีวภาพเหนือพื้นดินบวกกับมวลชีวภาพใต้ดิน (ร้อยละ 26 ของค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน) ของต้นไม้ คูณด้วยปริมาณคาร์บอน (carbon content) ของต้นไม้ โดยใช้ค่าปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 47 ของน้ำหนักแห้ง (IPCC, 2006)

5) ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 และ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ดังแสดงใน Table1

การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 คือ ขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมเบื้องต้น (Pre-Image Processing) ก่อนนำภาพถ่ายดาวเทียมมาทำการสกัดค่าเฉลี่ยการสะท้อนกลับของค่าโพลาไรเซชันแบบ VV และ VH โดยใช้โปรแกรม SNAP ร่วมกับโปรแกรม QGIS ในการประมวลผลและทำแผนที่

การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 คือ การประมวลภาพเป็นคำนวณค่าดัชนีความต่างพืชพรรณ (NDVI) โดยใช้โปรแกรม QGIS นำค่าดัชนีความต่างพืชพรรณมาวิเคราะห์และทำแผนที่

Table 1 Acquired satellite remote sensing data

Satellite	Acquisition Date	Resolution	Level	Spectral/Polarizations Used
Sentinel-1 SAR	29 October 2021	10m	C-band	VV, VH
Sentinel-2	29 October 2021	10m	-	Blue, Green, Red, NIR

Source: European Space Agency (ESA)

6) เพื่อพัฒนาแบบจำลองชีวมวลโดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม ในการวิเคราะห์การถดถอย สมมติว่า AGB เกี่ยวข้องกับ VV และ VH จาก Sentinel-1 และ NDVI จาก Sentinel-2 (Bayanmunkh et al., 2019) ดังแสดงใน Equation 7

$$AGB = F\ (VV, VH, NDVI) \tag{7}$$

ในงานวิจัยนี้ผลลัพธ์ของแบบจำลองนี้อธิบายไว้ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการทำนายโดยจะทำการทำนายค่า $AGB_{prediction}$ โดยการคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรดังกล่าวจาก Equation 8 มาทดลองเพื่อใช้กับโครงการป่าวังจันทร์สำหรับ 7 แปลงใหญ่ โดยใช้วิธี Multiple Linear Regression Analysis จากโปรแกรม Excel ดังแสดงใน Equation 6 และ กระบวนการทำใน Fig. 4

$$AGB_{prediction} = 3.35 + 2.96 * VV + 0.20 * VH + 1.51 * NDVI \tag{8}$$

เมื่อ VV = the backscatter coefficients for a specific polarization

VH = the backscatter coefficients for a specific polarization

NDVI = normalized difference vegetation index.

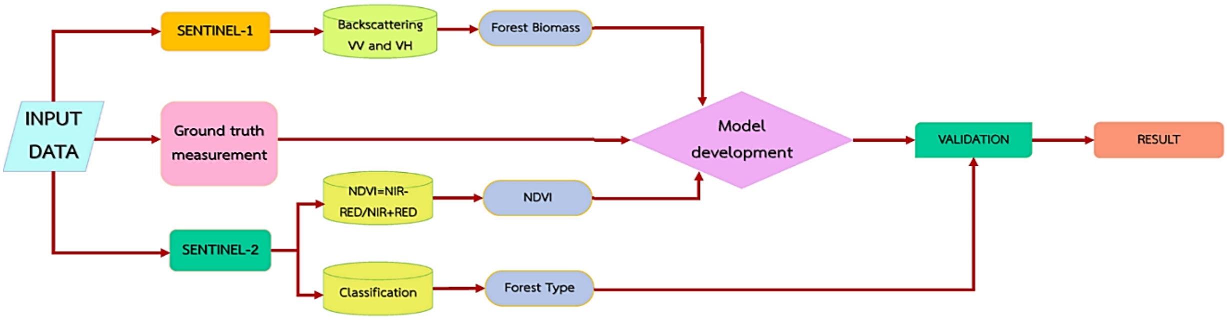


Fig. 4 Scheme of methodology

6) การซื้อขายคาร์บอนเครดิตในประเทศไทยมีการดำเนินการผ่านโครงการชดเชยคาร์บอน หรือ Thailand Carbon Offsetting Program (T-COP) ซึ่งพัฒนาโดย TGO (TGO, 2564) การพิจารณาราคาคาร์บอนเครดิต แยกตาม

ประเภทของโครงการลดก๊าซเรือนกระจก โดยโครงการประเภทป่าไม้มีราคาซื้อขายสูงสุดที่ 1,869 บาทต่อตัน ข้อมูล ณ เดือนธันวาคม 2564

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สำหรับผลการวิเคราะห์มวลชีวภาพของป่าไม้ จะได้ค่า NDVI อยู่ในช่วง 0.57 ถึง 0.76 จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ดังแสดงในแผนที่ Fig. 5 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายกลับจากโพลาไรเซชัน VV อยู่ในช่วง -2.79 ถึง -15.72 ดังแสดงในแผนที่ Fig. 6 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายกลับจากโพลาไรเซชัน VV อยู่ในช่วง -11.95 ถึง -13.62 ดังแสดงในแผนที่ Fig. 7 และแผนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VV VH และ NDVI ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่า AGB อยู่ในช่วง 15.36 ถึง 54.63 ดังแสดงในแผนที่ Fig. 8

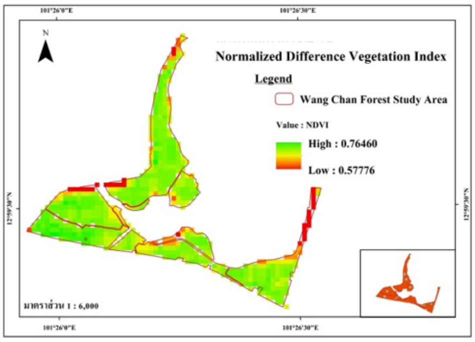


Fig. 5 NDVI map from Sentinel-2

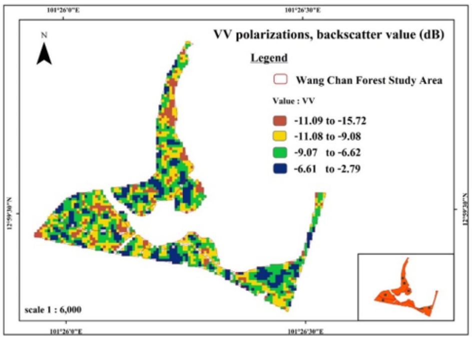


Fig. 6 VV map for forest using Sentinel-1

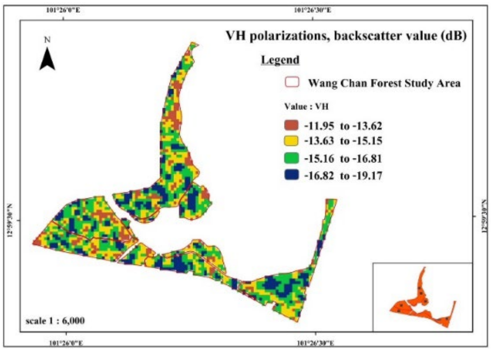


Fig. 7 VH map for forest using Sentinel-1

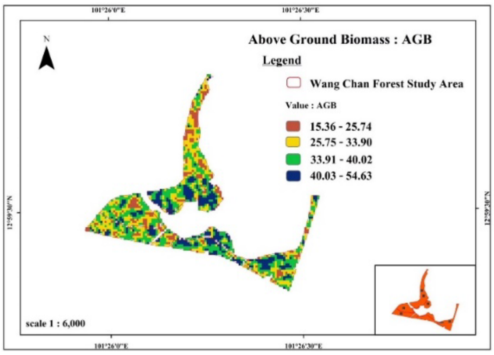


Fig. 8 AGB prediction map from the model using VV, VH from Sentinel-1 and NDVI from Sentinel-2

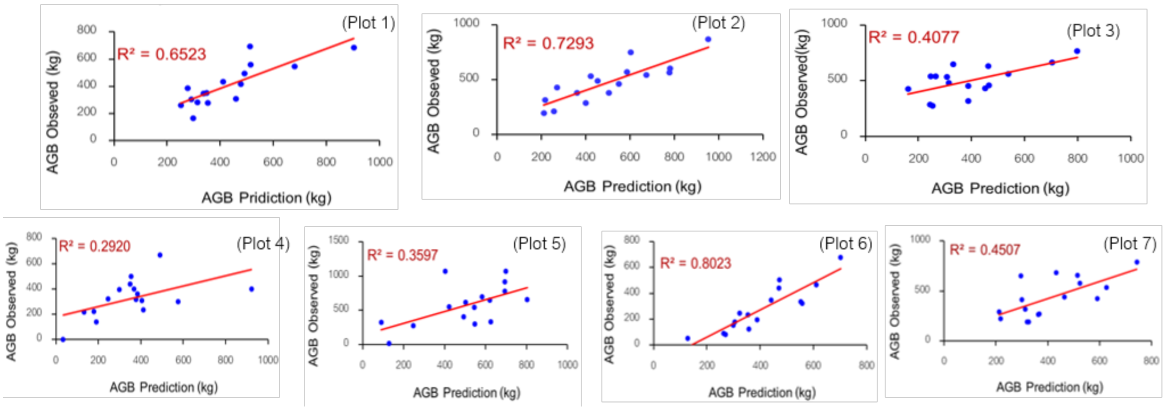


Fig. 9 Seven R-squared equations I plots were compared to the AGB Observed and AGB Prediction value

สำหรับการคำนวณค่าชีวมวลของป่าไม้ (Forest Biomass) จะได้สมการ R-Squared ทั้ง 7 แปลงใหญ่ของการทดลองครั้งนี้ เมื่อเทียบกับค่า AGB Observed กับ ค่า AGB Prediction จะได้ค่า R-Squared เป็นลำดับดังนี้ 0.6523, 0.7293, 0.4077, 0.2920, 0.3597, 0.8023 และ 0.4507 ดังแสดงใน Fig. 9

จากแผนภูมิการเปรียบเทียบค่าชีวมวลของป่าไม้ (Forest Biomass) ดังแสดงอยู่ใน Fig. 10 เมื่อคำนวณค่า AGB (Aboveground Biomass: AGB) ออกมาแล้วจะได้ผลรวมของทั้ง 7 แปลง โดยที่ ค่า AGB Observed อยู่ที่ 47,610.44 kg. และผลรวมของค่า AGB Prediction อยู่ที่ 47,611.22 kg. จากต้นไม้ทั้งหมด 1,383 ต้น ทั้ง 2 การสำรวจ ค่าที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมนั้นมีค่ามากกว่าการสำรวจจริงทางภาคสนามอยู่ที่ 0.0016% ณ ข้อมูลสำรวจวันที่ 29 ตุลาคม 2564

เมื่อนำผลรวมค่าชีวมวลของป่าไม้ (Forest Biomass) ทั้ง 7 แปลงใหญ่ที่ได้มาคำนวณหาค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดจะได้ 103.38 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสมมติให้ใช้ราคาที่สูงที่สุดในการซื้อขายคาร์บอนเครดิตเป็นเงิน 1,869 บาทต่อตัน สำหรับโครงการประเภทป่าไม้โดยอ้างอิงราคาจากโครงการชดเชย ในปีที่คำนวณจะไม่ได้นับคาร์บอนสะสมจะสามารถขายคาร์บอนเครดิตได้เป็นเงิน 193,217.22 บาท โดยประมาณ

จากผลการทดลองพบว่าผลรวมค่าของค่าชีวมวลของป่าไม้ (Forest Biomass) เมื่อคิดแยกแปลงนั้นยังมีแปลงที่ผลลัพธ์แตกต่างเยอะว่าแปลงอื่นอื่น เช่น แปลงการทดลองที่ 6 ได้ค่า AGBprediction อยู่ที่ 6,497.97 Kg. ส่วนค่า AGBObserved อยู่ที่ 4,453.00 Kg. ค่าความแตกต่างเป็น 46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในอนาคตอาจจะใช้เครื่องมืออื่นๆ เข้ามาช่วย เช่น การนำโดรนที่มีความละเอียดสูงออกมาบินสำรวจ เพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น สำหรับการทดลองครั้งนี้เหมาะสำหรับโครงการศึกษาขนาดใหญ่มากกว่าโครงการศึกษาขนาดเล็ก

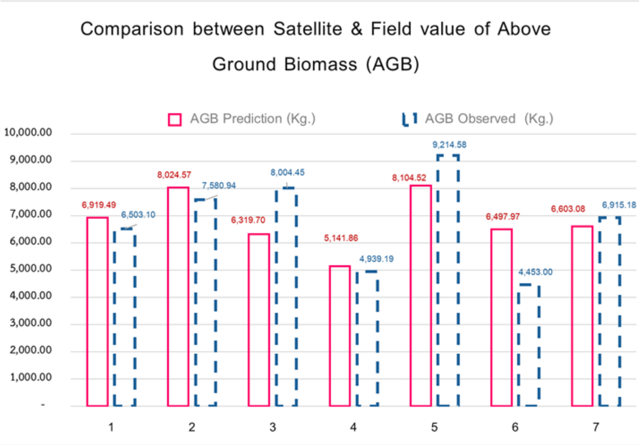


Fig. 10 Comparison between Satellite & Value of Biomass (AGB)

สรุป

จากการศึกษาผลการทดลองทั้ง 7 แปลงใหญ่โดยใช้ระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar : SAR) ผลลัพธ์ที่ได้มีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายกลับจากโพลาไรเซชัน VV และ VH จากดาวเทียมจาก Sentinel-1 ร่วมกับการวัดค่าดัชนีความต่างพืชพรรณ (NDVI) จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 เป็นการวัดเชิงพื้นที่ไม่ใช้การวัดเฉพาะจุด จึงทำให้มีผลการทดลองดังกล่าวแสดงค่าไม่ได้ละเอียดในแต่ละแปลงทดลองเท่าที่ควร เช่น ถ้าต้นไม้ที่เลือกทำการทดลอง โดยพุ่มใบของต้นที่ใหญ่กว่าบดบัง ค่าที่ได้จะส่งผลให้ค่าของสมการ R-squared สูงต่ำไม่เท่ากัน ดังนั้นการเรียงตัวของต้นไม้มีผลอย่างมากในการให้ค่าสูงหรือต่ำ และค่า AGBprediction โดยการคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรจากความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ค่า นั่นก็คือ VV, VH และ NDVI โดยสมการเชิงเส้น AGB Prediction = 3.35 + 2.96 * VV +0.20 * VH +1.51 * NDVI ที่เมื่อผ่านการคำนวณ ผลลัพธ์จากภาพถ่ายดาวเทียมนั้นมีค่า Forest Biomass มากกว่าการสำรวจทางภาคสนามอยู่เพียง 0.0016%

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 และ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 จากโครงการ Copernicus ของ European Space Agency (ESA) ประมวลผลด้วยซอฟท์แวร์ SNAP (The Sentinel Application Platform) และ โปรแกรม QGIS ตามลำดับ พร้อมทั้งขอขอบคุณข้อมูลภาคสนามจากโครงการป่าวังจันทร์ของสถาบันปลูก

ป่าและระบบนิเวศ ปตท ที่สนับสนุนข้อมูลในส่วนของพื้นที่แปลงทดลองและข้อมูลเฉพาะของต้นไม้ในพื้นที่ดังกล่าวเพื่อนำมาศึกษาและทดลองในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ. 2552. ตำราเทคโนโลยี อวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์ (Space Technology and Geo-Informatics. อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ.

สถาบันปลูกป่าและระบบนิเวศ ปตท. 2558. การวิจัยข้อมูลฐานด้านทรัพยากรดินในพื้นที่โครงการป่าวังจันทร์ จังหวัดระยอง. http://www.pttreforestation.com/Researchview.cshtml?Id=7, 16 กุมภาพันธ์ 2565.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2564. T-VER-TOOL-FORIAGR-01 การคำนวณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้. องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). กรุงเทพฯ.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2564. ตลาดคาร์บอนคืออะไร. โครงการลดก๊าซเรือนกระจก. http://carbonmarket.tgo.or.th/index.php, 23 มิถุนายน 2565.

Bayanmunkh, N., Tseveen, B., Batomunkuev, V., Renchin, T. 2019. Estimation for forest biomass and coverage using satellite data in small scale area, Mongolia. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 320: 012019. doi: 10.1088/1755-1315/320/1/012019

Green Network. 2021. ความตกลงปารีส (Paris Agreement) ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. https://www.greennetworkthailand.com/-paris-agreement/, 19 มิถุนายน 2565.

IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Chapter 4 Forestland. National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.

Kriegler, F., Malila, W., Nalepka, R., Richardson, W. 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, MI, USA, 97–131.

Tsutsumi, T.K., Yoda, P., Sahunalu, P., Dhanmanonda, Prachaiya, B. 1983. Forest: Felling, burning and regeneration in shifting cultivation. In: Kyuma, K., Pairinta, C. (Eds.). An Experiment at Nam Phrom, Thailand and its inplications for Upland Farming in the Monsoon Tropics. pp. 13–62.

การออกแบบและเปรียบเทียบระบบป้องกันอัคคีภัย: กรณีศึกษาห้องควบคุมในโรงงาน

Design and comparison of fire protection systems: A case study of a control room in a factory

เผ่าพัชร ภูสีเขียว[a], **อนุเผ่า อบแพทย์**[b,*]

Paopach Phusikiew[a], Anuphao Aobpaet[b,*]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Safety Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengaha@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบระบบดับเพลิงสำหรับห้องควบคุม (Server Room) ซึ่งเป็นห้องที่มีความสำคัญอย่างมากของโรงงาน เพราะหากมีการเกิดเพลิงไหม้จะทำให้เกิดความเสียหายต่อข้อมูล ซึ่งเป็นมูลค่าที่ไม่สามารถประเมินได้ ระบบป้องกันอัคคีภัยจึงถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการป้องกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยสามประเภทคือ ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยสารสะอาดดับเพลิง (Ig-100) ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (FM-200) และระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (Novec1230) โดยทั้งสามระบบได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันตรายที่เกิดขึ้นต่อบุคคล ประสิทธิภาพในการดับเพลิง และค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยสารสะอาดดับเพลิง (Ig-100) มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด โดยประเมินจากเหตุผลข้อเปรียบเทียบจำนวนสี่ข้อ ความอันตราย ประสิทธิภาพของระบบ ราคาอุปกรณ์ และการซ่อมบำรุงรักษาของระบบ

คำสำคัญ: ห้องควบคุม (Server Room), ระบบดับเพลิงอัตโนมัติ

Abstract

This research aims to study the design of a fire suppression system for the server room, a significant factory room. Because if there is a fire, it will cause damage to the data, which value cannot be evaluated. A fire prevention system is, therefore, an essential tool for protection. This research studied and designed three types of fire protection systems. There is a clean agent automatic fire extinguishing system (Ig-100), gas automatic fire suppression system (FM-200) and gas automatic fire suppression system (Novec1230). All three systems were compared to environmental impacts, danger to person, firefighting efficiency and installation costs. The comparison results show that the automatic fire extinguishing system with clean extinguishing agents (Ig-100) is the most suitable for use. It was evaluated from four comparative reasons: hazards, the efficiency of the system, cost of equipment and maintenance of the system

Keywords: Fire suppression system, Server room

คำนำ

ความปลอดภัยในโรงงาน คือสภาพที่ปลอดภัยจากอุบัติภัยต่าง ๆ อันจะเกิดแก่ร่างกายชีวิต หรือ ทรัพย์สิน ในขณะปฏิบัติงานในโรงงานซึ่งก็คือสภาพการทำงานที่ถูกต้องโดยปราศจากอุบัติเหตุในขณะทำงานนั่นเอง อุบัติเหตุ อาจนิยามได้ว่า คือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่พึงประสงค์ในระหว่างการทำงานและมีผลไปขัดขวางหรือก่อผลเสียหายแก่การทำงานนั้นในโรงงานต่าง ๆ นั้นย่อมจะเกิดอุบัติเหตุกับระบบต่าง ๆ ได้มากอาทิ เครื่องจักรเครื่องกล ระบบไฟฟ้า ระบบขนส่งหรือขนถ่ายวัสดุ เครื่องมือกล วัตถุดิบ สารเคมี สารไวไฟ ฯลฯ อุบัติเหตุที่เกิดแก่ชีวิตร่างกาย การศึกษาการป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละประเภทที่มีความเสี่ยงสูงและรุนแรงต่อการเกิดอัคคีภัย ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวนี้จะให้รายละเอียดในเรื่องพื้นฐานวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย เสนอแนะแนวทางการเลือกระบบ อุปกรณ์ป้องกันและระงับอัคคีภัยที่เหมาะสมกับการประกอบกิจการโรงงาน รวมถึงการตรวจสอบ บำรุงรักษาระบบและอุปกรณ์ดังกล่าวสำหรับใช้เป็นแนวทางให้กับโรงงานแต่ละประเภทได้นำไปปฏิบัติ พัฒนางานด้านความปลอดภัยได้อย่างถูกต้องเหมาะสม (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545)

อุปกรณ์และวิธีการ

การทำวิจัยครั้งนี้มีวิธีการดำเนินการ โดยใช้ข้อมูลประยุกต์ร่วมกับการออกแบบระบบดับเพลิงในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงใน Fig. 1

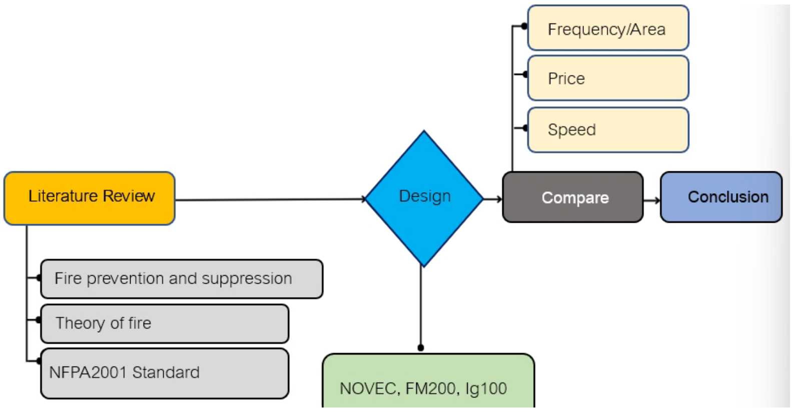


Fig. 1 Materials and methods

ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการป้องกันและระงับอัคคีภัย 2552

1. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการป้องกันและระงับอัคคีภัย ได้กำหนดคำนิยาม ของโรงงาน ว่าโรงงานที่มีความเสี่ยงตอการเกิดอัคคีภัยสูง" หมายความว่า โรงงานซึ่งมีการประกอบกิจการโรงงานที่มีการใช้เชื้อเพลิง วัตถุไวไฟ หรือมีลักษณะที่ทำให้เกิดอัคคีภัย หรือระเบิดได้ง่าย ทั้งนี้ตามประเภทหรือชนิดของโรงงานที่ระบุในบัญชีท้ายประกาศนี้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2552)

2. “ระบบดับเพลิงอัตโนมัติ” หมายความว่า ระบบดับเพลิงที่สามารถทำงานได้ทันทีโดยอัตโนมัติ เมื่อเกิดเพลิงไหม้หรือความร้อนจากเพลิงไหม้ เช่น ระบบหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติ หรือ (Automatic Sprinkler System) ระบบอื่นที่เทียบเท่า

ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเพลิงไหม้

เพลิงไหม้ คือ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดจากการที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซออกซิเจนและก็ให้เกิดความร้อนและแสงสว่างเป็นปริมาณมาก ปฏิกิริยาการเผาไหม้นั้นต้องการปัจจัย 3 อย่าง ออกซิเจน เชื้อเพลิง ความร้อน องค์ประกอบของการดับเพลิง คือการกำจัดองค์ประกอบทั้ง 3 ของการเกิดเพลิงไหม้ออก เพื่อควบคุมปริมาณการเผาไหม้ ได้แก่ การกำจัดเชื้อเพลิงออก การลดปริมาณออกซิเจน การลดอุณหภูมิของเชื้อเพลิง และการตัดปฏิกิริยาลูกโซ่

NFPA 2001 Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems

เป็นองค์กรชั้น นำของโลกที่สนับสนุนกิจกรรมด้านการป้องกันอัคคีภัยภารกิจหลักของ NFPA คือ จัดทำและสนับสนุนการกำหนดมาตรฐานละนำมาใช้ในกระบวนการ ก่อสร้างและบริหารจัดการอาคารให้มีความปลอดภัย โดยครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบ จนถึง การดับเพลิงเมื่อเกิดอัคคีภัย ใน NFPA 2001 กำหนดการออกแบบเกี่ยวกับสารสะอาดดับเพลิงเช่น ระบบดับเพลิงด้วยก๊าซไนโตรเจน (National Fire Protection Association, 2022)

การออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัย

จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการการออกแบบและเปรียบเทียบระบบป้องกันอัคคีภัย (บริษัท ไฟร์เทค อินโนเวชั่น จำกัด, 2546. วริทธิ์ และคณะ, 2546; ปรเมศวร์, 2547; พิชญะ, 2547; ชาญชัย, 2548 และวิภารัตน์, 2548.) ผู้วิจัยสามารถสรุปวิธีการที่ใช้ในการศึกษาการออกแบบและเปรียบเทียบระบบป้องกันอัคคีภัย กรณีศึกษาห้องควบคุมในโรงงาน ทั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการวิจัยซึ่งสามารถแบ่งลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1. ศึกษาปัญหา รวบรวมข้อมูล ศึกษาคุณสมบัติของสารเคมี ข้อกำหนดกฎหมาย และลักษณะอาคาร ขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 3 เมตร (Fig. 2)

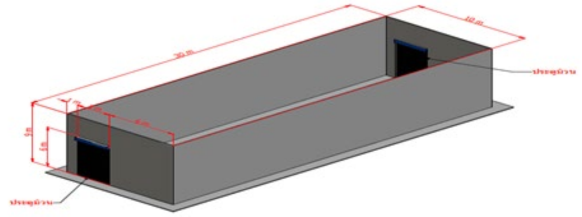


Fig. 2 Building size

2. ในการวิจัยนี้จะเลือกทำการศึกษาระบบป้องกันอัคคีภัยที่สามารถระงับอัคคีภัยที่เกิดจากของเหลวไวไฟได้ที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยสารสะอาดดับเพลิง (Ig-100) ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (FM-200) และระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (Novec1230) โดยอาศัยการออกแบบดังนี้

ออกแบบและคำนวณดับเพลิงอัตโนมัติด้วยสารสะอาดดับเพลิงไนโตรเจน (Ig-100)

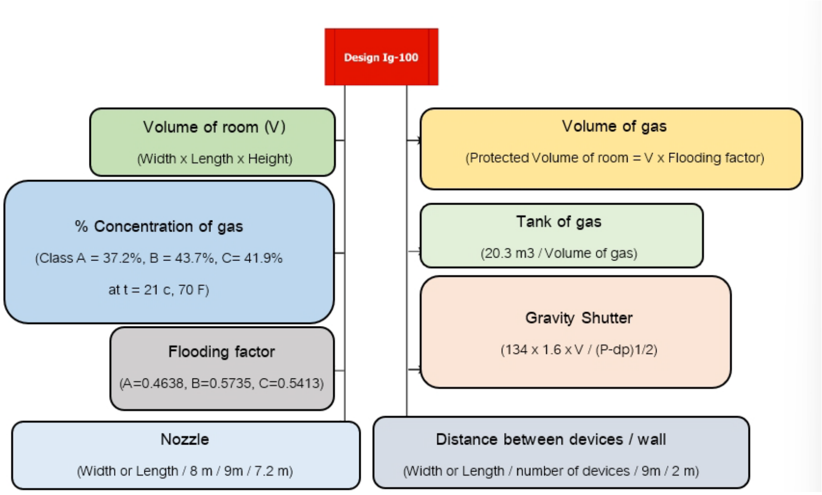


Fig. 3 Fire protection system design Ig-100

ออกแบบและคำนวณระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (Novec)

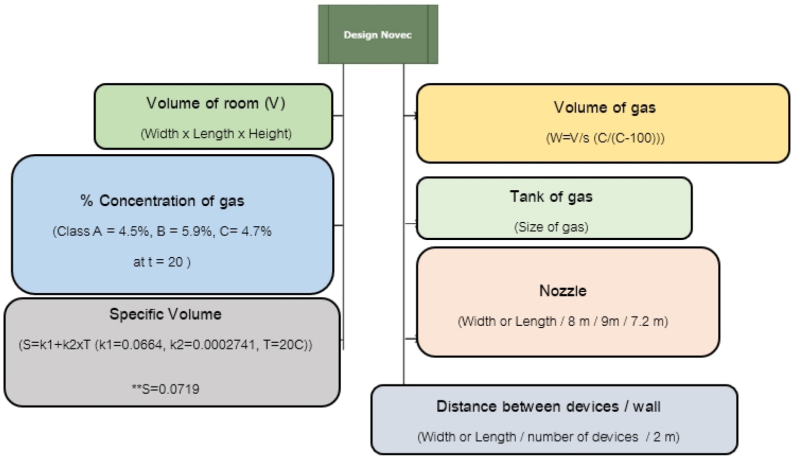


Fig. 4 Fire protection system design Novec

ออกแบบและคำนวณระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (FM-200)

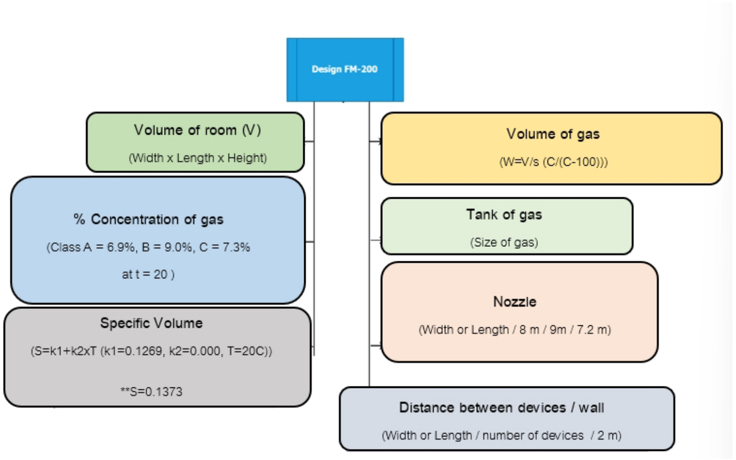


Fig. 5 Fire protection system design FM200

ผลการศึกษา

ระบบป้องกันอัคคีภัยที่นำมาพิจารณาทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยสารสะอาดดับเพลิง (Ig-100) ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (FM-200) และระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (Novec1230) หากมีการดำเนินตามขั้นตอนการออกแบบและคำนวณระบบดับเพลิงอัตโนมัติจะสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังแสดงใน Figs. 6–8 โดยมีรายละเอียดดังนี้ (National Fire Protection Association, 2022)

1. กรณีศึกษาห้องตัวอย่างปริมาตร 600.00 ลูกบาศก์เมตร หากใช้ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยสารสะอาดดับเพลิง (Ig-100) จะต้องใช้จำนวนถังไนโตรเจน 17 ถัง โดยมีปริมาตรไนโตรเจนรวม 340.00 ลูกบาศก์เมตร จึงจะสามารถดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Fig. 6)

Ig-100 FIRE EXTINGUISHING SYSTEM					
A(M^2)	:	200.00		T =	21 C
H(M)	:	3.00		F.F =	41.9
V_P	:	600.00			
FC	:	0.545			
V_R	:	327.00			
CYL NO.	:	16.11			
CYL NO.(A)	:	17.00			
V_Z	:	345.10			
O2=21exp(-Vr/Vp)					
O_2 (%)	:	11.81			
Pressure Relief Damper					
A	:	134 x 1.6 xVz/(P-dp)½			(cm.2)
	:	3699.472			(cm.2)
Size of Damper	:	60.8	x	60.8	(cm.2)
	:	3700			(cm.2)

Pressure of Room After Gas Discharge				
PR	:	14.7 + Pd		(Psi)
		1bar = 14.7 Psi		
Pd	:	(134 x 1.6 xVz/A)²		(Pa)
	:	399.89		(Pa)
	:	0.06		(Psi)
		1 Psi =1.45x10^4 Pa		
PR	:	14.7 + 0.06	14.76	(Psi)
V_P		Protected Rm Volume		
V_R		Required N_2 Volume		
V_Z		Installed N_2 Volume		
CYL NO.(A)		Number of N_2 Cyl (20.3 M^3)		
O_2 (%)		Existing Oxygen Concentration		
A		Area of Pressure Relief Damper		
P		Allowable strength of enclosure P=400		
dp		Pressure drop in Duct line		
PR		Pressure of Room After Gas Discharge		
Pd		Pressure of Gas Discharge		

Fig. 6 Result of Ig-100

2. กรณีศึกษาห้องตัวอย่างปริมาตร 600.00 ลูกบาศก์เมตร หากใช้ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (FM-200) จะต้องใช้จำนวนถังก๊าซสังเคราะห์ 5 ถัง โดยมีปริมาตรแก๊ส 655.00 ลูกบาศก์เมตร จึงจะสามารถดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Fig. 7)

FM-200 FIRE EXTINGUISHING SYSTEM		
W(M)	:	10
L(M)	:	20
A(M^2)	:	200.00
H(M)	:	3.00
V	:	600.00
FUELS	:	Class C
MINIMUM DESIGN % C	:	7.30

S = Specific volume ft3/lb (m3/kg). Specific volumeof superheated FK-5-1-12 vapour at 14.69 psi(1.013bar), according to the expression:

$$S = K1 + K2 \times T$$

K_1	:	0.0664		k1 = 0.9856 (0.0664)
K_2	:	0.0002741		k2 = 0.002441 (0.0002741)
T	:	21	(°C)	T = temperature °F (°C)
S	:	0.0721561	m3/kg	
W	:	654.82	Kg	
W	:	655.00	Kg	
		1444.03	Pounds	

W = Weight of extinguishant lb (kg)
V = Volume of the hazarad to be protected ft3 (m3)
C = Design concentration (% by volume)
Actual Concentration At TheMaximum Temperature

C	:	7.302	%	NOAEL

Fig. 7 Result of FM-100

3. กรณีศึกษาห้องตัวอย่างปริมาตร 600.00 ลูกบาศก์เมตร หากใช้ระบบดับเพลิงอัตโนมัติด้วยแก๊ส (Novec1230) จะต้องใช้จำนวนก๊าซสังเคราะห์ 3 ถัง โดยมีปริมาตรแก๊ส 411.00 ลูกบาศก์เมตร จึงจะสามารถดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Fig. 8)

Novec FIRE EXTINGUISHING SYSTEM		
W(M)	:	10
L(M)	:	20
A(M^2)	:	200.00
H(M)	:	3.00
V	:	600.00
FUELS	:	Class C
MINIMUM DESIGN % C	:	4.70

S = Specific volume ft3/lb (m3/kg). Specific volumeof superheated FK-5-1-12 vapour at 14.69 psi(1.013bar), according to the expression:

$$S = K1 + K2 \times T$$

K_1	:	0.0664		k1 = 0.9856 (0.0664)
K_2	:	0.0002741		k2 = 0.002441 (0.0002741)
T	:	21	(°C)	T = temperature °F (°C)
S	:	0.0721561	m3/kg	
W	:	410.09	Kg	
W	:	411.00	Kg	
		906.10	Pounds	

W = Weight of extinguishant lb (kg)
V = Volume of the hazarad to be protected ft3 (m3)
C = Design concentration (% by volume)
Actual Concentration At TheMaximum Temperature

C	:	4.710	%	NOAEL

Fig. 8 Result of Novec

ระบบป้องกันอัคคีภัยที่นำมาพิจารณาทั้ง 3 ระบบดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้น สามารถเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และความแตกต่าง 6 ประเด็น ได้แก่ สารที่ใช้ในการดับเพลิง วิธีการที่ใช้ในการดับเพลิง ความเป็นอันตรายต่อบุคคล ความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ผลกระทบต่อทรัพย์สินข้างเคียงที่ไม่ถูกไฟไหม้ และราคาการติดตั้ง ได้ดัง Table 1

Table 1 Comparison of fire protection systems it is allowed to be installed for unauthorized product storage buildings

Topic in Comparison	Fire protection system		
	Ig-100	Novec	FM-200
Extinguishing agent	N_2	Fk-5-1-12	HFC-227ea
Fire extinguishing method	extinguish the fire by removing oxygen	Stop the chain reaction in the fire.	Stop the chain reaction in the fire.
Environmental people	not harmful to people	no harmful effect but may cause fog to obscure visibility while extinguishing fires	no harmful effect but may cause fog to obscure visibility while extinguishing fires
Environmental hazards	0 GWP (Global Warming Potential)	100 GWP (Global Warming Potential)	2,050 GWP (Global Warming Potential)
Effect on property	No	Must be cleaned after extinguishing the fire	Must be cleaned after extinguishing the fire
Installation price per 1 square meter area	120,000	160,000	140,000
Cost of maintenance from 1 fire extinguishing	9000 baht per 1 tank	2000 baht per 1kg	1500 baht per 1kg
System lifetime	If there is no work, it can be used for up to 20 years, which can generally check the external condition.	If there is no work, it can be used for up to 20 years, which can generally check the external condition.	If there is no work, it can be used for up to 20 years, which can generally check the external condition.

สรุป

การวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและเปรียบเทียบระบบป้องกันอัคคีภัย กรณีศึกษาห้องควบคุมในโรงงานจากตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลระบบป้องกันอัคคีภัย มีหลายปัจจัยที่นำเข้ามาพิจารณา โดยหากอ้างอิงตามมาตรฐานสากล ระบบป้องกันอัคคีภัยทั้ง 3 แบบ ที่เลือกนำมาเปรียบเทียบนั้น มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะสามารถดับเพลิงที่อาจจะเกิดจากเพลิงไหม้ในห้องควบคุมได้ทั้งหมด ซึ่งระบบดับเพลิงด้วยสารสะอาดดับเพลิงไนโตรเจนมีความเหมาะสมทั้งด้านราคา ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและปลอดภัยต่อคน ดังนั้นการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัย กรณีศึกษาห้องควบคุมในโรงงาน จึงควรพิจารณาเลือกระบบดับเพลิงไนโตรเจน Ig-100 เป็นทางเลือกแรก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท อิมพีเรียลไฟร์เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด และ บริษัท บริษัท สยามซินดิเคทเทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิจัยในเรื่องการออกแบบระบบดับเพลิงรูปแบบต่างๆ และขอขอบคุณ อาจารย์เมธินพัฐ บวรธรรมรัตน์ ที่ให้การอนุเคราะห์ในด้านเทคนิคการออกแบบระบบดับเพลิง ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์นี้ เกิดจากการสนับสนุน ดูแลเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ ผศ.ดร อนุเผ่า อบแพทย์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาตลอดจนแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ทีนี้

เอกสารอ้างอิง

ชาญชัย ศาสนะประดิษฐ. 2548. การออกแบบและเปรียบเทียบระบบป้องกันอัคคีภัย กรณีศึกษาห้องเก็บเอกสารของ บริษัท พรอคเตอร์ แอนด์ แกมเบิล แมนูแฟคเจอริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บริษัท ไฟร์เทค อินโนเวชั่น จำกัด, 2546. คู่มือด้านเทคนิคสำหรับการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัย. ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

ปรเมศวร์ เพชรทองด้วง. 2547. โปรแกรมออกแบบระบบสารสะอาดดับเพลิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. 2552. การป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงาน พ.ศ. 2552.

พิชญะ จันทรานุวัฒน์. 2547. การป้องกันอัคคีภัยในโรงงานอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์ และคณะ, 2546. คู่มือออกแบบระบบดับเพลิงอัตโนมัติแบบสารสะอาด HFC-227ea Clean Agent Fire Suppression System. บริษัท แอนตี้ไฟร์ จำกัด. กรุงเทพฯ.

วิภารัตน์ โพธิ์ขี. 2548. การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของระบบป้องกันอัคคีภัย: กรณีศึกษาห้องควบคุมของบริษัท บางกอกคริสตัล จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2545. มาตรฐานการป้องกันอัคคีภัย. มาตรฐานว.ส.ท. 3002-45.

National Fire Protection Association. 2022. NFPA 72 National Fire Alarm. National FireProtection Association. Massachusetts, MA, USA.

National Fire Protection Association. 2022. NFPA 2001 Standard on Clean Agent FireExtinguishing Systems. National Fire Protection Association. Massachusetts, MA, USA.

การเปรียบเทียบการประมาณราคาต่อหน่วยพื้นที่กรณีศึกษาอาคารโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต

Comparison of cost estimation per unit area case study of production building

ณัฏฐนันท์ เสนีย์วงศ์ ณ อยุธยา*, **อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์, แพรวา วิจิตรธนสาร**

Natthanun Saneewong Na Ayudhya*, Anuphao Aobpaet, Soravis Supavetch, Parewa Vijitthanasarn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Natthanun.s@ku.th

บทคัดย่อ

การประมาณราคาค่าก่อสร้างขั้นต้นเมื่อใช้วิธีการนำราคาต่อหน่วยพื้นที่คูณกับพื้นที่รวมของอาคารเป็นการประมาณราคาที่ทำได้รวดเร็วที่ใช้ฐานข้อมูลโครงการในอดีต ผลลัพธ์ที่ได้นี้อาจมีค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจเกิดจากผู้ประมาณราคามีข้อมูลไม่เพียงพอ หรือขาดประสบการณ์ในการประมาณราคา โดยเฉพาะอาคารที่มีความหลากหลายและซับซ้อนของโครงการ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์จะทำการรวบรวมข้อมูลราคาโครงการก่อสร้างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต จำนวน 15 โครงการ และศึกษาเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยพื้นที่ โดยกำหนดรูปแบบการศึกษา 4 รูปแบบ จากค่าเฉลี่ยหมวดหมู่งานหลักทั้ง 15 โครงการ คือ 1) หาค่าเฉลี่ยโดยไม่แบ่งประเภทข้อมูล 2) หาค่าเฉลี่ยแบ่งตามสถานที่ 3) หาค่าเฉลี่ยแบ่งตามประเภทธุรกิจ และ 4) หาค่าเฉลี่ยแบ่งตามปีที่ก่อสร้าง ซึ่งผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า หากแทนค่าราคาต่อหน่วยพื้นที่จากการศึกษาเปรียบเทียบกับราคาต่อหน่วยพื้นที่การประมาณราคาละเอียดของโครงการตัวอย่าง ผลสรุปคือบางโครงการมีค่าก่อสร้างสูงจากค่าก่อสร้างจริง ซึ่งมาจากปัจจัยหลายอย่างทั้งด้านราคาวัสดุ รูปแบบเฉพาะของโครงการ และปัจจัยอื่น ๆ การจะนำไปใช้ประมาณราคาจึงสามารถนำไปใช้ในช่วงการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการได้ แต่จำเป็นต้องปรับปรุงราคาเมื่อได้รับข้อมูลของโครงการที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การประมาณราคาขั้นต้น, ราคาต่อหน่วยพื้นที่, อาคารโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต

Abstract

Preliminary cost estimation often multiplies the cost per unit area by gross floor area (GFA). This method of cost estimation can be done quickly for decision-making. However, this result can be highly inaccurate. It may be due to insufficient data from the estimators or lack of experience in estimating the cost, especially the complex and diverse buildings of the project. The purpose of this study is to collect cost information for 15 production building construction projects and to study the cost per unit area. There are 4 study models from the average of 15 project work categories: 1) Find the average without dividing data, 2) Find the average divided by location, 3) Find the average divided by type, and 4) find the average divided by year of construction. The results of this study found that if substituting the cost per unit area obtained from the study with the detailed cost per unit area of the sample project. The result shows that some projects have high construction costs from the actual construction costs, which comes from many factors, including the price of materials and the specific form of the project. The cost estimation can therefore be used during the feasibility study and updated when there is more project information.

Keywords: Cost per unit area, Preliminary cost estimation, Production building

คำนำ

การประมาณราคามีความหมาย เป็นการวิเคราะห์ การให้ความเห็น การพยากรณ์ หรือการคาดหมายล่วงหน้า ไม่ใช่ราคาที่แท้จริง หรือถูกต้องตรงกับราคาของค่าก่อสร้างจริงเป็นเพียงราคาโดยประมาณแต่ใกล้เคียงฉะนั้นการประมาณราคาค่าก่อสร้างจึงเป็นกระบวนการหรือวิธีการเพื่อให้ได้มาซึ่งราคาค่าก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด (มนัสพาสน์, 2549; ลักขณา, 2552) ซึ่งการประมาณราคาค่าก่อสร้างเป็นการประมาณปริมาณวัสดุ เวลา หรือค่าใช้จ่ายที่ใช้สำหรับดำเนินการก่อสร้างให้เสร็จสิ้นตามกำหนดการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจดำเนินการก่อสร้าง เช่นการจัดประกวดราคา การกำหนดราคาค่าก่อสร้าง การกำหนดงบประมาณการใช้จ่ายและการควบคุมปริมาณการใช้งานที่แท้จริง เป็นต้น (สุพจน์, 2550; Taylor and Francis, 2010; Taylor and Francis, 2020) หากจำแนกการประมาณราคาค่าก่อสร้างตามระดับความละเอียดและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ การประมาณราคาขั้นต้นและการประมาณราคาละเอียด ซึ่งการประมาณราคาแต่ละวิธีต่างมีหลักการและรายละเอียดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน รวมทั้งความรู้ความชำนาญของผู้ประมาณราคาในการวิเคราะห์พร้อมทั้งจำแนกองค์ประกอบของราคาและปัจจัยที่มีผลต่อราคาค่าก่อสร้าง เช่น แหล่งวัสดุ สภาพแวดล้อมของสถานที่ก่อสร้าง สภาพอากาศ การวางแผนงานก่อสร้าง การดำเนินการก่อสร้าง การซ่อมบำรุงเครื่องจักร และการหมุนเวียนของเงินทุน เป็นต้น (สุชิน, 2554; วิสูตร, 2557) ซึ่งในช่วงการประมาณราคาขั้นต้น เป็นช่วงที่มีรายละเอียดของข้อมูลโครงการที่ไม่เพียงพอต่อการประมาณราคาละเอียด ดังนั้นการนำวิธีการประมาณราคาต่อหน่วยพื้นที่คูณกับพื้นที่รวมของอาคารเป็นการประมาณราคาที่ทำได้รวดเร็วโดยใช้ฐานข้อมูลโครงการในอดีต วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (2560) ได้จัดทำรายละเอียดของข้อมูลต้นทุนงานก่อสร้างไว้เป็นหมวดหมู่ เพื่อให้เข้าใจและนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย มูลนิธิประเมินค่านายหน้าแห่งประเทศไทย (2565) ได้จัดทำราคาค่าก่อสร้างตามรายการประเภททรัพย์สินที่กำหนดราคามาตรฐานโดยใช้ตัวเลขเป็นราคาบาท/ตารางเมตร ซึ่งองค์ประกอบมาตรฐานราคาประกอบด้วย ค่าวัสดุก่อสร้างในงานโครงสร้าง งานสถาปัตยกรรม งานระบบประกอบอาคาร ซึ่งราคาต่อหน่วยพื้นที่ดังกล่าวจัดทำเป็นฐานข้อมูลในทุก ๆ ปี

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการประมาณราคาขั้นต้นมีความสำคัญในการดำเนินการโครงการก่อสร้าง เป็นตัวที่สามารถชี้วัดว่าจะดำเนินโครงการต่อไปได้หรือไม่ ในข้อจำกัดที่ต้องแข่งขันกับเวลา การนำวิธีการประมาณราคาต่อหน่วยพื้นที่มาใช้เป็นเครื่องมือจำเป็นต้องมีฐานข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้ การศึกษาครั้งนี้จะทำการรวบรวมข้อมูลราคาโครงการที่เป็นโครงการก่อสร้างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิตในระหว่างปีพ.ศ. 2559-2563 จำนวน 15 โครงการ และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อจัดทำข้อมูลราคาต่อหน่วยพื้นที่ ผลการศึกษาครั้งนี้จะช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการประมาณราคา โดยจัดเป็นระบบฐานข้อมูลรหัสต้นทุนก่อสร้างและลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับการดำเนินการโครงการในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อนำระบบข้อมูลราคาต่อหน่วยพื้นที่ไปใช้ในการตั้งงบประมาณในการก่อสร้างโครงการในอนาคต และมีฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการประมาณราคาขั้นต้น
2. เพื่อที่ใช้จัดเก็บฐานข้อมูลโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต

วิธีการดำเนินงานวิจัย

รูปแบบการดำเนินงานประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้ ตาม Fig. 1

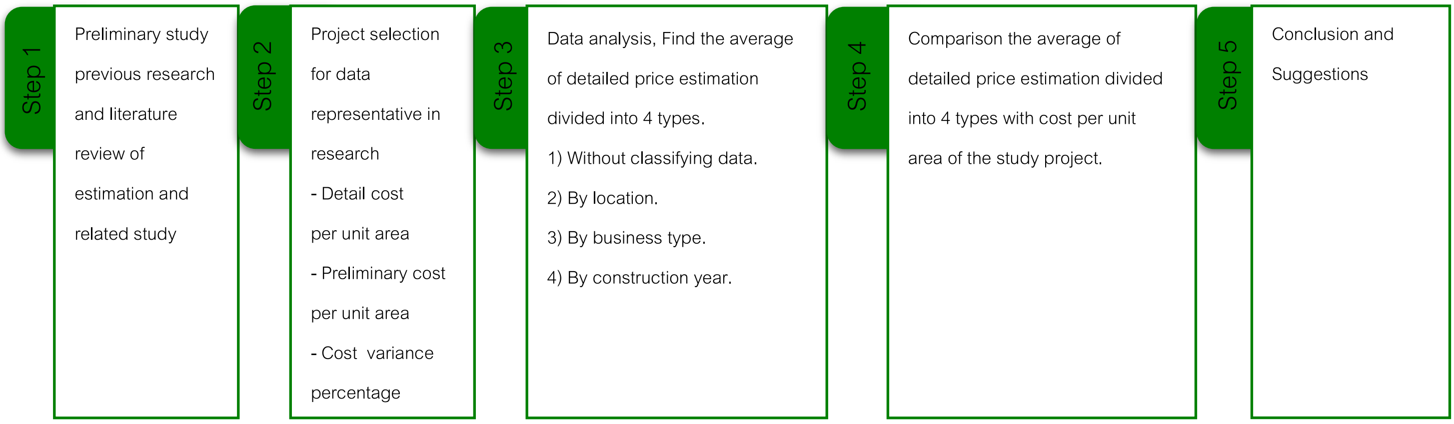


Fig. 1 Research methodology

เก็บรวบรวมกลุ่มข้อมูลโครงการตัวอย่างการประมาณราคาละเอียดกับการประมาณราคาขั้นต้น

เก็บรวบรวมโครงการจากประสบการณ์ทำงานในการทำหน้าที่การประมาณราคาโครงการก่อสร้างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยงานโรงงานประเภทคลังเก็บสินค้า ศูนย์จำหน่ายสินค้าอุปโภค-บริโภค และงานโครงการโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต

คัดเลือกโครงการเพื่อเป็นตัวแทนในการศึกษาวิจัย

คัดเลือกโครงการที่สนใจในการศึกษาวิจัยโดยเลือกโครงการโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิตโครงการประเภทนี้มีความหลากหลายและซับซ้อนของเนื้องานตามแต่ละโครงการ ซึ่งทำให้ยากต่อการประมาณราคาแล้วหาราคาต่อหน่วยพื้นที่จากข้อมูลการประมาณราคาละเอียดและการประมาณราคาขั้นต้น หาราคาต่อหน่วยพื้นที่โครงการจากการประมาณละเอียด ($CA_{[D,j]}$) (วสท, 2560) จากมูลค่าโครงการประมาณราคาละเอียด ($E_{[D,j]}$) หารด้วยพื้นที่รวม (GFA) โดยที่ j แทนโครงการตัวอย่างที่ 1–15 ตาม Equation 1

$$\text{Detail cost per unit area } (CA_{[D,j]}) = \frac{\text{Detail cost estimation } (E_{[D,j]})}{\text{Gross floor area } (GFA_{[j]})} \quad (1)$$

หาราคาต่อหน่วยพื้นที่โครงการจากการประมาณขั้นต้น ($CA_{[P,j]}$) (วสท, 2560) จากมูลค่าโครงการประมาณราคาขั้นต้น ($E_{[P,j]}$) หารด้วยพื้นที่รวม (GFA) โดยที่ j แทนโครงการตัวอย่างที่ 1–15 ตาม Equation 2

$$\text{Preliminary cost per unit area} (CA_{[P,j]}) = \frac{\text{Preliminary cost estimation } (E_{[P,j]})}{\text{Gross floor area } (GFA_{[j]})} \quad (2)$$

เปรียบเทียบราคาต่อหน่วยพื้นที่ละเอียดกับราคาต่อหน่วยพื้นที่ขั้นต้น (Taylor and Francis, 2020) โดยที่ Cost variance percentage (CV%) ตาม Equation 3

$$CV\% = \frac{(CA_{[D,j]} - CA_{[P,j]})}{CA_{[D,j]}} \times 100 \quad (3)$$

วิเคราะห์ข้อมูลแยกตามรูปแบบ 4 รูปแบบดังนี้

รูปแบบที่ 1. หาค่าเฉลี่ยโดยไม่แบ่งประเภทข้อมูล

หาค่าเฉลี่ยการประมาณราคาละเอียด ($\overline{CA}_{[D]}$) จากจำนวนตัวอย่าง (*n*) 15 โครงการ (กัลยา, 2560) ตาม Equation 4

$$\overline{CA}_{[D]} = \frac{\sum_{j=1}^{j=15} (CA_{[D,j]})}{n} \tag{4}$$

รูปแบบที่ 2. หาค่าเฉลี่ยแบ่งตามสถานที่

หาค่าเฉลี่ยการประมาณราคาละเอียดโดยแบ่งประเภทข้อมูลราคาต่อหน่วยพื้นที่ตามหมวดหมู่งาน ($G_{[i,D]}$) โดยกำหนดให้ *i* แทนด้วย “*a*” คือราคาต่อหน่วยพื้นที่หมวดงานโครงสร้าง, “*b*” คือราคาต่อหน่วยพื้นที่หมวดงานสถาปัตยกรรม , “*c*” คือราคาต่อหน่วยพื้นที่หมวดงานสุขาภิบาล, “*d*” คือราคาต่อหน่วยพื้นที่หมวดงานไฟฟ้า, “*e*” คือราคาต่อหน่วยพื้นที่หมวดงานสื่อสาร และ“*f*” คือราคาต่อหน่วยพื้นที่หมวดงานเครื่องกล และค่าเฉลี่ยการประมาณราคาละเอียดตามสถานที่ก่อสร้างคือภาคเหนือ ($\overline{CA}_{[N]}$), ภาคตะวันออก($\overline{CA}_{[W]}$) และภาคกลาง ($\overline{CA}_{[C]}$) ตาม Equations 5–7

$$\overline{CA}_{[N]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D_{[N]}}) \tag{5}$$

$$\overline{CA}_{[W]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D_{[W]}}) \tag{6}$$

$$\overline{CA}_{[C]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D_{[C]}}) \tag{7}$$

รูปแบบที่ 3. หาค่าเฉลี่ยแบ่งตามประเภทธุรกิจ

หาค่าเฉลี่ยการประมาณราคาละเอียดตามประเภทธุรกิจ คือผลิตโลหะและบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม ($\overline{CA}_{[B1]}$), ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ($\overline{CA}_{[B2]}$) และผลิตอาหารสัตว์ตาม ($\overline{CA}_{[B3]}$), Equations 8–10

$$\overline{CA}_{[B1]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D_{[B1]}}) \tag{8}$$

$$\overline{CA}_{[B2]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D_{[B2]}}) \tag{9}$$

$$\overline{CA}_{[B3]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D_{[B3]}}) \tag{10}$$

รูปแบบที่ 4. หาค่าเฉลี่ยแบ่งตามปีที่ก่อสร้าง

หาค่าเฉลี่ยการประมาณราคาละเอียดตามปีที่ก่อสร้าง คือ ช่วงปี พ.ศ. 2559 ($\overline{CA}_{[Y1]}$) , พ.ศ. 2560 ($\overline{CA}_{[Y2]}$), พ.ศ. 2561($\overline{CA}_{[Y3]}$), พ.ศ. 2562 ($\overline{CA}_{[Y4]}$), พ.ศ. 2563 ($\overline{CA}_{[Y5]}$) ตาม Equations 11–15

$$\overline{CA}_{[Y1]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D[_{Y1}]}) \tag{11}$$

$$\overline{CA}_{[Y2]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D[_{Y2}]}) \tag{12}$$

$$\overline{CA}_{[Y3]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D[_{Y3}]}) \tag{13}$$

$$\overline{CA}_{[Y4]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D[_{Y4}]}) \tag{14}$$

$$\overline{CA}_{[Y5]} = \sum_{i=a}^{i=f} (\overline{G}_{i,D[_{Y5}]}) \tag{15}$$

ผลการศึกษาวิจัย

จากรูปแบบการศึกษาวิจัยทั้ง 4 รูปแบบผลของค่าเฉลี่ยราคาต่อหน่วยพื้นที่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลราคาต่อหน่วยพื้นที่จากการประมาณราคาละเอียด และขั้นต้นแสดงผลเป็นกราฟเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยพื้นที่พร้อมทั้งแสดงความคาดเคลื่อนก่อนและหลังการวิจัย ได้ดังนี้

ผลจากการศึกษาวิจัย จากรูปแบบที่ 1. หาค่าเฉลี่ยโดยไม่แบ่งประเภทข้อมูลได้ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยราคาต่อหน่วยพื้นที่คือ 24,111.82 บาทต่อตารางเมตร พร้อมทั้งแสดงความคาดเคลื่อนก่อนและหลังการวิจัยตาม Fig. 2

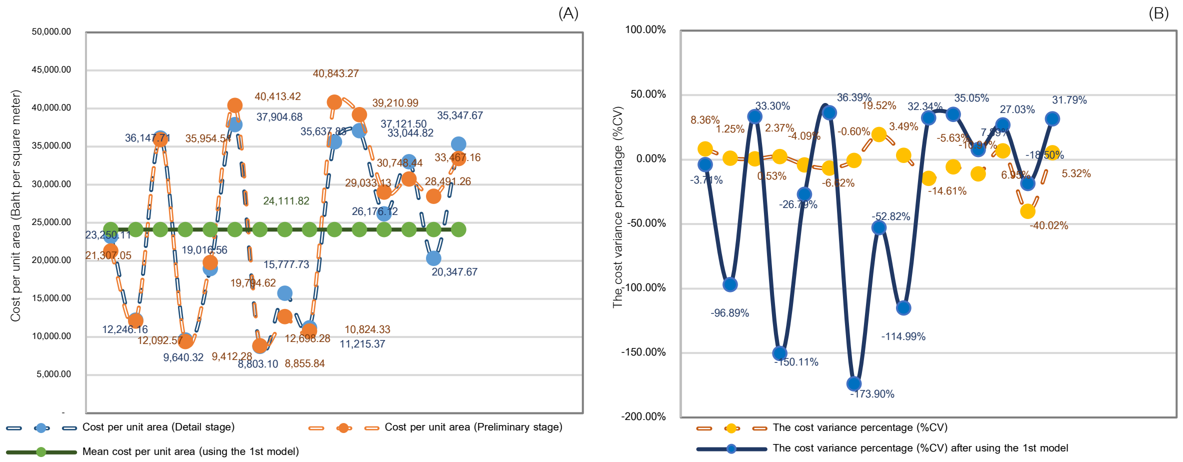


Fig. 2 (A) Comparison of cost per unit area 1st model; (B) The cost variance percentage (%CV) 1st model

ผลจากการศึกษาวิจัย จากรูปแบบที่ 2. หาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามสถานที่ คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคกลางได้ผลลัพธ์ราคาต่อหน่วยพื้นที่ออกเป็น 3 ค่าคือ 17,748.14, 25,488.60 และ 24,842.25 บาทต่อตารางเมตร ตาม Fig. 3

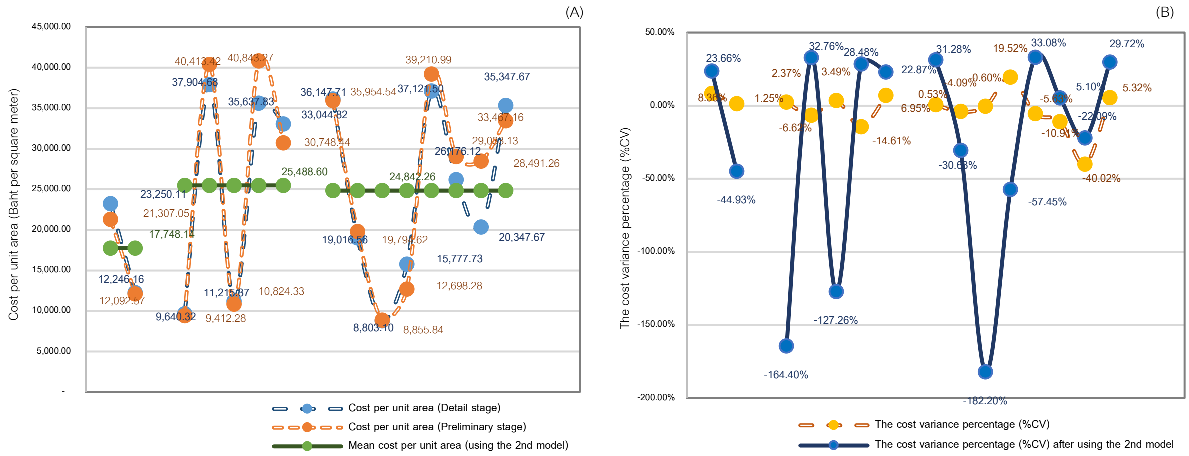


Fig. 3 (A) Comparison of cost per unit area 2nd model; (B) The cost variance percentage (%CV) 2nd model

ผลจากการศึกษาวิจัย จากรูปแบบที่ 3. หาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามประเภทธุรกิจ คือ ผลิตโลหะและบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และผลิตอาหารสัตว์ได้ผลลัพธ์ราคาต่อหน่วยพื้นที่ออกเป็น 3 ค่าคือ 13,454.92, 27,388.29 และ 28,196.60 บาทต่อตารางเมตรตาม Fig. 4

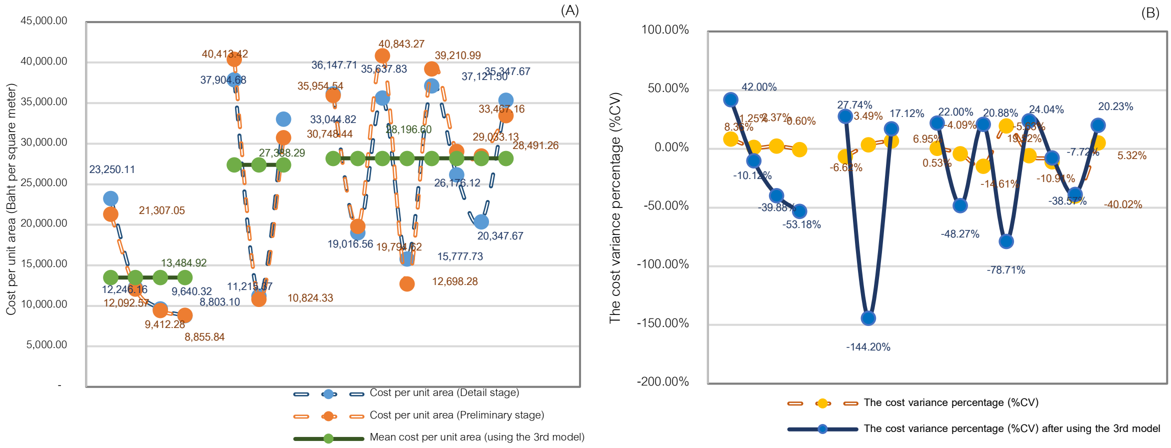


Fig. 4 (A) Comparison of cost per unit area 3rd model; (B) The cost variance percentage (%CV) 3rd model

ผลจากการศึกษาวิจัย จากรูปแบบที่ 4. หาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามปีที่ก่อสร้าง คือ ช่วงปี พ.ศ. 2559–2563 ได้ผลลัพธ์ราคาต่อหน่วยพื้นที่ออกเป็น 5 ค่าคือ 17,748.14, 22,894.02, 28,460.62, 22,455.28 และ 29,580.05 บาทต่อตารางเมตรตาม Fig. 5

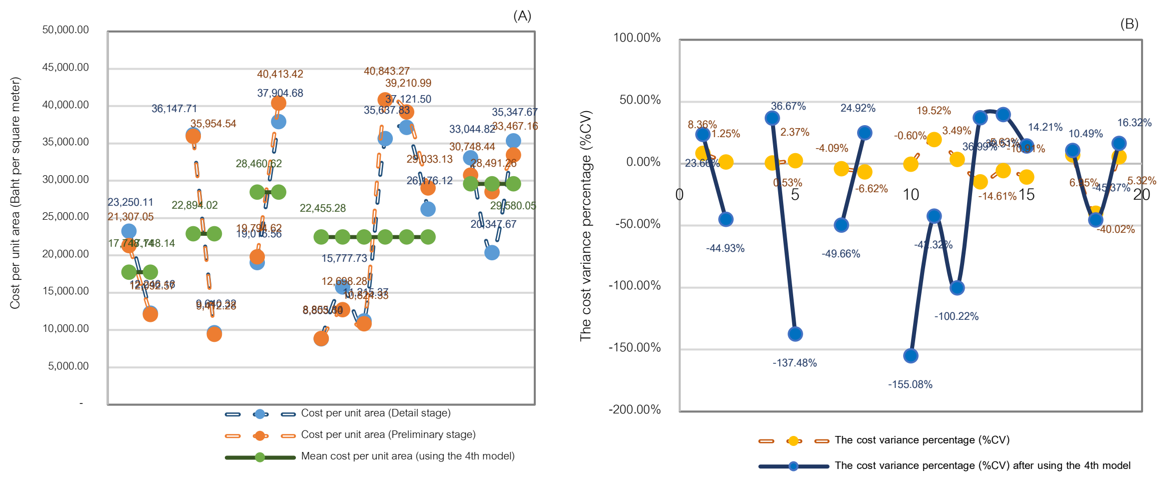


Fig. 5 (A) Comparison of cost per unit area 4th model; (B) The cost variance percentage (%CV) 4th model

สรุปและวิจารณ์ผล

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบก่อนและหลังการหาค่าเฉลี่ยโดยการกำหนดรูปแบบ ทั้ง 4 รูปแบบ จะได้ค่าเฉลี่ยรูปแบบที่ 1 คือ 24,111.82 บาทต่อตารางเมตร รูปแบบที่ 2 คือ 17,748.14, 25,488.60, และ 24,842.25 บาทต่อตารางเมตร รูปแบบที่ 3 คือ 13,454.92, 27,388.29, และ 28,196.60 บาทต่อตารางเมตร รูปแบบที่ 4 คือ 17,748.14, 22,894.02, 28,460.62, 22,455.28, และ 29,580.05 บาทต่อตารางเมตร โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) การกำหนดราคาต่อหน่วยพื้นที่ของค่าก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต จากการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยโครงการตัวอย่าง สามารถนำไปกำหนดมูลค่าโครงการในส่วนขั้นต้นของโครงการในอนาคตได้ เพื่อกำหนดขอบเขตการออกแบบของโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิต

2) การเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยพื้นที่ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามสถานที่ ผลปรากฏว่าโครงการก่อสร้างในสถานที่ภาคเหนือมีค่าเฉลี่ยราคาต่อหน่วยพื้นที่ที่น้อยกว่าแต่ส่วนใหญ่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

3) การเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยพื้นที่ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามประเภทธุรกิจผลปรากฏว่าโครงการก่อสร้างมีค่าเฉลี่ยราคาต่อหน่วยพื้นที่มีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เกิดจากการออกแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของประเภทธุรกิจที่แตกต่างกัน เช่นประเภทธุรกิจผลิตโลหะและบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม มีความต้องการการออกแบบที่ไม่ซับซ้อนของเนื้องานจึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าโครงการที่มีการออกแบบที่ซับซ้อนและเป็นโครงการที่มีความหลากหลายของเนื้องานก่อสร้าง

4) การเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยพื้นที่ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามปีที่ก่อสร้างผลปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยโครงการก่อสร้างมีแนวโน้มค่อนข้างสูงขึ้นทุกปีอาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ราคาวัสดุก่อสร้างมีการปรับราคาต่อเนื่อง ค่าจ้างแรงงานที่สูงขึ้นเนื่องจากขาดแรงงานก่อสร้าง ปัญหาด้านเศรษฐกิจ เป็นต้น

งานวิจัยครั้งนี้สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในการกำหนดราคาขั้นต้นของโครงการที่มีลักษณะขอบเขตงานประเภทโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงผลิตได้เพื่อใช้กำหนดการออกแบบโครงการในอนาคตโดยจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับประเภทธุรกิจก่อสร้างเป็นพิเศษดังจะเห็นได้จากผลงานวิจัย เนื่องจากค่าเฉลี่ยราคาต่อหน่วยพื้นที่มีความแตกต่างกันมากรวมไปถึงมีการปรับราคาของสินค้า/ค่าแรงงานทุกปี ดังนั้นหากมีการนำผลที่ได้ไปใช้ควร

พิจารณาปรับเพิ่ม-ลดราคาต่อหน่วยพื้นที่ในโครงการที่มีความคล้ายคลึงกับประเภทโครงการที่ได้จัดทำทั้ง 4 รูปแบบ เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2560. หลักสถิติ, พิมพ์ครั้งที่ 15. สำนักพิมพ์ โรงพิมพ์สามลดา. กรุงเทพฯ.

วิสูตร จิระดำเกิง, 2557. การประมาณราคาก่อสร้าง, ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4

มูลนิธิประเมินค่า-นายหน้าแห่งประเทศไทย. 2565. ราคาประเมินค่าก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2562–2565 กำหนดโดยมูลนิธิประเมินค่า-นายหน้าแห่งประเทศไทย

ลักขณา อรุณเรือง, 2552, การลดความแตกต่างของการประมาณราคากับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริง: กรณีศึกษา บริษัทรับเหมาติดตั้งระบบไฟฟ้าตัวอย่าง

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2560. มาตรฐานรหัสต้นทุนก่อสร้างงานอาคาร พ.ศ. 2555. กรุงเทพฯ

สุพจน์ อุปริมาตร, 2550, การศึกษาเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างและการวิเคราะห์ปัจจัยการเสนอราคางานก่อสร้างอาคารของภาครัฐและเอกชน.

AACE International Recommended Practice No. 18R-97. 2005. Cost Estimate Classification System - As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries.

Taylor and Francis. 2010. Cost Engineering for manufacturing: Current and future research.

Taylor and Francis. 2020. Improving cost estimation in construction project.

การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่เพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินจังหวัดอ่างทอง

Potential surface analysis to improve the land consolidation project in Ang thong province

พงศ์ดนัย พันธุ*, **พันโท สรวิศ สุภเวชย์**, **อนุเผ่า อบแพทย์**

Pongdanai Panthu*, Soravis Supavetch, Anuphao Aobpaet

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pongdanai.pa@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินในจังหวัดอ่างทอง เนื่องด้วยแผนแม่บทการจัดรูปที่ดินไม่ได้ระบุพื้นที่ศักยภาพในการปรับปรุงโครงการ มีเพียงการศึกษาปัจจัยที่ต้องใช้พิจารณาในการจัดลำดับความสำคัญของการเลือกพื้นที่ปรับปรุงโครงการเดิมเท่านั้น และจากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ศักยภาพเทียบกับแผนงานปรับปรุงของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องพบว่า พื้นที่เหมาะสมมากที่สุดในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินตามผลการวิเคราะห์ อยู่ในตำบลจำลอง อำเภอแสวงหาสูงที่สุด ส่วนพื้นที่ตามแผนงานปรับปรุงโครงการของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกำหนดให้เข้าปรับปรุงโครงการเดิมก่อนเป็นอันดับแรก อยู่ในตำบลบ้านพราน อำเภอแสวงหา ซึ่งไม่ตรงกับผลการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ โดยใช้ปัจจัยสำหรับทำการศึกษา 4 ปัจจัย จากแผนแม่บทการจัดรูปที่ดิน ดังนี้ อายุใช้งานโครงการ สภาพการเกิดภัยธรรมชาติในพื้นที่โครงการ อัตราส่วนพื้นที่จัดรูปที่ดินต่อพื้นที่ชลประทาน และพื้นที่รับประโยชน์ต่อครัวเรือน นำมาซ้อนทับข้อมูลทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อหาพื้นที่เหมาะสม

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่, โครงการจัดรูปที่ดิน, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

The purpose of this research was to study the suitable area for land consolidation project improvement in Ang Thong Province. Since the land consolidation master plan does not specify potential areas for project improvement. There is only a study of the factors that must be considered in prioritizing the selection of redevelopment areas for the original project and from the results of the analysis of potential areas compared to the improvement plans of relevant agencies, it was found that the most suitable area to improve the land readjustment project according to the analysis results. Located in Chamlong Sub-district, Saweangha District, the highest part of the area according to the project improvement plan of the relevant agencies, it is determined that the original project will be renovated first. Located in Ban Phran Sub-district, Saweangha District, which does not match the results of the spatial potential analysis.

Keywords: Geographic information system, Land consolidation project, Potential surface analysis

คำนำ

ปัจจุบัน ปัญหาในการบริหารจัดการโครงการจัดรูปที่ดินที่ผ่านมา ในขั้นหลังการก่อสร้างเสร็จแล้ว จะส่งมอบภารกิจต่อให้กับกลุ่มเกษตรกรผู้ใช้น้ำรับดูแลบำรุงรักษาต่อไป ส่วนการจัดการด้านน้ำจะส่งมอบภารกิจให้โครงการชลประทานจังหวัดหรือโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา ซึ่งภายหลังจากรับมอบภารกิจ จะจัดตั้งกลุ่มผู้ใช้น้ำ และมีการฝึกอบรมพนักงานส่งน้ำและเกษตรกร ในการวางแผนการปลูกพืช วางแผนส่งน้ำและบำรุงรักษาคูน้ำ แต่การบริหารจัดการน้ำยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากขาดเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมในการวางแผนการส่งน้ำ และการประเมินผลเพื่อปรับปรุงโครงการ ดังนั้นการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินที่ได้ดำเนินการมาแล้วในอดีต ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะการที่คูส่งน้ำ คูระบายน้ำ ถนนทางลำเลียงและอาคารประกอบ ในโครงการจัดรูปที่ดินสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการรั่วซึมและตื้นเขินจากการใช้งานในระยะยาว จะส่งผลให้ผลผลิตต่อไร่เพิ่มขึ้นและใช้พื้นที่ปลูกพืชได้ปีละไม่น้อยกว่า 2 ครั้ง ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น และจากรายได้ที่เพิ่มขึ้น สามารถปรับปรุงที่อยู่อาศัย ส่งบุตรหลานไปศึกษาให้สูงขึ้น ซื้ออุปกรณ์เพื่อการเกษตรและสิ่งจำเป็นสำหรับครัวเรือน ตลอดจนมีโอกาสเดินทางไปต่างจังหวัดเพื่อกิจการต่างๆ มากขึ้น ทำให้เกิดความเจริญและความสงบสุขในท้องถิ่นดีขึ้น มีผลให้เสถียรภาพของประเทศดีขึ้นตามไปด้วย

จากเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะศึกษาการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่เพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินในจังหวัดอ่างทอง ประกอบกับการนำเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ มาใช้เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์และแสดงผล ซึ่งสามารถทราบพิกัดและขอบเขตที่ชัดเจนได้ รวมถึงการบูรณาการระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System, GIS) มาใช้ในกระบวนการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยใช้เกณฑ์การจัดลำดับความสำคัญของการปรับปรุงโครงการ จัดรูปที่ดินตามแผนแม่บทการจัดรูปที่ดิน (สำนักงานจัดรูปที่ดินกลาง, 2559) ประกอบกับหลักการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ (Potential Surface Analysis, PSA) เพื่อให้เกิดประโยชน์แก่เกษตรกรในพื้นที่โครงการจัดรูปที่ดิน จังหวัดอ่างทอง

อุปกรณ์และวิธีการ

การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแนวคิด ทฤษฎีจากเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแนวคิด ทฤษฎีจากเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยการวิเคราะห์เอกสาร และการสำรวจเก็บข้อมูลในพื้นที่ศึกษาการหาพื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน โดยมีการรวบรวมเอกสารต่างๆ ดังต่อไปนี้ 1) อายุใช้งานโครงการหรืออายุของโครงการที่สร้างแล้วเสร็จ 2) สภาพการเกิดภัยพิบัติธรรมชาติในพื้นที่โครงการหรือสถิติการเกิดน้ำท่วมในพื้นที่โครงการ 3) อัตราส่วนพื้นที่จัดรูปที่ดินต่อพื้นที่ชลประทาน 4) พื้นที่รับประโยชน์ต่อครัวเรือน

การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่เพื่อหาพื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน

ในการกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินนั้นเป็นการนำเอาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการทำการศึกษาหาพื้นที่ที่มีศักยภาพหรือพื้นที่ที่มีความเหมาะสม ในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน มีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

การศึกษาข้อมูลต่างๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการกำหนดปัจจัยความเหมาะสมของพื้นที่เพื่อหาพื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน

ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ จากงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกพื้นที่เพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน ประกอบด้วย 4 ปัจจัย สำคัญ 1) อายุใช้งานโครงการ 2) สภาพการเกิดภัยพิบัติธรรมชาติในพื้นที่โครงการ 3) อัตราส่วนพื้นที่จัดรูปที่ดินต่อพื้นที่ชลประทาน 4) พื้นที่รับประโยชน์ต่อครัวเรือน

การกำหนดค่าน้ำหนักและค่าคะแนนของปัจจัยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน

ผู้วิจัยเลือกปัจจัยวิเคราะห์ในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินจากแผนแม่บทการจัดรูปที่ดิน (สำนักงานจัดรูปที่ดินกลาง, 2559) มาใช้ในการศึกษา ซึ่งมีการพิจารณาปัจจัยในการจัดลำดับความสำคัญของโครงการจากลักษณะทางกายภาพของโครงการและปัญหาที่เกิดหลังจากมีการก่อสร้างโครงการ จากนั้นผู้เชี่ยวชาญได้กำหนดปัจจัย คะแนนและค่าถ่วงน้ำหนักในการพิจารณาความเหมาะสมในแต่ละปัจจัย โดยดำเนินตามหลักการวิเคราะห์แบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Analysis: MCA) โดยใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process, AHP) ในการหาค่าถ่วงน้ำหนักตัวแปร 4 ปัจจัย ประกอบด้วย

1) อายุใช้งานโครงการ พิจารณาอายุของโครงการที่สร้างแล้วเสร็จ โดยใช้ข้อมูลจาก สำนักงานจัดรูปที่ดินและจัดระบบน้ำเพื่อเกษตรกรรมที่ 25 หากโครงการใดก่อสร้างมานาน โครงสร้างของระบบส่งน้ำอาจจะมีความชำรุดเสียหายมาก ก็จะพิจารณาให้คะแนนมากที่สุด โดยแบ่งคะแนนออกเป็น 3 ระดับ คือ

<u>เกณฑ์การให้คะแนน</u> (ค่าถ่วงน้ำหนักรวม 51)

- ตั้งแต่ 30 ปีขึ้นไป 5 คะแนน
- มากกว่า 10 ปี แต่ไม่ถึง 30 ปี 3 คะแนน
- น้อยกว่า 10 ปี 1 คะแนน

2) สภาพการเกิดภัยธรรมชาติในพื้นที่โครงการ พิจารณาสถิติการเกิดน้ำท่วมในพื้นที่โครงการ โดยใช้ข้อมูลจากกลุ่มวางแผนการจัดการที่ดินในพื้นที่เสี่ยงภัยทางการเกษตร กรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งถือเป็นความเสี่ยงกับโครงสร้างของระบบชลประทานเพราะจะเกิดการเสียหายเนื่องจากการเกิดน้ำท่วม หากเกิดน้ำท่วมบ่อยครั้งก็จะสร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างมาก จึงควรพิจารณาเข้าไปปรับปรุงโครงการ โดยแบ่งคะแนนออกเป็น 3 ระดับ คือ

<u>เกณฑ์การให้คะแนน</u> (ค่าถ่วงน้ำหนักรวม 11)

- พื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากเป็นประจำ โดยประสบน้ำท่วมขังไม่เกิน 8-10 ครั้ง ในรอบ 10 ปี 5 คะแนน
- พื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากบ่อยครั้ง โดยประสบน้ำท่วมขังไม่เกิน 4-7 ครั้ง ในรอบ 10 ปี 3 คะแนน
- พื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากเป็นครั้งคราว โดยประสบน้ำท่วมขังไม่เกิน 3 ครั้ง ในรอบ 10 ปี 1 คะแนน

3) อัตราส่วนพื้นที่จัดรูปที่ดินต่อพื้นที่ชลประทาน โดยมีหลักในการพิจารณาว่า โครงการใดที่มีพื้นที่โครงการเดิมมากกว่าย่อมมีจำนวนเกษตรกรผู้ได้รับประโยชน์มากตามไปด้วย ก็จะพิจารณาให้คะแนนมากที่สุด โดยแบ่งคะแนนออกเป็น 3 ระดับ คือ

<u>เกณฑ์การให้คะแนน</u> (ค่าถ่วงน้ำหนักรวม 25)

- ตั้งแต่ 60% ขึ้นไป 5 คะแนน
- มากกว่า 30% แต่ไม่ถึง 60% ปี 3 คะแนน

- น้อยกว่า 30% ปี 1 คะแนน

4) พื้นที่รับประโยชน์ต่อครัวเรือน พิจารณาถึงพื้นที่รับประโยชน์ต่อจำนวนครัวเรือนของเกษตรกรที่ได้รับประโยชน์จากการพัฒนาโครงการว่ามีปริมาณเท่าใดที่โดยตามหลักควรจะให้เกิดประโยชน์ต่อเกษตรกรส่วนรวมสูงที่สุด ซึ่งใช้ข้อมูลจากกรมส่งเสริมการเกษตร โดยแบ่งคะแนนออกเป็น 5 ระดับ คือ

<u>เกณฑ์การให้คะแนน</u> (ค่าถ่วงน้ำหนักรวม 13)

- มากกว่า 30 ไร่ต่อครัวเรือน 5 คะแนน
- 21-30 ไร่ต่อครัวเรือน 4 คะแนน
- 11-20 ไร่ต่อครัวเรือน 3 คะแนน
- 5-10 ไร่ต่อครัวเรือน 2 คะแนน
- ไม่เกิน 5 ไร่ต่อครัวเรือน 1 คะแนน

ผู้วิจัยเลือกแนวทางเทคนิคการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ (Potential Surface Analysis, PSA) เป็นวิธีวิเคราะห์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้สมการเชิงเส้นตรง หรือสมการแบบจำลองดัชนี (Index Model) เป็นเทคนิคที่คิดขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ (วรรณศิลป์, 2549) เทคนิคนี้สามารถแปรสภาพพื้นที่ที่เป็นรูปภาพให้เป็นตัวเลขได้และวิเคราะห์ข้อมูลได้ง่าย ด้วยการคำนวณทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PSA การวิเคราะห์รูปแบบดัชนีเขียนในรูป Equation 1 ได้ดังนี้

$$S = W_1R_1 + W_2R_2 + W_3R_3 + \ldots + W_nR_n \qquad (1)$$

เมื่อ S = ค่าคะแนนรวมศักยภาพของพื้นที่

W = ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัย

R = ค่าคะแนนความเหมาะสมของปัจจัย

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่

ใช้เทคนิคซ้อนทับ (Overlay) ของข้อมูลทั้งหมดที่นำมาศึกษาแล้วนำมาประมวลผลโดยการคำนวณค่าคะแนนรวมที่ได้ จะถูกนำมาจัดกลุ่มเพื่อแบ่งพื้นที่โดยใช้หลักทางสถิตินำหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) มากำหนดค่าพิสัย (Range) ของคะแนนในแต่ละช่วงดัง Equation 2

$$\text{อันตรภาคชั้น} = \frac{\text{ค่าคะแนนสูงสุด} - \text{ค่าคะแนนต่ำสุด}}{\text{จำนวนช่วง/ระดับความเหมาะสม}} \qquad (2)$$

ซึ่งแบ่งพื้นที่ความเหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน ออกเป็น 4 ระดับ คือ พื้นที่เหมาะสมมากที่สุด พื้นที่เหมาะสมมาก พื้นที่เหมาะสมปานกลาง และพื้นที่เหมาะสมน้อย ตามลำดับ ดัดแปลงจาก (สุพิชฌาย์ และจินตนา, 2553)

แสดงผลกระทบและการนำเสนอข้อมูล

เป็นการนำเสนอผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปแบบแผนที่แสดงพื้นที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อศักยภาพเชิงพื้นที่ในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน

เมื่อทำการศึกษา และวิเคราะห์ปัจจัยทางกายภาพและปัญหาที่เกิดหลังจากมีการก่อสร้างโครงการแล้ว ที่มีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์พื้นที่ศักยภาพที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน มีทั้งหมด 4 ปัจจัย ดังนี้

1.1 อายุใช้งานโครงการ ดังแสดงใน Fig. 1A พบว่าพื้นที่อายุใช้งานโครงการตั้งแต่ 30 ปีขึ้นไป มีพื้นที่ประมาณ 72.42 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 65.22) พื้นที่อายุใช้งานโครงการมากกว่า 10 ปี แต่ไม่ถึง 30 ปี มีพื้นที่ประมาณ 29.54 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 26.61) พื้นที่อายุใช้งานโครงการน้อยกว่า 10 ปี มีพื้นที่ประมาณ 9.07 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 8.17)

1.2 สภาพการเกิดภัยธรรมชาติในพื้นที่โครงการ ดังแสดงใน Fig. 1B พบว่าพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากเป็นประจำ โดยประสบน้ำท่วมขังไม่เกิน 8–10 ครั้ง ในรอบ 10 ปี มีพื้นที่ประมาณ 4.32 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 8.76) พื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากบ่อยครั้ง โดยประสบน้ำท่วมขังไม่เกิน 4–7 ครั้ง ในรอบ 10 ปี มีพื้นที่ประมาณ 14.41 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 29.21) พื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากเป็นครั้งคราว โดยประสบน้ำท่วมขังไม่เกิน 3 ครั้ง ในรอบ 10 ปี มีพื้นที่ประมาณ 30.60 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 62.02)

1.3 อัตราส่วนพื้นที่จัดรูปที่ดินต่อพื้นที่ชลประทาน ดังแสดงใน Fig. 1C พบว่าพื้นที่โครงการเดิมอยู่ในพื้นที่ชลประทานทั้งหมด มีพื้นที่ประมาณ 111.04 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 100)

1.4 พื้นที่รับประโยชน์ต่อครัวเรือน ดังแสดงใน Fig. 1D พบว่าพื้นที่รับประโยชน์ต่อจำนวนครัวเรือนของเกษตรกร ตั้งแต่ 21–30 ไร่ต่อครัวเรือน มีพื้นที่ประมาณ 16.27 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 14.65) พื้นที่รับประโยชน์ต่อจำนวนครัวเรือนของเกษตรกร ตั้งแต่ 11–20 ไร่ต่อครัวเรือน มีพื้นที่ประมาณ 94.78 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 85.35)

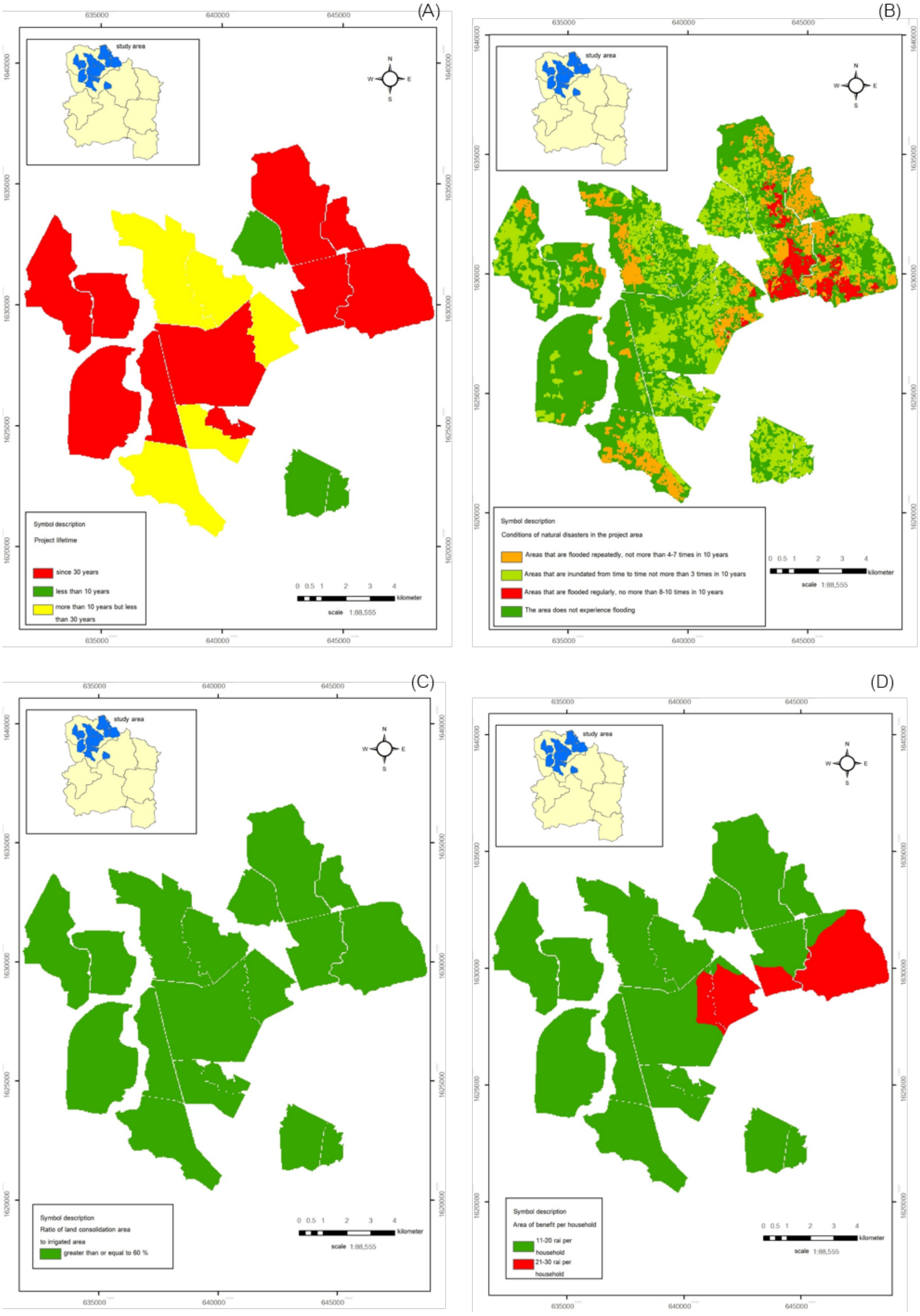


Fig. 1 Factors affecting the spatial potential for improving land consolidation projects: (A) Project lifetime; (B) Conditions of natural disasters in the project area; (C) Ratio of land consolidation area to irrigated area; (D) Area of benefit per household

ผลการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่เพื่อหาพื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดิน

พื้นที่เหมาะสมมากที่สุดมีพื้นที่ 34.40 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 30.98) พบในตำบลจำลอง อำเภอแสวงหาสูงที่สุด พื้นที่เหมาะสมมากมีพื้นที่ 39.31 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 35.40) พบในตำบลรำมะสัก อำเภอโพธิ์ทองมากที่สุด พื้นที่เหมาะสมปานกลางมีพื้นที่ 28.28 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 25.46) พบในตำบลสีบัวทอง อำเภอแสวงหาเป็นส่วนใหญ่ และพื้นที่เหมาะสมน้อยมีพื้นที่เพียง 9.06 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 8.16) พบในตำบลคำหยาด อำเภอโพธิ์ทองมากที่สุด จากการจำแนกระดับหลักเกณฑ์ความเหมาะสมเกิดจากการพิจารณาในการศึกษานี้เท่านั้น ดังแสดงใน Fig. 2 และ Table 1

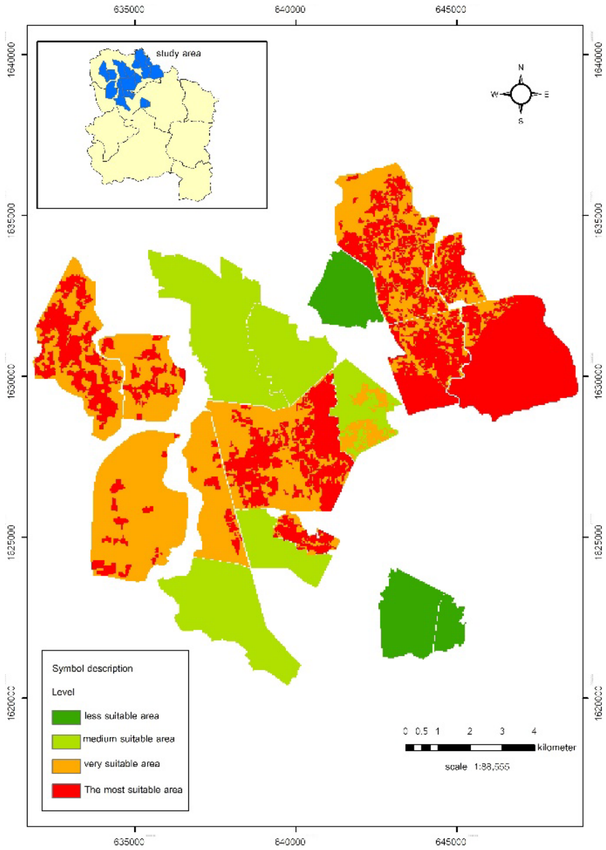


Fig. 2 Map showing the level of suitability for improving the land consolidation project. Ang Thong province

Table 1 Suitable areas for improvement of the land consolidation project

Level	Square Kilometer	Percentage
Less suitable space	9.06	8.16
Medium suitable area	28.28	25.46
Very suitable area	39.31	35.40
The most suitable area	34.40	30.98
Sum	111.05	100.00

สรุป

ในการศึกษาการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่เพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินจังหวัดอ่างทองครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพื้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินในจังหวัดอ่างทอง โดยการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับหลักการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ โดยใช้ปัจจัยสำหรับทำการศึกษาจากแผนแม่บทการจัดรูปที่ดิน 4 ปัจจัยดังนี้ อายุใช้งานโครงการ สภาพการเกิดภัยธรรมชาติในพื้นที่โครงการ อัตราส่วนพื้นที่จัดรูปที่ดินต่อพื้นที่ชลประทาน พื้นที่รับประโยชน์ต่อครัวเรือน นำมาซ้อนทับข้อมูลทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อหาพื้นที่เหมาะสม ได้ 4 ระดับดังนี้ พื้นที่เหมาะสมมากที่สุดมีพื้นที่ 34.40 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 30.98) พบในตำบลจำลอง อำเภอแสวงหาสูงที่สุด พื้นที่เหมาะสมมากมีพื้นที่ 39.31 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 35.40) พบในตำบลรำมะสัก อำเภอโพธิ์ทองมากที่สุด พื้นที่เหมาะสมปานกลางมีพื้นที่ 28.28 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 25.46) พบในตำบลสีบัวทอง อำเภอแสวงหาเป็นส่วนใหญ่ และพื้นที่เหมาะสมน้อยมีพื้นที่เพียง 9.06 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 8.16) พบในตำบลคำหยาด อำเภอโพธิ์ทองมากที่สุด

ประเด็นหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยได้มีแนวคิดในการศึกษาการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่เพื่อปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินจังหวัดอ่างทอง เนื่องด้วยแผนแม่บทการจัดรูปที่ดินไม่ได้ระบุพื้นที่ศักยภาพในการปรับปรุงโครงการ มีเพียงการศึกษาปัจจัยที่ต้องใช้พิจารณาในการจัดลำดับความสำคัญของการเลือกพื้นที่ปรับปรุงโครงการเดิมเท่านั้น และจากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ศักยภาพเทียบกับแผนงานปรับปรุงของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องพบว่า พื้นที่เหมาะสมมากที่สุดในการปรับปรุงโครงการจัดรูปที่ดินตามผลการวิเคราะห์ อยู่ในตำบลจำลอง อำเภอแสวงหาสูงที่สุด ส่วนพื้นที่ตามแผนงานปรับปรุงโครงการของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง กำหนดให้เข้าปรับปรุงโครงการก่อนเป็นอันดับแรก อยู่ในตำบลบ้านพรานอำเภอแสวงหา ซึ่งไม่ตรงกับผลการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ สาเหตุเนื่องมาจากกระบวนการมีส่วนร่วมหรือความต้องการให้ปรับปรุงโครงการเดิมของเกษตรกร ทำให้การจัดลำดับแผนงานปรับปรุงโครงการของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องนำพื้นที่โครงการเดิมที่เกษตรกรมีความพร้อมและให้ความร่วมมือมาดำเนินการปรับปรุงโครงการก่อนเป็นอันดับแรก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.พท.ดร.สรวิศ สุภเวชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อนุเผ่า อบแพทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางขั้นตอนการวิเคราะห์ผล สำนักงานจัดรูปที่ดินกลาง กรมชลประทาน และกลุ่มวางแผนการจัดการที่ดินในพื้นที่เสี่ยงภัยทางการเกษตร กรมพัฒนาที่ดิน สำหรับข้อมูลปัจจัยในการการดำเนินการวิจัย ส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

วรรณศิลป์ พีรพันธุ์. 2549. การวิเคราะห์ศักยภาพในการพัฒนาของพื้นที่: Potential Surface Analysis. http://pioneer.chula.ac.th/~pwannasi/psa.pdf, 2 กรกฎาคม 2565.

สำนักงานจัดรูปที่ดินกลาง. 2559. แผนแม่บทการจัดรูปที่ดิน. กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สุพิชฌาย์ ธนารุณ, จินตนา อมรสงวนสิน. 2553. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการกำหนดพื้นที่เสี่ยงอุทกภัยจังหวัดอ่างทอง. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม 53: 19–34.

การจำลองแผนการจัดซื้อวัสดุจาก BIM: กรณีศึกษาโครงการบ้านเดี่ยว 3 ชั้น

BIM-based material procurement planning: A case study of 3-story detached house project

ชนกนันท์ บุญส่ง[a,*], **ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี**[a], **วิทยา ศรีสมบูรณ์**[b]

Chanoknan boonsong[a,*], Suphawut Malaikrisanachalee[a], Wittaya Srisomboon[b]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร สกลนคร 47000

[a]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, Sakon Nakhon 47000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chanoknan.bo@ku.th

บทคัดย่อ

การดำเนินโครงการก่อสร้างจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรต่าง ๆ เพื่อทำให้งานมีความก้าวหน้า และแล้วเสร็จตามแผนงานที่วางไว้ ทรัพยากรเหล่านี้ ได้แก่ กำลังคน (Man) เงินทุน (Money) เครื่องจักร (Machine) และวัสดุ (Material) ซึ่งทรัพยากรต้องได้รับการจัดสรรตามความต้องการ ตามลำดับความสำคัญ อย่างถูกต้องเหมาะสมทั้งด้านปริมาณ คุณภาพ และเวลา ปัจจุบันกระบวนการของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modelling; BIM) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างแพร่หลาย โดยมีข้อดี คือ สามารถนับจำนวน คำนวณปริมาณ พื้นที่ และปริมาตรของวัสดุ ได้ถูกต้อง แม่นยำ รวดเร็ว ยืดหยุ่น และสอบทวนได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ BIM ในการสร้างแผนการจัดซื้อวัสดุ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ การถอดปริมาณแยกตามประเภทวัสดุแบบอัตโนมัติโดยการพัฒนาชุดคำสั่งประยุกต์จากโปรแกรม Dynamo ร่วมกับ MS Excel การเพิ่มเติมข้อมูลและเชื่อมโยงเกี่ยวกับการจัดซื้อ ได้แก่ ระยะเวลาในการจัดซื้อ และเวลาที่ต้องการใช้วัสดุ โดยใช้บ้านเดี่ยว คอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้น เป็นกรณีศึกษา ซึ่งครอบคลุมเฉพาะงานโครงสร้างเท่านั้น จากผลการวิจัยพบว่า BIM ช่วยสนับสนุนข้อมูลวัสดุที่มีปริมาณถูกต้องและช่วยในการสร้างแผนการจัดซื้อวัสดุได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การจัดการวัสดุก่อสร้าง, แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, แผนการจัดซื้อ

Abstract

A construction project requires resources to execute and complete the work as planned. These resources include man, money, machine, and materials, which must be allocated according to needs. In order of importance correctly and appropriately in quantity, quality, and time. Currently, the Building Information Modeling (BIM) process is widely used in the construction industry, with the advantage of being able to count and calculate the amount, area, and volume of materials with accuracy, speed, flexibility, and verifiability. This research aims to apply BIM to create a material procurement plan. Firstly, 3D modeling was started and automatically extracted quantities with material type by developing an application program from Dynamo and MS Excel. Adding information and linking about procurement were executed, including the duration of procurement and the time required to use the material. A detached house with 3-story reinforced concrete was used as a case study, focusing only on structural work. According to the results, BIM can significantly support accurate material data and create a material procurement plan.

Keywords: Construction material management, Building Information Modeling (BIM), Procurement plan

คำนำ

การดำเนินโครงการก่อสร้างจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรต่าง ๆ เพื่อดำเนินกิจกรรมการก่อสร้างมีความก้าวหน้าและแล้วเสร็จตามแผนงานที่วางไว้ ทรัพยากรเหล่านี้ ได้แก่ กำลังคน (Man) เงินทุน (Money) เครื่องจักรกล (Machine) และวัสดุ (Material) ซึ่งทรัพยากรต้องได้รับการจัดสรรตามความต้องการ ลำดับความสำคัญ อย่างถูกต้องเหมาะสมทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ โดยแต่ละโครงการจะมีความต้องการทรัพยากรต่าง ๆ ไม่เหมือนกันในแต่ละช่วงเวลา ทำให้การจัดหาทรัพยากรเป็นงานที่ท้าทายและมีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามปัญหาเกี่ยวกับวัสดุ ได้แก่ การขาดแคลนวัสดุ การจัดซื้อวัสดุ ความล่าช้าในการจัดส่งวัสดุ การคำนวณปริมาณวัสดุที่ไม่ถูกต้อง เป็นต้น ซึ่งยังคงเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำและเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงการก่อสร้างก่อสร้างล่าช้า (Rehman and Ogunlana, 2008) (Zidane et al., 2018)

ปัจจุบันเทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling ; BIM) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยถูกนำมาใช้ตลอดอายุของโครงการก่อสร้าง ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบจนถึงการรื้อถอน โดยมีข้อดี คือ สามารถนับจำนวน คำนวณปริมาณและปริมาตรของวัสดุ ได้ถูกต้อง แม่นยำ รวดเร็วและสอบทวนได้ BIM เป็นการสร้างแบบจำลองอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแบบจำลองอาคารประกอบขึ้นจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของอาคาร เช่น เสา คาน พื้น เหล็กเสริม ผนัง ประตู หน้าต่าง ซึ่งองค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ประกอบด้วย ข้อมูลกราฟิก (Graphic) ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ เช่น ขนาด ระยะ วัสดุ สี และข้อมูลที่ไม่ใช่กราฟิก (Non-Graphic) เช่น ราคา รุ่น ผู้ผลิต เป็นต้น เนื่องจาก BIM จัดเก็บข้อมูลทั้งหมดอยู่ในฐานข้อมูลกลาง ดังนั้น เมื่อผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงแก้ไขส่วนใดในแบบจำลองอาคาร การแก้ไขก็จะส่งผลไปยังฐานข้อมูลกลาง ทำให้การแสดงผลแบบจำลองอาคารในทุกมุมมองที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย (สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ความสำคัญของวัสดุก่อสร้างและความสามารถของ BIM ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำกระบวนการ BIM มาช่วยในการสร้างแผนจำลองการจัดซื้อวัสดุของโครงการก่อสร้าง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ 1) ศึกษารายละเอียดขั้นตอนการออกแบบระดับชั้นของการพัฒนา (LOD) ของงานโครงสร้างบนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร 2) พัฒนาขั้นตอนการหาปริมาณวัสดุของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการพัฒนาชุดคำสั่งประยุกต์จากโปรแกรม Dynamo ร่วมกับ MS Excel 3) สร้างแผนการจัดซื้อวัสดุ โดยนำข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคารมากำหนดระยะเวลารอสินค้า (Lead Time)

การตรวจเอกสาร

ระดับชั้นของการพัฒนา (LOD: Level of Development) การพัฒนาการระดับขั้นตอนเป็นการทำงานที่มีความละเอียดในลักษณะงาน ที่เฉพาะเพื่อใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง ให้ตรงกับความละเอียดในการทำงาน เพื่อให้ทุกฝ่ายเข้าใจ และสามารถสื่อสารข้อมูลในการทำงานร่วมกัน มีมาตรฐานเดียวกันที่สามารถสืบค้นได้ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2563)

หลักการตั้งชื่อวัตถุ และวัสดุ ใน BIM เป็นการกำหนดให้การตั้งชื่อเรียงลำดับจากข้อมูลที่ใหญ่ และกว้างที่สุด ไปถึงข้อมูลที่เล็ก และแคบที่สุดโดยพิจารณาถึงการจัดการข้อมูลของผู้บริโภค หรือผู้นำไปใช้งาน การจัดลำดับความสำคัญของข้อมูล การเชื่อมต่อถึงเครื่องมือที่หลากหลายได้ และความสะดวกต่อการเลือกวัตถุและวัสดุต่าง ๆ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม, 2565)

การวางแผนการจัดซื้อ เป็นกระบวนการที่ผู้ซื้อจะต้องระบุรายละเอียดของผลิตภัณฑ์และบริการที่ต้องการจัดซื้อ ซึ่งปกติจะเป็นองค์กรที่อยู่นอกโครงการ การวางแผนจัดซื้อจะช่วยให้การตัดสินใจจัดซื้อมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะ

เป็นไปตามแผนปฏิบัติการหรือโครงการนั้นๆ โดยควรคำนึงถึงว่าจะจัดซื้ออะไร มากเท่าไหร่ ต้องการใช้เมื่อไหร่ จัดซื้อเมื่อไหร่ และจัดซื้อด้วยวิธีการใด โดยการกำหนดวันสั่งซื้อจะกำหนดจากวันเริ่มเร็วสุดของกิจกรรมก่อสร้างนั้นๆ ลบด้วยระยะเวลารอ (Lead Time) จากนั้นนำผลที่ได้มาลบด้วยเวลาใช้ของปัจจุบัน (Just-In-Time: JIT) นั่นหมายถึงการใช้วัสดุที่สั่งมาทันทีโดยไม่ต้องการกองเก็บไว้ในโรงเก็บวัสดุ (ณรงค์, 2557)

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยการจำลองแผนการจัดซื้อวัสดุจาก BIM แบ่งขั้นตอนการทำวิจัยได้ 6 ขั้นตอน แสดงดัง Fig. 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

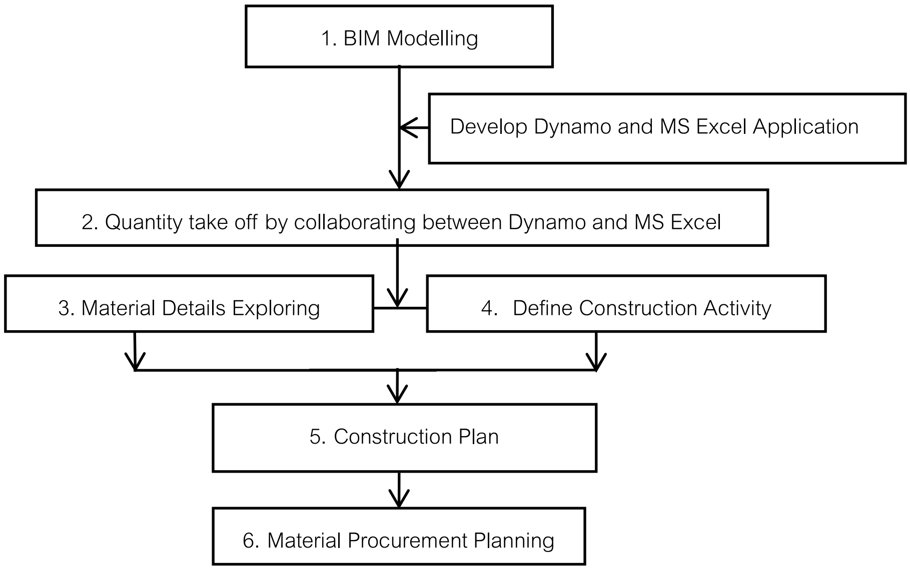


Fig. 1 Research Process

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองอาคารด้วยโปรแกรม Autodesk Revit 2021 โดยสร้างเฉพาะงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ ฐานราก คาน เสา พื้น ผนังและ บันได ซึ่งใช้ระดับการพัฒนา คือ LOD 200 สำหรับโครงสร้างคอนกรีตและ LOD 300 สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2563) และมีขั้นตอนการทำงานย่อย คือ การพัฒนาโปรแกรมย่อย ใน Dynamo (Autodesk Inc, 2564) แสดงดัง Fig. 2 ที่สามารถรันบน Autodesk Revit เพื่อเชื่อมโยงข้อมูล จำแนกประเภท ข้อมูลรายละเอียดของวัสดุและ คำนวณปริมาณ พื้นที่รวมทั้งปริมาตรของชิ้นส่วนโครงสร้าง และส่งออกข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแผนการสั่งซื้อวัสดุไปยัง MS Excel

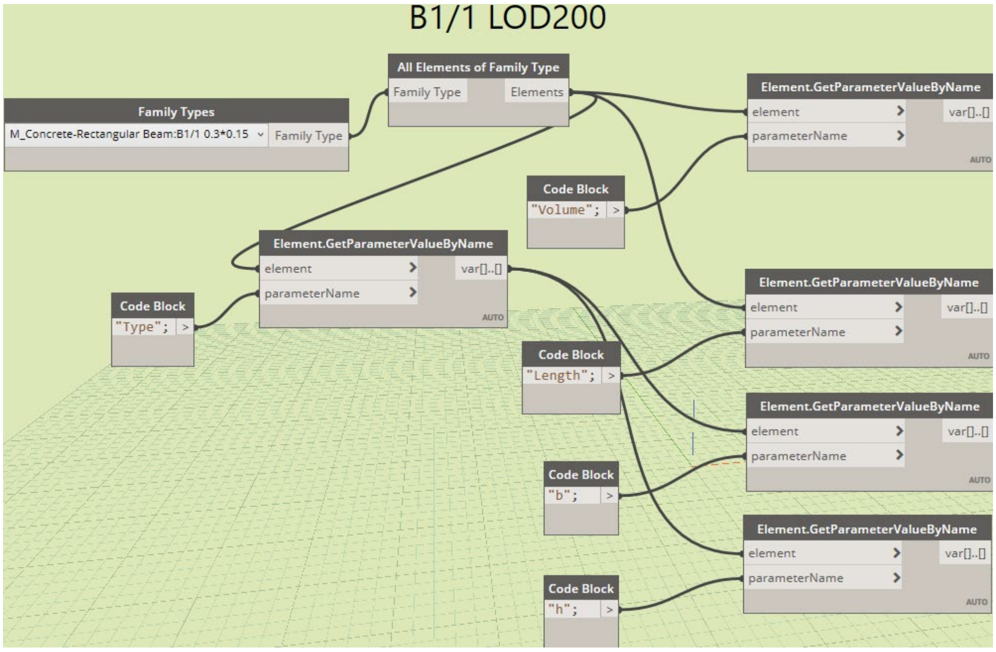


Fig. 2 Dynamo node

ขั้นตอนที่ 2 จากการสร้างปริมาณงานบนโปรแกรม Autodesk Revit ด้วย LOD 200 และ LOD 300 ทำให้ทราบถึงรายละเอียดงานบนตัวโมเดล เช่น LOD 200 ปริมาตรงานในหมวดงานโครงสร้างและ LOD 300 งานเหล็กเสริมและงานไม้แบบ ทำให้สามารถนำตัวอย่าง LOD 300 มาเทียบเคียงกับ LOD 200 โดยไม่จำเป็นต้องสร้างองค์ประกอบของอาคารทั้งหมด การหาปริมาณงานมีขั้นในกระบวนการเทียบเคียงและการคำนวณเพิ่มเติมในการนำปริมาณวัสดุมาใช้งานจริง เช่น งานไม้แบบ จะคิดการลดปริมาณงานจากการสร้างบ้าน 3–4 ชั้น (ลดปริมาณ 40%) งานไม้คร่าวสำหรับยึดแบบ (30% ของไม้แบบ) ไม้ค้ำยันไม้แบบ (1 ต้น/พื้นที่ 1 ตารางเมตร) งานตะปูและอุปกรณ์ (0.25 กิโลกรัม/1ตารางเมตร) และการคิดปริมาณงานเผื่อคอนกรีต งานเหล็กเสริม และงานลวดผูกเหล็ก โดยอ้างอิงการคำนวณปริมาณงานจาก (กรมบัญชีกลางปี, 2560)

ขั้นตอนที่ 3 สร้างแบบฟอร์มรายละเอียดวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในแผนงานจัดซื้อบน MS Excel เป็นปริมาณงานที่มีรายละเอียดองค์ประกอบย่อยของชิ้นส่วน ว่ามีองค์ประกอบย่อยอะไรบ้าง เช่น งานฐานราก 1 ฐาน สามารถบอกรายละเอียดองค์ประกอบย่อย ได้แก่อะไรบ้างนอกจาก ข้อมูลเชิงรูปร่างทางเรขาคณิต ได้แก่ การบอกชนิดคอนกรีตที่ใช้ ประเภทงานเหล็กเสริมและ งานอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดแผนกิจกรรมย่อยในการก่อสร้างเพื่อที่จะได้ทราบองค์ประกอบที่สร้างและปริมาณงานอยู่ในหมวดกิจกรรมในงานก่อสร้างใด ดังนั้น ทำการกำหนดกิจกรรมในงานก่อสร้างและ การกำหนดรหัสในหมวดงานก่อสร้างสำหรับที่จะทำการวางแผนระยะเวลาให้กับตัวกิจกรรม

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดแผนงานการก่อสร้าง สามารถที่จะสร้างความสัมพันธ์ระยะเวลาของกิจกรรมโดยมีการเชื่อมต่อกันระหว่างกิจกรรมหนึ่งไปยังกิจกรรมหนึ่ง โดยกำหนดประเภทความสัมพันธ์แบบ Finish to Start (FS) ทำให้การใช้วัสดุไม่มีการเก็บสินค้าไว้ในคลัง ลักษณะการสร้างทำการสร้างเป็นแท่งกราฟ (Bar Chart) ขึ้นมาในการกำหนดเวลาในแต่ละกิจกรรม เพื่อทราบแผนระยะเวลาการใช้วัสดุ เพื่อที่จะได้รู้กำหนดเวลาการสั่งซื้อวัสดุในแต่ละกิจกรรม

ขั้นตอนที่ 6 สร้างแผนการจัดซื้อวัสดุ โดยมีรายละเอียด ดังนี้ วันที่ส่งขออนุมัติและวันที่ได้รับอนุมัติจากผู้รับเหมาโครงการ แผนใช้งานหรือ (SCH ON Site) วันที่ส่งวัสดุพร้อมกับใช้งานวัสดุในวันเดียวกัน การขอใบขอซื้อ (PR NO.) การอนุมัติใบสั่งซื้อ (PR NO.) โดยมีการกำหนดระยะเวลาของแต่ละขั้นตอนแสดงดัง Fig. 3

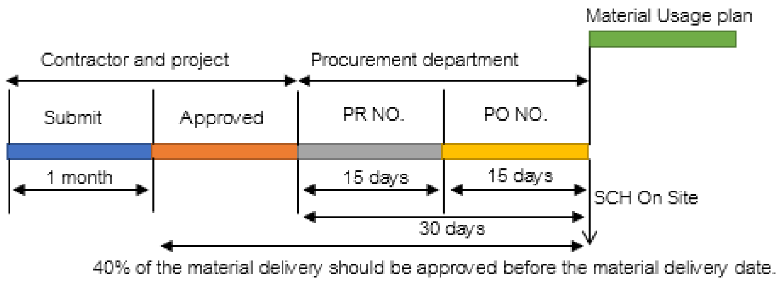


Fig. 3 Material Procurement Scheduling

ผลการทดลอง

1. การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารของกรณีศึกษา บ้านเดี่ยว 3 ชั้น ขนาดกว้าง 17.1 เมตร ยาว 20.7 เมตร และมีพื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร 559 ตารางเมตรและพื้นจอดรถ 68 ตารางเมตร แสดงดัง Fig. 4 การสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปของแต่ละองค์อาคารโมเดล เช่น งานคาน LOD 200 ได้เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ทำให้คำนวณหา ความกว้าง ยาว สูงหรือความหนา และงานคาน LOD 300 ทำให้ทราบปริมาณเหล็กเสริมและ ใช้คำนวณหาปริมาณงานที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ด้วย แสดงดัง Fig. 5

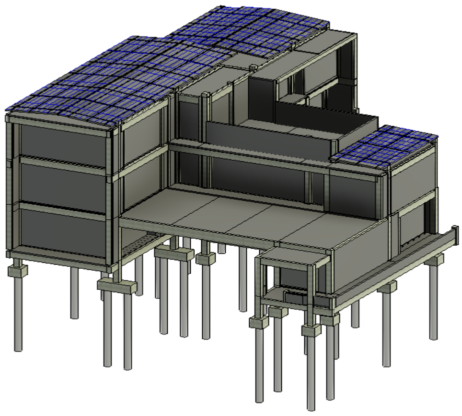
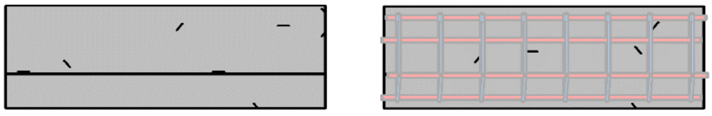


Fig. 4 3-story Detached House in BIM model



LOD 200 LOD 300

Fig. 5 Beam models of LOD 200 and LOD 300

2. จากวิธีดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนที่ 2–6 ผลลัพธ์ที่ได้ เมื่อนำวันที่หรือวันที่ใช้งานวัสดุมาจัดทำแผนการจัดซื้อ โดยจะต้องมีการจัดทำ PR NO. PO NO. ก่อนวันใช้วัสดุในแผนการทำงานเพื่อที่จะทำให้การขนส่งวัสดุเป็นไปตาม

แผนการทำงานการก่อสร้าง สามารถที่จะทำการคำนวณนับถอยหลังอ้างอิงจากแผนการทำงานการก่อสร้าง เพื่อลดปัญหาการติดขัดการใช้งานวัสดุในแผนการทำงานก่อสร้าง และได้ระยะเวลาการก่อสร้างทั้งหมด 268 วัน เริ่มตั้งแต่วันที่1 มกราคม 2565 ถึง 26 กันยายน 2565 แสดงดัง Table 1

จากผลการศึกษาขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณงานซึ่งเกิดมีค่าความคาดเคลื่อนในปริมาณระหว่างบนโปรแกรม และ การหาปริมาณด้วยมือพบว่าปริมาณงาน คาน เสา ฐานราก มีความคาดเคลื่อนไม่เกิน 1% บันได 3–4% งานพื้นไม่พบค่าความคาดเคลื่อน จากปริมาณงานบันได พบความคาดเคลื่อนมากที่สุดคือ เหล็กเสริมท้องบันไดซึ่งเกิด 3–4% ซึ่งค่าความคาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้จาก ปริมาณการคาดเคลื่อนในลักษณะที่เกิดจากผู้วัด และปริมาณการคาดเคลื่อนในลักษณะงานเหล็กโดยสามารถแก้ได้จากค่า % ค่าเผื่อในการก่อสร้าง ความคาดเคลื่อนระยะเวลาจากการสร้างแผนการก่อสร้างและแผนการจัดซื้อจากการสร้างด้วยโปรแกรม Dynamo และ MS Excel โดยงานเหล็กพื้นทั้งหมดแตกต่างกันถึง 1–3 กิโลกรัม แต่มีระยะเวลาในการทำงานทุกกิจกรรม 268 วันเท่ากัน

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการจัดทำแผนการจัดซื้อวัสดุจากการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศอาคารมาประกอบในการสร้างแผนจัดซื้อ โดยประยุกต์ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง BIM ตามมาตรฐาน LOD และการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ Dynamo ร่วมกับ MS Excel ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1) การสร้างแบบจำลอง BIM ที่ระดับชั้นของการพัฒนา LOD 200 LOD 300 และการเทียบเคียง ทำให้ประหยัดเวลาในการสร้างแบบจำลอง BIM และได้ปริมาณวัสดุที่แม่นยำ ยืดหยุ่น สอบทวนได้ (Model based) ช่วยลดความผิดพลาดจากการคำนวณซึ่งยังคงเกิดขึ้นเป็นประจำจากวิธีการแบบเดิม (Paper based) 2) โปรแกรมประยุกต์ Dynamo ร่วมกับ MS Excel เพื่อเชื่อมโยงข้อมูล จำแนกประเภท ข้อมูลรายละเอียดของวัสดุและคำนวณ ปริมาณ พื้นที่ รวมทั้งปริมาตรของชิ้นส่วนโครงสร้าง การส่งออกข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแผนการสั่งซื้อวัสดุไปยัง MS Excel และการคำนวณปริมาณวัสดุของงานประกอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบอัตโนมัติ ซึ่งไม่มีในแบบจำลอง BIM เดิม 3) แผนการจัดซื้อวัสดุ มีการเชื่อมโยงกับแผนงานก่อสร้างทำให้เจ้าของโครงการสามารถทราบระยะเวลางานก่อสร้างตั้งแต่วันเริ่มงานและสิ้นสุดการทำงาน กระบวนการจัดซื้อ ทราบกำหนดระยะเวลาสั่งซื้อ การขอซื้อ ระยะเวลารอวัสดุ ระยะเวลาใช้วัสดุ ทำให้ผู้รับเหมาหรือผู้ควบคุมงานสามารถทราบกำหนดเวลาที่ชัดเจน ในการเริ่มงานและการจัดการวัสดุที่มาหน้างานก่อสร้างตามกำหนดเวลาและราคา รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการประสานงานกับบริษัทที่จัดหาวัสดุ ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ คือ ในช่วงเริ่มต้นใช้ระยะเวลานานในการสร้างแบบจำลอง BIM

การศึกษาวิจัยครั้งต่อไปควรขยายให้ครบทุกหมวดงานของงานก่อสร้างอาคาร เช่น งานสถาปัตยกรรม งานระบบเป็นต้น เพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลของวัสดุทั้งโครงการ หากจะประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีความหลากหลายของประเภทวัสดุควรนำมาตรฐานรหัสต้นทุนก่อสร้างงานอาคาร (Cost Code) มาใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกหมวดหมู่วัสดุและราคาที่ครบถ้วนรวมทั้งการสื่อสารกับผู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการให้เป็นมาตรฐานเดียวกันนอกจากนี้สามารถใช้ข้อมูลปริมาณวัสดุและราคาไปคาดการณ์ค่าใช้จ่ายและบริหารทรัพยากรในโครงการก่อสร้างได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทีมวิจัยและหน่วยงานผสานงานที่เกี่ยวข้องที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ตัวอย่างแบบกรณีศึกษาบ้านเดี่ยว 3 ชั้นและคำปรึกษาเรียนรู้กระบวนการสร้างในขั้นตอนการจัดทำแบบแผนงานจัดซื้อ เป็นแนวทางในการทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

Table 1 Material procurement planning (Sample)

Code	Item	Material		Duration	Date			Procurement			Construction Plan															
		Quantity	Unit		Submit	Approved	Usage plan	PR NO.	PO NO.	SCH On Site	January 2565				February 2565				March 2565				April 2565			
1	**Construction Activity**				Project Starting Date	1 January 2564					1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.4	Beam Floor1																									
	Beam_Concrete-Rectangular_floor1																									
	Concrete 240 Ksc. (Cylinder)	19.67	CUM.	4	18 May 64	18 Jun 64	1 Mar 65	1 Feb 65	16 Feb 65	1 Mar 65																
	Wooden Formwork thickness10 mm	141.24	SQ.M	14	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	Stud (Shorea Wood) Ø50.2 mm	42.37	SQ.M	4	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	Shoring (Eucalyptus wood) Ø50.2 mm	141.24	Ton	6	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	Nail	35.31	Kg.	4	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	Black Annealing Wire Ø1.25 mm	98.95	Kg.	2	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	Rebar																									
	SR 24 RB 6 mm.	376.36	Kg.	37	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	SD 40 DB 12 mm.	348.39	Kg.	37	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	SD 40 DB 16 mm.	1498.94	Kg.	37	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
	SD 40 DB 20 mm.	1068.71	Kg.	37	3 May 64	3 Jun 64	23 Jan 65	23 Dec 64	7 Jan 65	23 Jan 65																
1.5	Floor Floor1																									
	Floor_PS_Rc_Solid plank	141	SQ.M	3	19 May 64	19 Jun 64	5 Mar 65	5 Feb 65	20 Feb 65	5 Mar 65																
	Concrete 240 Ksc. (Cylinder)	7.26	CUM.	2	2 Jun 64	2 Jul 64	6 Mar 65	6 Mar 65	21 Mar 65	6 Mar 65																
	Wooden Formwork thickness10 mm	90.24	SQ.M	11	19 May 64	19 Jun 64	5 Mar 65	5 Feb 65	20 Feb 65	5 Mar 65																
	Stud (Shorea Wood) Ø50.2 mm	27.07	SQ.M	3	19 May 64	19 Jun 64	5 Mar 65	5 Feb 65	20 Feb 65	5 Mar 65																
	Shoring (Eucalyptus wood) Ø50.2 mm	90.24	Ton	4	19 May 64	19 Jun 64	5 Mar 65	5 Feb 65	20 Feb 65	5 Mar 65																
	Nail	22.56	Kg.	3	19 May 64	19 Jun 64	5 Mar 65	5 Feb 65	20 Feb 65	5 Mar 65																
	Black Annealing Wire Ø1.25 mm	48.29	Kg.	1	19 May 64	19 Jun 64	5 Mar 65	5 Feb 65	20 Feb 65	5 Mar 65																
	SR 24 RB 9 mm.	120.20	Kg.	32	19 May 64	19 Jun 64	5 Mar 65	5 Feb 65	20 Feb 65	5 Mar 65																

เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ เหลืองบุตรนาค. 2557. การบริหารงานวิศวกรรมก่อสร้าง (Construction Management). จัดพิมพ์โดย ผศ.ดร.ณรงค์ เหลืองบุตรนาค.

คณะกรรมการราคากลางและขึ้นทะเบียนผู้ประกอบการ กรมบัญชีกลาง. 2560. หลักเกณฑ์การคำนวณราคากลางงานก่อสร้างอาคาร. กรมบัญชีกลาง. กรุงเทพฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2563. มาตรฐานการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร. บริษัท พลัส เพรส จำกัด. กรุงเทพฯ.

สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์. 2558. แนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคาร สำหรับประเทศไทย. บริษัท พลัสเพรส จำกัด. กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2565. แนวทางการจัดทำวัตถุและวัสดุก่อสร้างสำหรับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร. กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

Autodesk Inc. 2564. Dynamobim primer. https://dynamobim.org/

Toor, S.U.R., Ogunlana, S.O. 2008. Problems causing delays in major construction projects in Thailand. Construction Management and Economics 26: 395-408.

Zidane, Y.J.T., Andersen, B. 2018. The top 10 universal delay factors in construction projects. International Journal of Managing Projects in Business 24: 101–108.

แนวทางการใช้แบบแปลนก่อสร้างบ้านประหยัดพลังงาน ในการยื่นขออนุญาตก่อสร้างตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ภายในเขตพื้นที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี

Guidelines for using energy-efficient house construction plans in applying for a construction permit according to the Building Control Act 1979 within the area of Thung Yai sub-district municipality, Thung Fon district, Udon Thani province

อัญชสา ประมวลเจริญกิจ, ฉัตรปวีณ์ หอมอ่อน, สุริยา เสนาจันทร์*

Anchasa Pramuanjaroenkij, Chatpawee Homon, Suriya Senachan*

คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร สกลนคร 47000

Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, Sakon Nakhon 47000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: s.senachan@gmail.com

บทคัดย่อ

จากการสำรวจปัญหาการใช้แบบแปลนบ้านของกรมโยธาธิการและผังเมืองเพื่อใช้ในการยื่นขออนุญาตก่อสร้างบ้านพักอาศัยในเขตพื้นที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี พบว่าปัญหาที่พบมากที่สุดคือราคาก่อสร้างสูงเกินกว่าจะก่อสร้างจริงได้คิดเป็นร้อยละ 70 และได้สำรวจความต้องการของประชาชนในเขตพื้นที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี พบว่าประชากรร้อยละ 70 มีความต้องการบ้านลักษณะบ้านทรงสมัยใหม่ (แบบบ้านโมเดิร์น) ชั้นเดียว พื้นที่ใช้สอย 40–70 ตร.ม. และประชากรร้อยละ 30 มีความต้องการลักษณะบ้านทรงสมัยใหม่ (แบบบ้านโมเดิร์น) ชั้นเดียว พื้นที่ใช้สอยไม่เกิน 70–150 ตร.ม. งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความต้องการแบบบ้านของประชากรในเขตพื้นที่ศึกษาคือเขตพื้นที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี แล้วนำแบบแปลนบ้านของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่มีพื้นที่ใช้สอยที่ใกล้เคียงกันมาปรับปรุงให้มีความเหมาะสมกับประชาชนในเขตพื้นที่ศึกษา ทำการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV) ของแบบบ้านที่ได้รับการออกแบบใหม่ทั้ง 2 แบบ ผลจากงานวิจัยนี้พบว่าแบบบ้านที่ปรับปรุงใหม่ (แบบบ้านอนุเคราะห์) จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ มีราคางานก่อสร้างต่ำกว่าแบบบ้านเดิมของกรมโยธาธิการและผังเมือง และแบบบ้านอนุเคราะห์ทั้ง 2 แบบมีค่า OTTV และค่า RTTV อยู่ในช่วงตามที่กระทรวงพลังงานกำหนด ดังนั้นหน่วยงานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นสามารถนำแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ เพื่อรณรงค์ให้ประชาชนในเขตพื้นที่สนใจการใช้แบบบ้านประหยัดพลังงาน หากประชาชนส่วนใหญ่ในประเทศสร้างบ้านประหยัดพลังงานสามารถทำให้การใช้พลังงานโดยรวมของประเทศลดลงได้

คำสำคัญ: เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่, แบบบ้านประหยัดพลังงาน, ปัญหาการขออนุญาตก่อสร้าง, พลังงาน

Abstract

From a survey of the problems of using house plans of the Department of Public Works and Town & Country Planning to apply for permission to build houses in the area of Thung Yai Subdistrict Municipality, Thung Fon District, Udon Thani Province. Found that the most common problem was that the construction price was too high to actually build, accounting for 70 percent. And surveyed the needs of people in the area of Thung Yai Subdistrict Municipality, Thung Fon District, Udon Thani Province. It was found that 70 percent of the population wanted a modern style house. (Modern house design), one-story, usable area 40 - 70 square meters, and 30 percent of the population needs a modern style house. This research aims to explore the needs of the population in the study area, Thung Yai Subdistrict Municipality, Thung Fon District, Udon Thani Province. The house plans of the Department of Public Works and Town & Country Planning with similar usable spaces were then revised to suit the people in the study area. The total heat transfer of the exterior walls (OTTV) and the total heat transfer of the roof (RTTV) were calculated for the two new house designs. revamped (A supportive house design) from Thung Yai Subdistrict Municipality The construction cost is lower than the original house designs of the Department of Public Works and Town & Country Planning and both supportive housing designs had OTTV and RTTV values within the range specified by the Ministry of Energy. Therefore, agencies of other local government organizations can use the support housing model from Thung Yai Subdistrict Municipality obtained from this research. To campaign for people in the area to be interested in using energy-saving home designs. If the majority of people in the country build energy-efficient houses, the overall energy consumption of the country can be reduced.

Keywords: Energy, Energy efficient house plans, Problem in obtaining building construction permissions, Thung Yai subdistrict municipality

คำนำ

วัตถุประสงค์หลักของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 จัดตั้งขึ้นเพื่อจัดระเบียบอาคาร หรือสิ่งปลูกสร้างให้เป็นระเบียบเรียบร้อย และมีความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน ป้องกันอัคคีภัย พร้อมทั้งยังเน้นให้มีการก่อสร้างให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม มีความมั่นคงแข็งแรงปลอดภัย ทั้งตัวเองและผู้อื่น ไม่ก่อให้เกิดความรำคาญหรือเสียหายให้กับเพื่อนบ้านข้างเคียง ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีแบบแปลนบ้านจากกรมโยธาธิการและผังเมือง จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการประชาชน แต่แบบแปลนบ้านกลุ่มนี้ยังมีราคาก่อสร้างที่สูง และเป็นอุปสรรคในการนำไปก่อสร้างจริงของประชาชนในท้องถิ่นเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจดำเนินการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลแบบแปลนบ้านที่ประชาชนในเขตท้องที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี สนใจเพื่อนำมาออกแบบและปรับแบบแปลนบ้านจากกรมโยธาธิการและผังเมืองให้เหมาะสมกับความต้องการของประชาชนในเขตท้องที่ รวมทั้งปรับให้เป็นแบบบ้านประหยัดพลังงาน ที่สามารถช่วยแก้ปัญหาการขออนุญาตก่อสร้างในเขตท้องที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี โดยให้บริการแบบแปลนบ้านที่ปรับปรุงแล้วแก่ประชาชนในพื้นที่ใช้โดยไม่คิดค่าใช้จ่าย ในกรณีที่ประชาชนไม่มีแบบแปลนบ้านเพื่อยื่นขออนุญาตก่อสร้างในเขตท้องที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจหาข้อมูลปัญหาการใช้แบบแปลนบ้านของกรมโยธาธิการและผังเมืองในการยื่นขออนุญาตก่อสร้างบ้านพักอาศัย และความต้องการแบบแปลนบ้านของประชาชนในเขตท้องที่กรณีศึกษาภายในเขตพื้นที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี แล้วทำการออกแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ตามความต้องการของประชาชนในเขตท้องที่กรณีศึกษาให้เป็นแบบบ้านประหยัดพลังงาน หลังจากนั้นจึงทำการเสนอแนวทางการใช้แบบแปลนก่อสร้างบ้านประหยัดพลังงาน เพื่อแก้ปัญหาการยื่นขออนุญาตก่อสร้าง ตามพ.ร.บ.ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ในเขตท้องที่กรณีศึกษา

จากค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ณัฐชา (2559) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจสั่งสร้างบ้านจากเอสซีจี ไฮม์ของผู้บริโภคเขตกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อบ้านของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ด้านต้นทุนของผู้ซื้อ 2) ด้านความต้องการของผู้ซื้อ 3) ด้านความสะดวก

กาญจน์กรอง และคณะ (2557) ได้ทำการวิจัยเรื่องประเมินการประหยัดพลังงานของการออกแบบและการใช้วัสดุก่อสร้างเพื่อการประหยัดพลังงานของบ้านพักอาศัย พบว่าวัสดุผนังที่ป้องกันความร้อนคือคอนกรีตมวลเบา วัสดุหลังคา ฝ้ามีค่าป้องกันความร้อนใกล้เคียงกัน และฉนวนที่สามารถลดความร้อนได้ดีที่สุดคือโฟมโพลียูริเทนและได้ออกแบบบ้านประหยัดพลังงานไว้ 1 หลังที่มีพื้นที่ใช้สอย 125 ตารางเมตร ซึ่งช่วยลดพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศและลดอุณหภูมิในบ้านพักอาศัยได้เมื่อเทียบกับการก่อสร้างบ้านด้วยวัสดุทั่วไป

อมลวรรณ และคณะ (2559) ได้ศึกษาหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของผนังวัสดุผนังก่อพบว่า ผนังที่ได้รับความร้อนตลอดทั้งวันเป็นผลทำให้ผิวภายนอกเกิดความร้อนเพิ่มขึ้น และกักเก็บความร้อน ทำให้มีอุณหภูมิอากาศภายในผนังสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกผนัง แต่ในกลางคืนผนังคายความร้อนที่ถูกสะสมออกมา พบว่าวัสดุผนังที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุด คือคอนกรีตมวลเบา 41.73 องศาเซลเซียส ผนังอิฐมอญ 43.09 องศาเซลเซียส และผนังคอนกรีตบล็อก 43.94 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การส่งผ่านความร้อนรวมของผนัง (Overall Thermal Transfer Value, OTTV) สามารถคำนวณได้ดัง Equation 1

$$OTTV = (U_w)(1 - Wwr)(Td_{eq}) + (U_f)(Wwr)(\Delta T) + (Wwr)(Shgc)(Sc)(Esr) \quad (1)$$

เมื่อ U_W คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านร้อนของผนังทึบ (W/m^2 - °c)

Wwr คือพื้นที่ของหน้าต่างโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทึบ

Td_{eq} คือ ความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (°c)

U_f คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านร้อนของผนังโปร่งแสง (W/m^2 - °c)

ΔT คือ ค่าอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคารที่แตกต่างกัน (°c)

Shgc คือ สัมประสิทธิ์ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ส่งถ่ายผนังโปร่งแสงหรือกระจก

Esr คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง และผนังทึบ (W/m^2)

การส่งผ่านความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) แต่ละด้านคือค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนักของค่าการส่งผ่านความร้อนของผนังด้านนอกแต่ละด้าน ($OTTV_i$)

ค่าการส่งผ่านความร้อนรวมของหลังคา (RTTV) คือค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนักของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของแต่ละส่วน ($RTTV_i$)

$$RTTV = \frac{(A_{wall1})(RTTV_1) + (A_{wall2})(RTTV_2) + ... + (A_{walli})(RTTV_i)}{A_{wall1} + A_{wall2} + ... + A_{walli}} \quad (2)$$

การวิเคราะห์น้ำหนักของแรงที่กระทำของโครงสร้างโดยการใช้รูปแบบโครงสร้างพื้นชั้น 1 เป็นแบบพื้นวางบนดิน (Slab on ground) สามารถช่วยให้โครงสร้างคานคอดิน ตอม่อ และฐานรากมีขนาดเล็ก การคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมในคานกรณี $M_c = M_{max}$ สามารถคำนวณได้จาก Equation 3

$$A_s = \frac{M_{max}}{F_s * jd} \quad (3)$$

เมื่อ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง M_{max} คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด

F_s คือ หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริม jd คือ ระยะจากแนวแรงอัดถึงแนวแรงดึง

การคำนวณหาระยะห่างของเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กปลอกสามารถคำนวณได้จาก Equation 4

$$S = \frac{A_v * f_v * d}{V'} \quad (4)$$

เมื่อ S คือ ระยะห่างของเหล็กปลอก A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน

f_v คือ หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของเหล็กเสริม (f_v=0.5fy) d คือ ความลึกประสิทธิผลของคาน

น้ำหนักปลอดภัยที่เสาสั้นรับน้ำหนักตามแนวแกน สามารถคำนวณได้จาก Equation 5

$$P = 0.85A_g(0.25f_c^{'} + f_s\rho_g) \tag{5}$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักปลอดภัยตามแนวแกน A_g คือ พื้นที่หน้าตัดเสา

f'_c คือ กำลังของคอนกรีต f_s คือ หน่วยแรงของเหล็กเสริม (0.45fy)

p_g คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดเสา (A_{st}/A_g)

ปริมาณเหล็กเสริมเหล็กในฐานราก สามารถคำนวณได้จาก Equation 6

$$A_s = \frac{M_{\max}}{f_s \cdot jd} \tag{6}$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในฐานราก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการสำรวจปัญหาการใช้แบบแปลนบ้านของกรมโยธาธิการและผังเมืองเพื่อใช้ในการยื่นขออนุญาตก่อสร้างบ้านพักอาศัยในเขตพื้นที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี จากประชากรทั้งหมด 100 คน พบว่าปัญหาที่พบมากที่สุดคือราคาก่อสร้างสูงเกินกว่าราคาก่อสร้างจริง คิดเป็นร้อยละ 70 รองลงมาคือพื้นที่ใช้สอยไม่ตรงกับความต้องการ คิดเป็นร้อยละ 30 ข้อมูลดังแสดงใน Fig. 1

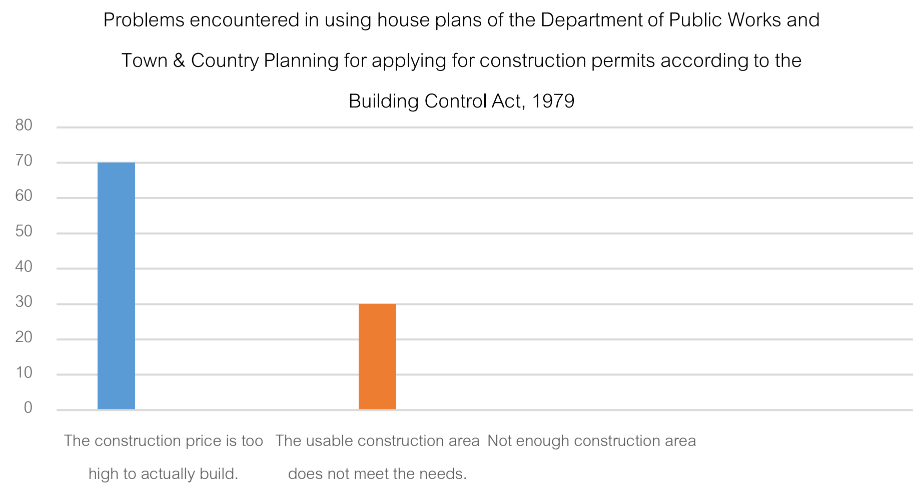


Fig. 1 Survey results of problems in using house plans offered from the Department of Public Works and Town & Country Planning

จากการสำรวจความต้องการแบบแปลนบ้านของประชาชนในเขตท้องที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี ด้วยแบบสอบถามพบว่าประชากรร้อยละ 70 มีความต้องการบ้านลักษณะบ้านทรงสมัยใหม่ (แบบบ้านโมเดิร์น) ชั้นเดียว พื้นที่ใช้สอย 50–80 ตร.ม. ราคา 250,000–500,000 บาท และประชากรร้อยละ 30 มีความต้องการลักษณะบ้านทรงสมัยใหม่ (แบบบ้านโมเดิร์น) ชั้นเดียว พื้นที่ใช้สอย 80–120 ตร.ม. ราคา 500,000–1,000,000 บาท ข้อมูลดังแสดงใน Fig. 2

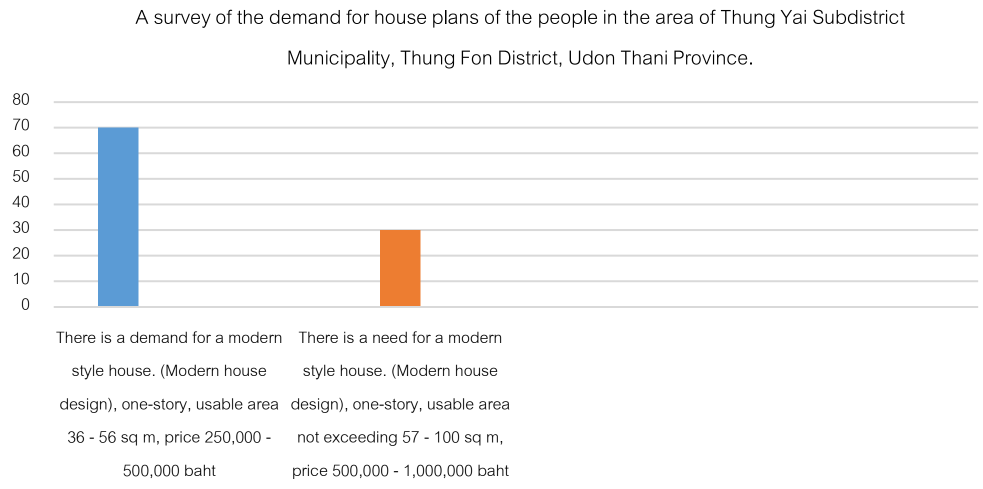


Fig. 2 Survey results of desired house plans

ผลการออกแบบโครงสร้างอาคาร

หลังจากได้ผลการสำรวจคณะวิจัยได้เริ่มต้นเลือกแบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 1 และแบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 2 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Figs. 3 และ 4) มาเป็นต้นแบบในการปรับปรุง เนื่องจากแบบบ้านทั้ง 2 แบบนี้ มีลักษณะใกล้เคียงกับความต้องการของประชาชน ในเขตพื้นที่กรณีศึกษา การออกแบบโครงสร้างอาคาร คณะผู้วิจัยใช้โปรแกรม RC RITversion 1.2 และโปรแกรม Auto+Cad เพื่อการเขียนแบบ โดยได้ทำการปรับขนาดพื้นที่ใช้สอยแบบบ้านให้มีขนาดเล็กลง ตรงกับตามความต้องการของประชาชนในเขตพื้นที่กรณีศึกษา พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนวัสดุกรอบอาคารจากเดิมที่ใช้เป็นผนังก่ออิฐบล็อกฉาบปูน ที่มีค่าการต้านทานความร้อน (U) เท่ากับ 1.43 $W/m^2{\times}°C$ เปลี่ยนเป็นผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูน ที่มีค่าการต้านทานความร้อน (U) เท่ากับ 1.52 $W/m^2{\times}°C$ และเนื่องจากอิฐมวลเบาผลิตจากวัสดุธรรมชาติทำให้อิฐมีน้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าอิฐบล็อกฉาบปูน และมีความคงทนต่อสภาพอากาศ ทำให้สามารถช่วยป้องกันความร้อนเข้ามาภายในตัวอาคารได้เป็นอย่างดี ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกสบาย ลดการใช้เครื่องปรับอากาศ สามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร อีกทั้งอิฐมวลเบาฉาบปูนยังสามารถดูดซับเสียงได้ดี ช่วยลดความดังของเสียงระหว่างห้องภายในอาคารอีกด้วย

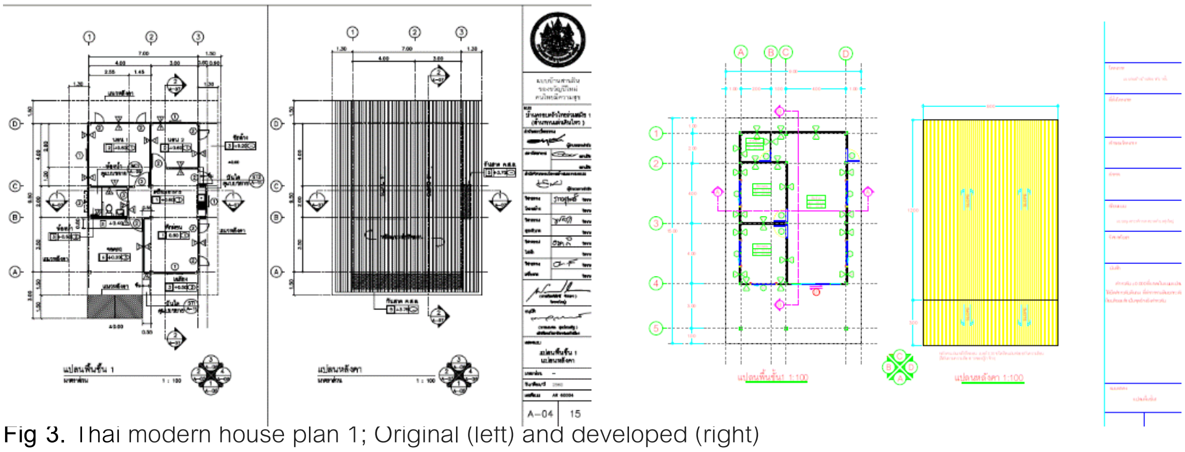


Fig 3. Thai modern house plan 1; Original (left) and developed (right)

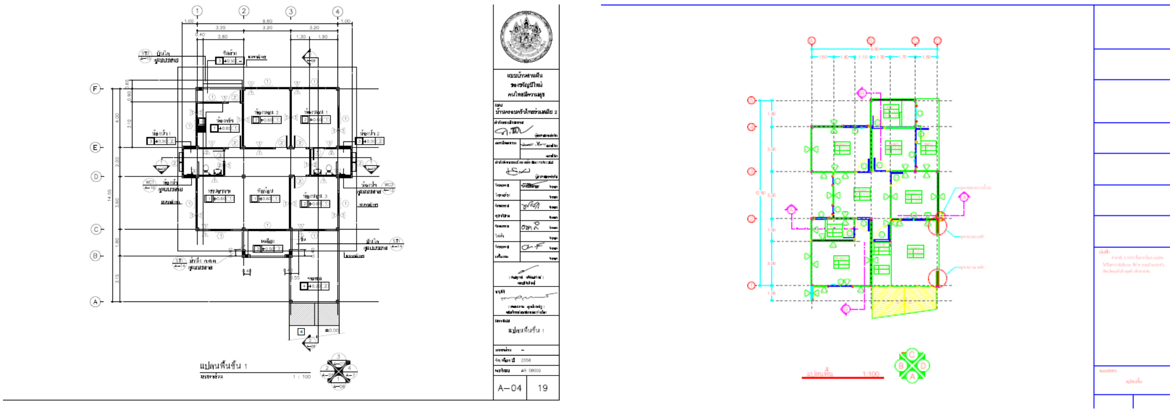


Fig. 4 Thai modern house plan 2; Original (left) and developed (right)

การประมาณราคาค่าก่อสร้าง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการถอดแบบประมาณราคาตามหลักเกณฑ์การคำนวณราคากลางงานก่อสร้างของทางราชการ ลงวันที่ 15 มีนาคม 2560 ของกรมบัญชีกลางกำหนด โดยใช้ค่าแรงตามบัญชีค่าแรงของกรมบัญชีกลางกำหนด (Table 1) ค่าวัสดุใช้ตามราคาวัสดุพาณิชย์จังหวัดอุดรธานี และค่าวัสดุตามท้องที่บางรายการ

Table 1 Some laboer cost announced by the Comptroller Genaral's Department

No.	list	unit	wages/unit (baht)
1	Excavation and backfill work	cum	99
2	Bottom material work (coarse sand)	cum	91
3	ready mixed concrete	cum	391
4	model wood	square meter	133

จากการประมาณราคาแบบแปลนบ้านที่ได้รับการปรับปรุง (แบบบ้านอนุเคราะห์) ทั้ง 2 แบบพบว่า แบบบ้านอนุเคราะห์ ชั้นเดียวแบบที่ 1 มีราคาค่าก่อสร้าง 500,000 บาท และแบบบ้านอนุเคราะห์ ชั้นเดียวแบบที่ 2 มีราคาค่าก่อสร้าง 980,000 บาท ซึ่งราคาค่าก่อสร้างของแบบทั้ง 2 นั้นอยู่ในช่วงความต้องการของประชาชนในเขตพื้นที่กรณีศึกษา

ผลการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV)

จากการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV) ของแบบบ้านอนุเคราะห์ทั้ง 2 แบบ โดยใช้หลักการตามประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่องกำหนดค่ามาตรฐานในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2564 โดยใช้เกณฑ์ค่า OTTV ดังแสดงใน Table 2 และ Table 3 ได้ผลการคำนวณดังแสดงใน Table 4 ถึง Table 7

Table 2 Specified OTTV announced by Energy Conservation Act

building type	The total heat transfer value of the exterior walls of the building (watts/sq.m.)
1. Theater	40
2. Hotel	30
3. Service location	40
4. Medical facility	30
5. Educational institutions	50
6. Office	50
7. Department stores or shopping centers	40
8. Condominium	30
9. Assembly building	40

Table 3 Specified RTTV announced by Energy Conservation Act

building type	The total heat transfer value of the roof (watts/sq.m.)
1. Theater	8
2. Hotel	6
3. Service location	8
4. Medical facility	6
5. Educational institutions	10
6. Office	10
7. Department stores or shopping centers	8
8. Condominium	6
9. Assembly building	8

จากการตรวจสอบแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียว แบบที่ 1 ค่า OTTV มีค่าเท่ากับ 21.70 W/m^2 และค่า RTTV มีค่าเท่ากับ 2.76 W/m^2 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่ากระทรวงพลังงานกำหนด จากการตรวจสอบแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียว แบบที่ 2 ค่า OTTV มีค่าเท่ากับ 19.24 W/m^2 และค่า RTTV มีค่าเท่ากับ 4.80 W/m^2 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่ากระทรวงพลังงานกำหนด

Table 4 Calculated OTTVi of the developed house plan 1

direction	Heat transfer value (Q : W)		OTTVi (Watts per square meter)
	Solid wall	Translucent walls	
north	133.37	311.28	4.49
east	188.51	358.03	5.52
west	133.75	385.99	5.25
south	173.14	464.57	6.44
total heat transfer of the wall (Watts per square meter)			21.70

Table 5 Calculated RTTVi of the developed house plan 1

Direction	Roof area on each side (sq.m.)	RTTVi (Watts per square meter)
north	8.5	0.00
east	11.9	1.39
west	8.5	0.00
south	11.9	1.37
total heat transfer of the roof (Watts per square meter)		2.76

Table 6 Calculated OTTVi of the developed house plan 2

Direction	Heat transfer value (Q : W)		OTTVi
	Solid wall	Translucent walls	(Watts per square meter)
north	253.46	661.15	6.20
east	209.79	438.25	4.39
west	288.24	375.97	4.50
south	227.52	382.59	4.14
total heat transfer of the wall (Watts per square meter)			19.24

Table 7 Calculated RTTVi of the developed house plan 2

Direction	Roof area on each side (sq.m.)	RTTVi (Watts per square meter)
north	35	0.74
east	47	1.61
west	38	0.69
south	50	1.75
total heat transfer of the roof (Watts per square meter)		4.80

คณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบประมาณราคาค่าก่อสร้างแบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 1 และแบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 2 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กับแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียว แบบที่ 1 และแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียว แบบที่ 2 พบว่าราคาค่าก่อสร้างแบบบ้านอนุเคราะห์ทั้ง 2 แบบ ที่ได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงการประหยัดพลังงาน มีค่าต่ำกว่าราคาค่าก่อสร้างของแบบบ้านดั้งเดิม ดังแสดงไว้ใน Fig. 5

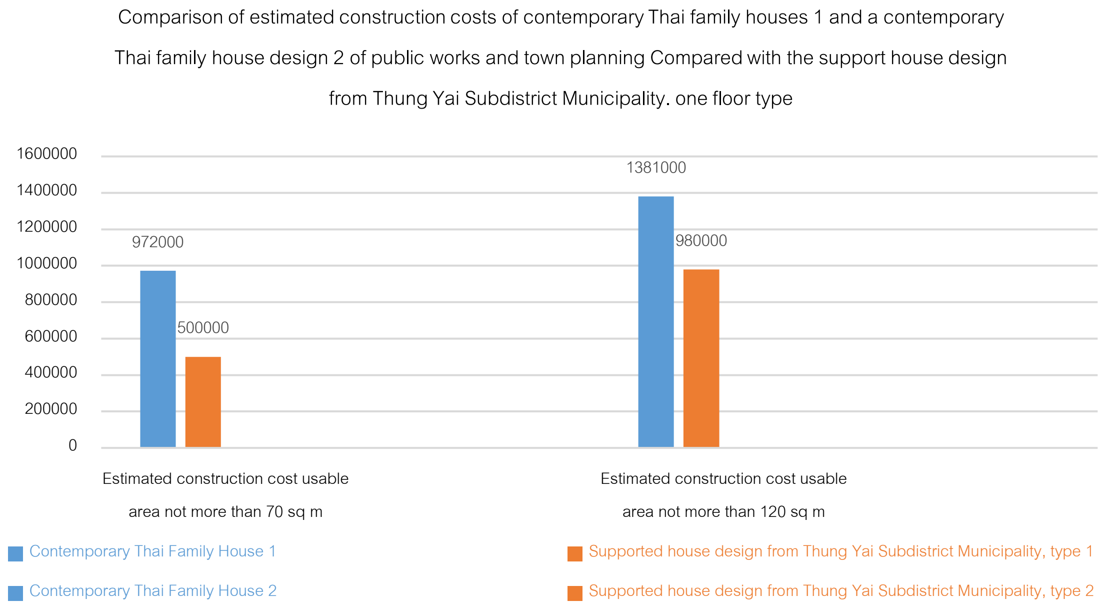


Fig. 5 Build cost comparisons between the original and developed house plans

สรุป

จากการสำรวจหาข้อมูลความต้องการแบบแปลนบ้านของประชาชนในเขตท้องที่เทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี ช่วงระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2563–31 ธันวาคม พ.ศ. 2563 ด้วยแบบสอบถามพบว่าประชากรร้อยละ 70 มีความต้องการบ้านลักษณะบ้านทรงสมัยใหม่ (แบบบ้านโมเดิร์น) ชั้นเดียว พื้นที่ใช้สอย 36–56 ตร.ม. ราคา 250,000–500,000 บาท และประชากรร้อยละ30 มีความต้องการลักษณะบ้านทรงสมัยใหม่ (แบบบ้านโมเดิร์น) ชั้นเดียว พื้นที่ใช้สอยไม่เกิน 57–100 ตร.ม. ราคา 500,000–1,000,000 บาท

จากการประมาณราคาอาคารทั้ง 2 แบบพบว่า แบบบ้านที่ได้รับการปรับปรุงโดยคณะผู้วิจัย หรือแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียวแบบที่ 1 มีราคาค่าก่อสร้าง 500,000 บาท และแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียวแบบที่ 2 มีราคาค่าก่อสร้าง 980,000 บาท ซึ่งราคาค่าก่อสร้างของแบบทั้ง 2 นั้นอยู่ในช่วงความต้องการของประชาชนในเขตพื้นที่กรณีศึกษา ซึ่งงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้เปลี่ยนวัสดุผนังเดิม จากผนังอิฐบล็อกฉาบปูนเป็นผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนซึ่งช่วยป้องกันความร้อนจากภายนอกอาคารได้ดีกว่าเดิม

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) แบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียวแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 21.70 W/m^2 และ19.24 W/m^2 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่า OTTV 30 W/m^2 ที่เป็นค่าแนะนำของกระทรวงพลังงาน และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV) ของแบบบ้านอนุเคราะห์จากเทศบาลตำบลทุ่งใหญ่ ชั้นเดียวแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2.76 W/m^2 และ 4.80 W/m^2 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าRTTV 6 W/m^2 ที่เป็นค่าแนะนำของกระทรวงพลังงาน

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบแปลนบ้านของกรมโยธาธิการและผังเมืองมาใช้เพื่อบริการประชาชน ให้เหมาะสม และตรงตามความต้องการของประชาชน การใช้แบบแปลนบ้านที่พัฒนาขึ้นโดยงานวิจัยนี้สามารถช่วยส่งเสริมให้ประชาชนมีความรู้ในเรื่องการอนุรักษ์พลังงานรวมทั้งสามารถใช้แบบบ้านประหยัดพลังงานเพื่อกระตุ้นให้ประชาชนเข้าใจและสนใจเรื่องการอนุรักษ์พลังงานมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กาญจน์กรอง, สุอังคะ วัฒนวงศ์, รัตนวราห, รุ่งอรุณ บุญถ่าน, มัตติกา บุญมา, พิพัฒน์ พิพัฒน์พงศานนท์. 2557. ประเมินด้านการประหยัดพลังงานของการออกแบบและการใช้วัสดุก่อสร้างเพื่อการประหยัดพลังงานของบ้านพักอาศัย.รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.

ณัฐชา มาตุภูมานนท์. 2559. ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อบ้านสั่งสร้างเอสซีจี ไฮม์ (SCG HEIM) ของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล. การค้นคว้าอิสระ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

กระทรวงพลังงาน. 2564. ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่องกำหนดค่ามาตรฐานในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. ราชกิจจานุเบกษา.

สาโรจน์ ดำรงศีล. 2559. ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์. https://engfanatic.tumcivil.com › RC-SR › RC-WSD, 15 ตุลาคม 2563.

การศึกษาผลกระทบของเวลาทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติจากการแปรผันความสูงของเพดาน อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน และความไวในการตอบสนองของหัวกระจายน้ำดับเพลิงด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

A numerical investigation of the effects of variations of ceiling height, heat release rate and sprinkler response time index to the sprinkler activation time

มาเฮศ ราย[a], **ณัฐศักดิ์ บุญมี**[b,*]
Mahesh Rai[a], Natasak Boonmee[b]
[a]หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[a]Fire Protection Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]Department of Machanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: fengnab@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการแปรผันความสูงของเพดาน อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (Heat Release Rate, HRR) และความไวในการตอบสนอง (RTI) ของหัวกระจายน้ำดับเพลิงต่อเวลาในการทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิง โดยใช้โปรแกรมจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (FDS) ภายในโดเมนขนาดกว้าง 11 เมตร ยาว 11 เมตร โดยแปรผันความสูงของโดเมนคือ 6 เมตร, 9 เมตร, 12 เมตร และ 15 เมตรตามลำดับ กองเพลิงเผาไหม้ในสภาวะคงตัวขนาด 2 MW, 4 MW, และ 6 MW และทำการแปรผันค่า RTI เป็นสองค่าคือ 50 $(ms)^{0.5}$ และ 135 $(ms)^{0.5}$ จากการจำลองพบว่าเวลาในการทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเพดานหรือค่า RTI เพิ่มขึ้นหรือ HRR ลดลง เป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณีของ HRR ขนาด 2 MW ที่ความสูง 12 เมตร และ 15 เมตร จะมีหัวกระจายน้ำดับเพลิงทำงานเพียงหนึ่งหัวสำหรับการจำลองทั้งสองค่า RTI

คำสำคัญ: ความสูงเพดาน, ความไวในการตอบสนอง, อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน

Abstract

This research performed numerical simulations to investigate the effects of variations in ceiling height, fire heat release rate, and response time index (RTI) on sprinkler activation time. A computational fluid dynamics fire model, Fire Dynamics Simulator (FDS) version 6, was employed in the study. The simulations were carried out in a computational domain of 11 m. wide, 11 m. long and 4 ceiling heights of 6 m, 9 m, 12 m, and 15 m, respectively. A steady fire with varying heat releases of 2 MW, 4 MW, and 6 MW was placed on the domain floor center as a main simulation heat source. Two RTI values of 50 $(ms)^{0.5}$ and 135 $(ms)^{0.5}$ were considered in this research. The study found that the sprinkler activation time increases as ceiling height or RTI increases. As the fire heat release decreases, the sprinkler activation time increases. It should be noted that for simulation cases with heat release of 2 MW and ceiling heights of 12 m and 15 m, only one sprinkler head was activated for both RTI values.

Keywords: Ceiling, Heat release rate, Response time index

คำนำ

จากการเก็บสถิติเหตุเพลิงไหม้ในรอบ 100 ปีพบว่ามากกว่า 73% ของเหตุเพลิงไหม้ในอาคารที่ได้ทำการติดตั้งระบบดับเพลิงอัตโนมัติอย่างถูกต้อง จะสามารถควบคุมเพลิงได้โดยใช้จำนวนหัวกระจายน้ำดับเพลิงไม่เกิน 9 หัว (FM Global, 2018) ซึ่งสามารถลดความเสียหรือจำกัดความเสียหายของโรงงานได้อย่างมาก ซึ่งต่างจากอาคารที่ไม่ได้มีการติดตั้งระบบดับเพลิงอัตโนมัติ และจากการเก็บสถิติการเกิดเหตุเพลิงไหม้ของโรงงานในประเทศไทยระหว่างปี พศ. 2561–2564 นั้น พบว่าเกิดเหตุเพลิงไหม้มากถึง 79 ครั้ง (ข้อมูลสถิติอุบัติเหตุ 2561, 2562), 48 ครั้ง (ข้อมูลสถิติอุบัติเหตุ 2562, 2563), 42 ครั้ง (ข้อมูลสถิติอุบัติเหตุ 2563, 2564) และ 92 ครั้ง (ข้อมูลสถิติอุบัติเหตุ 2564, 2565) ตามลำดับ

โรงงานอุตสาหกรรมนั้นเป็นสถานประกอบกิจการที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยในระดับปานกลาง ถึงระดับสูง ซึ่งหากโรงงานเหล่านี้ไม่มีระบบดับเพลิงอัตโนมัติ เมื่อเกิดเหตุอัคคีภัยในแต่ละครั้งมักจะมีความเสียหายมากกว่าอาคารประเภทอื่น และการก่อสร้างโรงงานในปัจจุบันโดยเฉพาะคลังสินค้าที่เริ่มมีการก่อสร้างสูงมากขึ้นตามเทคโนโลยีการจัดเก็บที่เปลี่ยนไป หรือในหลายครั้งก็เป็นการก่อสร้างที่ต้องการอาคารที่มีความสูงโปร่งเพื่อการระบายความร้อนภายในอาคาร ปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิง เนื่องจากความร้อนจำเป็นต้องอาศัยระยะเวลาในการลอยตัวขึ้นไปยังหลังคาหรือเพดานตามพฤติกรรมการไหลของควัน ซึ่งเมื่อกระทบเพดานแล้วควันก็จะไหลตามแนวของหลังคาหรือเพดาน (ณัฐศักดิ์, 2553) และการไหลของควันตามแนวหลังคาหรือเพดานนี้เองจะเป็นการพาความร้อนไปยังหัวกระจายน้ำดับเพลิงเพื่อทำให้หัวกระจายน้ำดับเพลิงทำงานโดยที่ของเหลวในกระเปราะได้รับความร้อนจนเกิดการขยายตัวจนดันให้กระเปราะแตกและปล่อยน้ำออกมา (National Fire Protection Association 13, 2016)

งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบต่อระดับความสูงในการติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงต่อเชื้อเพลิงที่มีอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (Heat Release Rate) ที่แตกต่างกัน และความไวในการตอบสนอง (Response Time Index, RTI) ที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาหาผลกระทบ และเป็นแนวทางในการติดตั้ง, เลือกใช้หัวกระจายน้ำดับเพลิงให้มีความสัมพันธ์กันในแต่ละระดับความสูงในการติดตั้ง และอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (Heat Release Rate, HRR) ของเชื้อเพลิง โดยการจำลองเหตุเพลิงไหม้ด้วยโปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมในการจำลองเหตุเพลิงไหม้ เช่น การออกแบบระบบสปริงเกลอร์และการศึกษาผลของการติดตั้งระบบในบ้านพักอาศัยโดยวิธีการคำนวณชลศาสตร์และการจำลองพลศาสตร์อัคคีภัย (ธนโชค, 2552), การศึกษาการจำลองรูปแบบการเกิดอัคคีภัย โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์อัคคีภัย กรณีศึกษาคลังเก็บสินค้าโรงไฟฟ้าราชบุรีเพาเวอร์ (ดินพงศ์, 2553), การศึกษาการแผ่กระจายควันโดยโปรแกรมพลศาสตร์อัคคีภัย กรณีศึกษา คลังเก็บสินค้าขนาด 360 ตารางเมตร (ธรรมนูญ, 2554) เป็นต้น โดยการในครั้งนี้มีการกำหนดขอบเขต (Boundary) ของโดเมน ขนาด กว้าง 11 เมตร ยาว 11 เมตร และมีขนาดกริด 0.25 เมตร ซึ่งเป็นขนาดกริดที่เหมาะสมในการจำลอง การศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (ณัฐศักดิ์, 2550) และกำหนดอัตราการลามไฟแบบรวดเร็ว (Ultra-Fast) ที่มีค่าตัวประกอบการลามไฟ 0.1876 kW/s^2 (National Fire Protection Association 72, 2016)

วิธีการ

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาพื้นฐานและหลักการคำนวณของโปรแกรม FDS

การศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของเวลาทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติจากการแปรผันความสูงของเพดาน อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน และความไวในการตอบสนองของหัวกระจายน้ำดับเพลิงใน

ครั้งนี้นั้น ใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์อัคคีภัย (FDS) โดยการจำลองลักษณะของการเคลื่อนที่ของไฟด้วยระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) แก้สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) สมการอนุรักษ์มวลย่อย (Conservation of Species) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) ได้ตาม Equations 1–4 ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t}\vec{u} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}\right) + \nabla \mathrm{p} = \rho \vec{g} + \vec{f} + \nabla \tau \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h \rho D_i \nabla Y_i \quad (4)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่น, $\vec{u}$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว, Y_i คือ เศษส่วนโดยมวลย่อยที่ i, $\dot{m}_i'''$ คือ อัตราการทำปฏิกิริยาต่อปริมาตรของมวลย่อยที่ i, D_i คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลย่อยที่ i, p คือ ความดัน, $\vec{f}$ คือ แรงกระทำภายนอกที่กระทำต่อของไหล, τ คือ Viscosity stress tenor, h คือ เอนทัลปี, q_r คือ ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน, k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, T คือ อุณหภูมิ (Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide, 2000)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการกำหนดขอบเขต (Boundary) และขนาดกริดของโปรแกรมจำลองเหตุเพลิงไหม้

ทำการกำหนดขอบเขต (Boundary) ของโปรแกรมให้มีขนาดกว้าง 11 เมตร ยาว 11 เมตร ซึ่งเป็นค่าขนาดของพื้นที่ที่เหมาะสมกับการติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิง จำนวน 9 หัว ที่สามารถควบคุมเพลิงให้อยู่ในวงจำกัด หรือสงบลงได้ในอัตราส่วนร้อยละ 73 ของจำนวนเหตุเพลิงไหม้ทั้งหมด โดยที่มีระยะห่างระหว่างหัว 3 เมตรทั้งแกน x และ แกน y (FM Global, 2018) และมีความสูงแปรผันตามขอบเขตงานวิจัย กล่าวคือที่ความสูง 6 เมตร, ที่ความสูง 9 เมตร, ที่ความสูง 12 เมตร และที่ความสูง 15 เมตร ซึ่งเป็นค่าความสูงของเพดานที่ใช้กำหนดการออกแบบระบบหัวกระจายน้ำดับเพลิงตามมาตรฐาน NFPA 13 และทำการกำหนดขนาดของกริดให้มีขนาดเท่ากันทั้ง 3 แกนที่ 0.25 เมตร (ณัฐศักดิ์, 2550) ซึ่งเป็นตัวเลขที่เชื่อถือได้

ขั้นตอนที่ 3 ทำการกำหนดอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (Heat release rete) และระยะเวลาการลามไฟ (Fire Growth)

การกำหนดค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (HRR) และระยะเวลาการลามไฟ (Fire Growth) เป็นไปตามขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้ กล่าวคือ 2 MW, 4 MW และ 6 MW และเป็นการลามไฟแบบรวดเร็วมาก ซึ่งมีค่าตัวประกอบการลามไฟ (α) เท่ากับ 0.1876 kW/s^2 ซึ่งอ้างอิงจากกองเพลิงขนาดกว้าง 2 เมตร และยาว 2 เมตร และคำนวณค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนต่อตารางเมตร (HRR) ได้ตาม Equation 5 และคำนวนระยะเวลาการลามไฟได้ (Fire Growth) ตาม Equation 6 โดยได้ผลสรุปตาม Fig. 1

$$\text{Heat release rates} = \frac{\text{Total heat release rates}}{\text{Area}} \quad (5)$$

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 4 ทำการกำหนดค่าความไวในการตอบสนอง (Response Time Index, RTI) และอุณหภูมิทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิง (Operating Temperature)

การทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัตินั้น เป็นการทำงานอันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมบริเวณโดยรอบพื้นที่ติดตั้ง โดยหากหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติมีค่าตัวเลขความไวในการตอบสนอง (RTI) ที่สูง จะทำให้หัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติทำงานช้า ในทางกลับกันหากหัวกระจายน้ำดับเพลิงมีค่าตัวเลขความไวในการตอบสนอง (RTI) ที่ต่ำ จะทำให้หัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติทำงานเร็ว (ที่อุณหภูมิทำงานที่เท่ากัน) โดยสามารถคำนวณได้จาก Equation 7 ดังนี้

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI}(T_g - T_l) \qquad (7)$$

โดย T_l คือ อุณหภูมิทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติ, T_g คือ อุณหภูมิของควันร้อน u คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของควันร้อน (Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide, 2000)

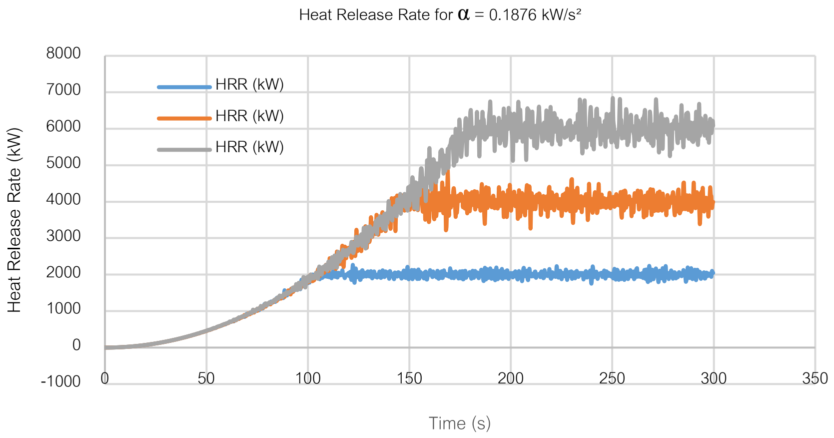


Fig. 1 Heat release rate and fire growth for simulation

และจาก Equation 7 ทำให้เราต้องทราบว่าอุณหภูมิทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงนั้นมีผลต่อการจำลองเหตุเพลิงไหม้ (FDS) และจากขอบเขตงานวิจัยในครั้งนี้นั้นได้ทำการศึกษาผลการทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงที่ความสูงต่างๆ และอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนต่างๆ และยังรวมถึงการศึกษาถึงค่าความไวในการตอบสนอง (RTI) โดยค่าความไวในการตอบสนอง (RTI) ที่ศึกษาในครั้งนี้มี 2 ค่า คือ ค่าความไวในการตอบสนอง (RTI) เท่ากับ 50 ซึ่งมีกระเปราะแก้วขนาด 3 มิลลิเมตร ตาม Fig. 2 และ 135 ซึ่งมีกระเปราะแก้วขนาด 5 มิลลิเมตร ตาม Fig. 3 ซึ่งเป็นค่าความไวในการตอบสนอง (RTI) และอุณหภูมิทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงที่ 68 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานที่มีขายในท้องตลาด โดยนำค่าความไวในการตอบสนอง (RTI) ทั้งสองค่าและอุณหภูมิทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติไปกำหนดลงในโปรแกรมจำลองเพลิงไหม้ (FDS)

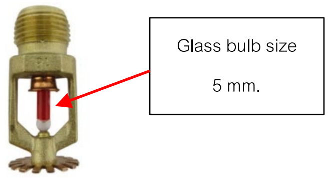


Fig. 2 Example of Standard Response Sprinkler

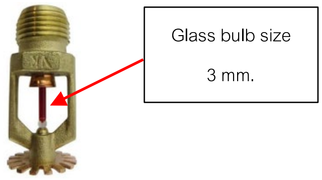


Fig. 3 Example of Quick Response Sprinkler

ขั้นตอนที่ 5 ทำการกำหนดตำแหน่งหัวกระจายน้ำดับเพลิงและตำแหน่งเชื้อเพลิง

การจัดวางหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นการจัดวางตามมาตรฐาน โดยมีระยะห่างระหว่างหัวจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติด้านละ 3 เมตร และมีพื้นที่ป้องกันต่อหัวกระจายน้ำดับอัตโนมัติเพลิงไม่เกิน 9 ตารางเมตร ตามมาตรฐานการติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติภายในพื้นที่คลังสินค้า (NFPA13, 2016) และจัดวางเชื้อเพลิงไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบจำลอง โดยสามารถสรุปภาพรวมการติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติและตำแหน่งกึ่งกลางของเชื้อเพลิงได้ตาม Fig. 4

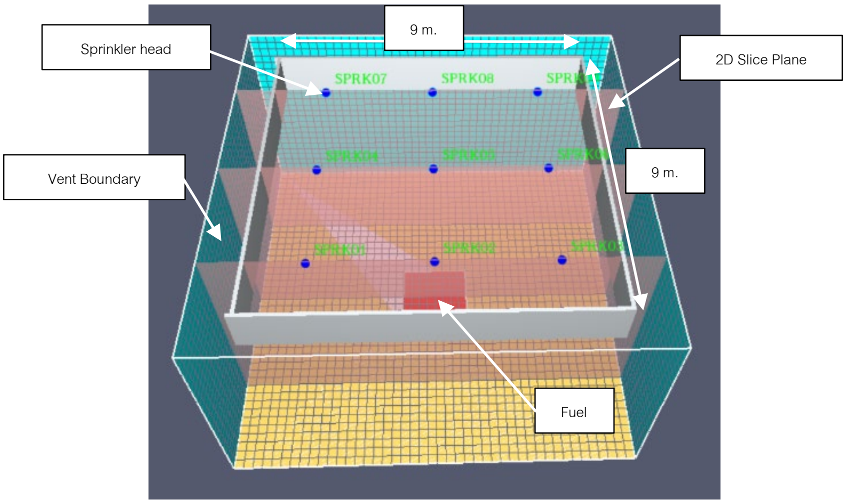


Fig. 4 Determine the location of sprinkler head and fuel into the simulation program

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดจำนวนกรณีศึกษา

จากการกำหนดค่าต่างๆในโปรแกรมจำลองเพลิงไหม้ สามารถสรุปตารางกรณีศึกษาและจำลองเหตุเพลิงไหม้เป็น 24 กรณี เพื่อศึกษาผลกระทบในแต่ละเหตุการณ์ ตาม Table 1

Table 1 Number of case study

No.	Heat release rates (MW.)	Fire Growth (s.)	Ceiling height (m.)	Response time index (RTI), $(m.s)^{0.5}$
1,2	2	104	6	50,135
3,4	2	104	9	50,135
5,6	2	104	12	50,135
7,8	2	104	15	50,135
9,10	4	147	6	50,135

11,12	4	147	9	50,135
13,14	4	147	12	50,135
15,16	4	147	15	50,135
17,18	6	179	6	50,135
19,20	6	179	9	50,135
21,22	6	179	12	50,135
23,24	6	179	15	50,135

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการจำลองเหตุเพลิงไหม้ที่ความสูงเพดาน 6 เมตรและ 9 เมตร พบว่าหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติทำงานครบทั้ง 9 หัวที่ติดตั้งในพื้นที่ ตาม Figs. 5–6 โดยที่ระยะเวลาในการทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัตินั้นมีแนวโน้มทำงานช้าลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มในการทำงานเร็วขึ้นเมื่ออัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นตาม Figs. 9–10 และเมื่อเพิ่มความสูงเป็น 12 เมตร และ 15 เมตรนั้น พบว่าการทำงานหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติที่อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน 2 MW นั้นทำงานเพียง 1 หัวเท่านั้นตาม Figs. 7–8 และที่อัตราการปลดปล่อยความร้อน 4 MW และ 6 MW นั้นหัวกระจายน้ำดับเพลิงยังคงทำงานครบทั้ง 9 หัวที่ติดตั้งในพื้นที่ตาม Fig. 10

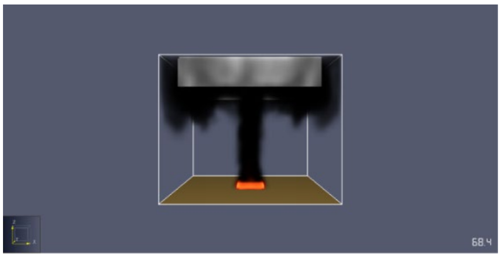


Fig. 5 First sprinkler (1st) activates at 68.4 s. for heat release rate 2MW at ceiling level 9 m. (RTI 50)

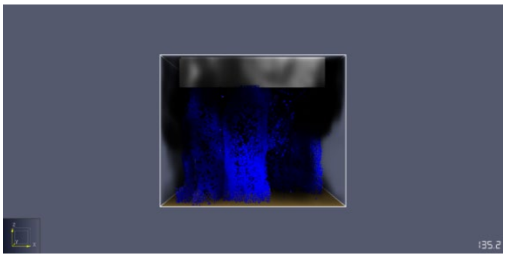


Fig. 6 Last sprinkler (9th) activates at 135.2 s. for heat release rate 2MW at ceiling level 9 m. (RTI 50)

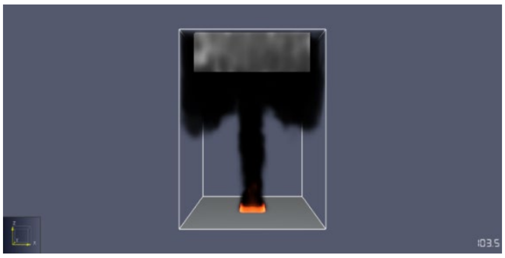


Fig. 7 First sprinkler (1st) activates at 103.5 s. heat release rate 2MW at ceiling level 15 m. (RTI 50)

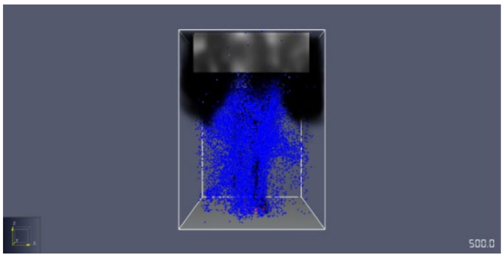


Fig. 8 Only First sprinkler (1st) activates for heat for release rate 2MW at ceiling level 15 m after 500 s. (RTI 50)

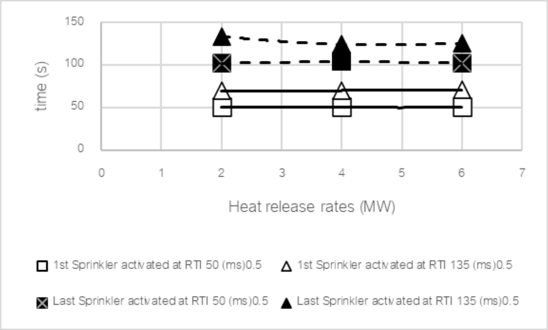


Fig. 9 Summary of activation time of sprinkler ceiling height 6 m.
(RTI 50)

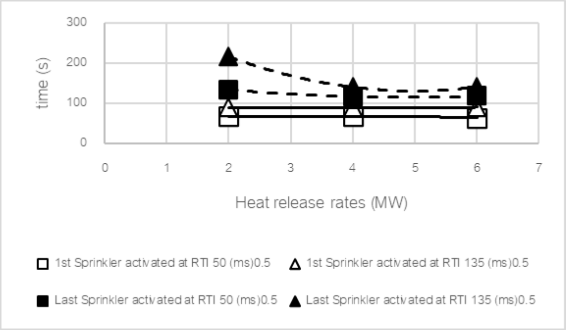


Fig. 10 Summary of activation time of sprinkler at at ceiling height 9 m.
(RTI 50)

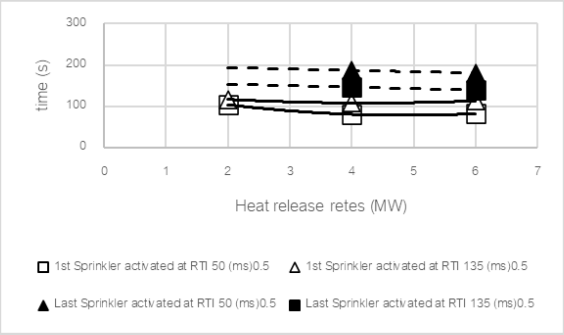


Fig. 11 summary of activation time of sprinkler at ceiling height 12 m.
(Only 1 Sprinkler activates for HRR 2MW)

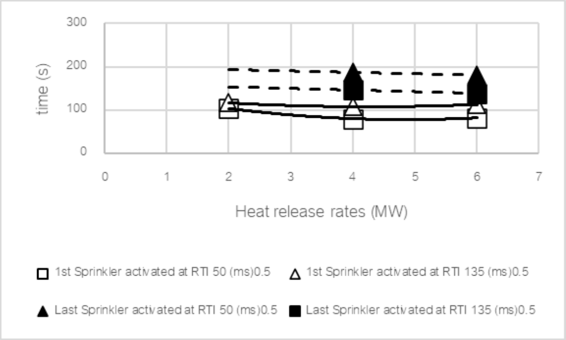


Fig. 12 summary of activation time of sprinkler at ceiling height 15 m.
(Only 1 Sprinkler activates for HRR 2MW)

สรุป

จากการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติในพื้นที่ที่มีความสูงไม่เกิน 9 เมตร ทั้ง 2 ค่าความไวในการตอบสนองของหัวกระจายน้ำดับเพลิงนั้น ที่อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนขั้นต่ำที่ 2 MW ความร้อนยังคงเพียงพอที่จะทำให้หัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติทำงานครบทั้ง 9 หัว ทั่วพื้นที่ที่ทำการติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติ แต่เมื่อทำการติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงที่ความสูงตั้งแต่ 12 เมตรขึ้นไป ทั้ง 2 ค่าความไวในการตอบสนองของหัวกระจายน้ำดับเพลิงนั้น พบว่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนขั้นต่ำที่ 2 MW มีความร้อนไม่เพียงพอต่อการกระตุ้นให้หัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติทำงานครบทั้ง 9 หัว โดยความร้อนนั้นสามารถกระตุ้นให้หัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติทำงานเพียง 1 หัวเท่านั้น และเมื่อความสูงในการติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติเพิ่มมากขึ้น จะทำให้การทำงานของหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติทำงานช้าลง เนื่องจากการสะสมความร้อนที่เพดานนั้นลดลง ทั้งนี้การติดตั้งหัวกระจายน้ำดับเพลิงในพื้นที่ที่มีความสูงตั้งแต่ 12 เมตรขึ้นไป โดยมีเชื้อเพลิงในพื้นที่ที่มีอัตราการการปลดปล่อยความร้อนไม่เกิน 2 MW นั้น จำเป็นต้องพิจารณาแนวทางการปรับปรุงบริบทอาคารก่อนทำการติดตั้งระบบหัวกระจายน้ำดับเพลิงด้วยวิธีการอื่นเพิ่มเติม อันเนื่องจากความสามารถในการทำงานของระบบหัวกระจายน้ำดับเพลิงนั้นลดลง เช่น การพิจารณาปรับปรุงความสูงของเพดานให้มีความสูงในช่วงไม่เกิน 9 เมตร เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2550. การศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. ใน: รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 62–69.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2553. Modeling of fire plume and ceiling jet. พลศาสตร์อัคคีภัย. กรุงเทพฯ, หน้า 237–253.

ดิสพงศ์ ไขแสง. 2553. การศึกษาการจำลองรูปแบบการเกิดอัคคีภัย โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์อัคคีภัย กรณีศึกษาคลังเก็บสินค้าโรงไฟฟ้าราชบุรีเพาเวอร์. การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนโชค สุขจิตต์. 2552. การออกแบบระบบสปริงเกลอร์และการศึกษาผลของการติดตั้งระบบในบ้านพักอาศัยโดยวิธีการคำนวณชลศาสตร์และการจำลองพลศาสตร์อัคคีภัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธรรมนูญ เทพเสนา. 2554. การศึกษาการแผ่กระจายควันโดยโปรแกรมพลศาสตร์อัคคีภัย กรณีศึกษา คลังเก็บสินค้าขนาด 360 ตารางเมตร. การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บวร สัตยาวุฒิพงศ์. 2562. ข้อมูลสถิติการเกิดอุบัติเหตุ 2561. http://reg3.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2016/02/accident61.pdf, 10 พฤศจิกายน 2565.

บวร สัตยาวุฒิพงศ์. 2563. ข้อมูลสถิติการเกิดอุบัติเหตุ 2562. http://reg3.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2022/01/accident-2562.pdf, 10 พฤศจิกายน 2565.

บวร สัตยาวุฒิพงศ์. 2564. ข้อมูลสถิติการเกิดอุบัติเหตุ 2563. http://reg3.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2022/01/accident-2563.pdf, 10 พฤศจิกายน 2565.

บวร สัตยาวุฒิพงศ์. 2565. ข้อมูลสถิติการเกิดอุบัติเหตุ 2564. http://reg3.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2022/02/acc1-12-64.pdf, 10 พฤศจิกายน 2565.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2552.

FM, G. Understanding the Hazard Lack of Automatic Sprinkler. United States of America, FM Insurance Company Limited.

National Fire Protection Association. 2016. NFPA 13 Automatic Sprinkler Systems Handbook. United States of America, National Fire Protection Association.

National Fire Protection Association. 2016. NFPA 72 Handbook National Fire Alarm and Signaling code. United States of America, National Fire Protection Association.

National Institute of Standard and Technology (NIST). 2000. Fire Dynamic Simulator – Technical Reference Guide. 2000: 3

การจำลองการเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินระหว่างสถานีสนามไชย ถึง สถานีอิสรภาพ

Fire simulation in the metro tunnel between Sanam Chai station and Itsaraphap station

ภัทรนันท์ รสภาธร*, **วิชัย ศิวะโกศิษฐ**

Pataranan Rossapathon*, Wichai Siwakosit

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pataranan.r@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจำลองการเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินระหว่างสถานีสนามไชย ถึง สถานีอิสรภาพ โดยใช้โปรแกรม PyroSim 2021 เพื่อศึกษาทัศนวิสัย ความเร็วของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศขณะเกิดเพลิงไหม้บริเวณต่าง ๆ ของขบวนรถไฟ ได้แก่ หัวขบวน กลางขบวน และท้ายขบวน โดยจำลองให้รถไฟเคลื่อนตัวออกจากสถานีสนามไชยมาถึงจุดกึ่งกลางอุโมงค์ และขณะเกิดเพลิงไหม้รถไฟไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ ใช้เวลาในการวิเคราะห์แบบจำลอง 6 นาที เท่ากับระยะเวลาการอพยพจากจุดเกิดเหตุไปยังจุดปลอดภัยตามมาตรฐาน NFPA 130 อุณหภูมิที่ต้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยในการอพยพ 50 °C ตามมาตรฐานของการรถไฟขนส่งมวลชลแห่งประเทศไทย (รฟม.) และทัศนวิสัยในการมองเห็นไม่ต่ำกว่า 2 เมตร ตามเกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นเกณฑ์ในการศึกษา จากการศึกษาพบว่ากรณีเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนของระบบระบายอากาศแบบบังคับ ให้ค่าทัศนวิสัยเพิ่มขึ้นมากที่สุด และให้ความเร็วของอากาศและอุณหภูมิของอากาศลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ และยังมีอุณหภูมิของอากาศสูงสุดไม่เกินเกณฑ์ความปลอดภัยในการอพยพ

คำสำคัญ: การจำลองการเกิดเพลิงไหม้, การระบายอากาศภายในอุโมงค์, อัคคีภัย

Abstract

This research studied a fire simulation in the metro tunnel from Sanam Chai station to Itsaraphap stations to examine visibility, air velocity, and air temperature when the fire broke out on each part of the train: the front, middle, and rear of the train. The PyroSim 2021 software was used in a simulation of fire when a train departed from Sanam Chai station to the middle tunnel until the train stopped due to the fire. The study considered the effect of different parameters, such as the evacuation time to a point of safety in 6 mins according to NFPA 130 (Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems), the temperature controlled for safe evacuation should be under 50°C according to the standards of the Mass Rapid Transit Authority of Thailand (MRTA) and visibility not less than 2 m according to the tenability criteria. The result showed that the case where a fire broke out at the front of the train with forced ventilation at 6 mins had the highest visibility value. It also significantly decreased air velocity and air temperature compared to other cases. In addition, the air temperature was within the criteria of temperature controlled for safe evacuation safe evacuation.

Keywords: Fire, Fire simulation, Tunnel ventilation

คำนำ

ปัจจุบันกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีการขยายตัวของเมืองและจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความหนาแน่นของการคมนาคมมากขึ้น ประชาชนจึงหันมาใช้ระบบการขนส่งสาธารณะในการเดินทางเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว หนึ่งในระบบการขนส่งสาธารณะที่ตอบโจทย์สังคมเมืองในปัจจุบันก็คือระบบรถไฟฟ้า จากข้อมูลปริมาณผู้โดยสารรถไฟฟ้า (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2565) รายงานว่าปี พ.ศ. 2562 (ก่อนสถานการณ์ Covid-19) มีจำนวนผู้โดยสารรถไฟฟ้า 401,089,185 คน เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2558 ที่มีจำนวนผู้โดยสารถไฟฟ้า 344,185,192 คน ถึง 16.53%

จากจำนวนผู้โดยสารรถไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ผู้ออกแบบและผู้ให้บริการรถไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการโดยสารเป็นสำคัญ เพื่อป้องกันและลดโอกาสเกิดอุบัติเหตุที่นำไปสู่การสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สิน โดยเฉพาะความเสียหายและความอันตรายที่เกิดจากเหตุเพลิงไหม้ เนื่องจากมีความยากลำบากในการอพยพผู้โดยสาร ทัศนวิสัยที่จำกัด มลพิษทางอากาศ และความร้อนสูงจากควันไฟ ในอดีตที่ผ่านมามีการรายงานความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์เพลิงไหม้รถไฟหลายแห่ง และเหตุการณ์เพลิงไหม้รถไฟที่ร้ายแรงที่สุดในโลก คือ เหตุการณ์เพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดินบากู (Baku’s Metro) ประเทศอาเซอร์ไบจาน (Azerbaijan) (RailSystem, n.d.) เมื่อวันที่ 28 ตุลาคม ค.ศ.1995 เกิดเหตุไฟฟ้าข้องบนรถไฟขบวนหนึ่งจนทำให้เกิดเพลิงไหม้ ซึ่งขณะนั้นกำลังให้บริการผู้โดยสารมากถึง 1,000 คน รถไฟขบวนดังกล่าวจึงต้องหยุดจอดภายในอุโมงค์ระหว่างสองสถานี คือ สถานี Uldus และ สถานี Narimanov ภายในอุโมงค์ได้ติดตั้งระบบระบายอากาศแต่เนื่องจากมีหน้าตัดค่อนข้างแคบ ทำให้การระบายอากาศไม่เพียงพอ ควันพิษส่งผลให้ผู้อพยพหายใจลำบาก แสงสว่างในอุโมงค์ที่ถูกควันไฟปกคลุมทำให้ทัศนวิสัยลดลง และร่องคูน้ำลึกระหว่างรางรถไฟเป็นอุปสรรคต่อการอพยพ จากเหตุการณ์ครั้งนั้นทำให้มีผู้เสียชีวิตถึง 289 ราย และผู้บาดเจ็บ 265 ราย

เหตุการณ์ดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะจำลองการเกิดเพลิงไหม้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาทัศนวิสัย ความเร็วของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศขณะเกิดเพลิงไหม้ โดยพิจารณาตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้ ในสถานการณ์ที่ต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล 11th Gen Intel Core i5-1135G7 RAM 8.00 GB
2. แบบอุโมงค์ทางเดินรถระหว่างสถานีสนามไชยถึงสถานีอิสรภาพ
3. แบบระบบระบายอากาศในอุโมงค์ (Equipment Schedule และ Specification)
4. แบบขบวนรถไฟที่ให้บริการ
5. โปรแกรม PyroSim 2021

วิธีการ

กำหนดเงื่อนไขของปัญหา

1.1 กองเพลิงขนาด 1×1 m^2 อัตราการปล่อยพลังงานความร้อน 7 MW/m^2 (วิชัย, 2544)

1.2 อุณหภูมิของอากาศภายในอุโมงค์เฉลี่ย (ก่อนเกิดเพลิงไหม้) 40 °C (วิชัย, 2544)

1.3 อุณหภูมิที่ต้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยในการอพยพ 50 °C (วิชัย, 2544)

1.4 ทัศนวิสัยในการมองเห็นไม่ต่ำกว่า 2 เมตร ตามเกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน (Hadjisophocleous, n.d.)

1.5 เวลาที่ใช้ในการแสดงผลและคำนวณ 360 วินาที (6 นาที) เท่ากับระยะเวลาการอพยพจากจุดเกิดเหตุไปยังจุดปลอดภัยตามมาตรฐานความปลอดภัย NFPA 130 (Abadgostar Tasisat Iraninan, 2007) รถไฟฟ้าใต้ดินสามารถใช้ปล่องระบายอากาศเป็นทางออกฉุกเฉินเพื่ออพยพผู้โดยสารให้ออกจากอุโมงค์ใต้ดินซึ่งนับเป็นจุดปลอดภัยเช่นเดียวกัน (นพดล, 2561)

1.6 อุโมงค์ฝั่งซ้าย และขวาเปิดออกสู่บรรยากาศ

คำนวณหาขนาดกริด

จากการศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (ณัฐศักดิ์, 2550) พบว่าเมื่อขนาดของกริดในเทอมตัวแปรไร้หน่วย R* ไม่เกิน 0.171 จะให้ผลการจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 26% ดังนั้นงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ขนาดของกริดในเทอมตัวแปรไร้หน่วย R* เท่ากับ 0.171 ซึ่งจะสามารถคำนวณขนาดกริดในแนวแกน x, y และ z ตาม Equation 1 และ 2 ได้เท่ากับ 0.3 m

$$R^* = \frac{\Delta z}{\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_P T_\infty \sqrt{g}}\right)^{2/5}} \qquad (1)$$

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z \qquad (2)$$

เมื่อ R^* คือ ขนาดของกริดในเทอมตัวแปรไร้หน่วย 0.171

$\dot{Q}$ คือ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง

ρ_∞ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้อง 1.225 kg/m^3

T_∞ คือ อุณหภูมิของอากาศที่อุณหภูมิห้อง 40 °C

c_P คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่อุณหภูมิห้อง เท่ากับ 1 kJ/kg.K

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s^2

Δx คือ ขนาดของกริดในแกน x

Δy คือ ขนาดของกริดในแกน y

Δz คือ ขนาดของกริดในแกน z

กำหนดขนาดแบบจำลอง

1. เนื่องด้วยโปรแกรม PyroSim มีข้อจำกัดในเรื่องของการสร้างและวิเคราะห์รูปแบบอุโมงค์ที่ซับซ้อน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงปรับรูปแบบของหน้าตัดอุโมงค์จากหน้าตัดโค้ง แสดง Fig. 1 (การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.) เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา โดยที่ยังคงให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่าเดิม 23.38 m^2 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่าเดิม 1.16:1 ดังนั้นจะได้หน้าตัดอุโมงค์สี่เหลี่ยมที่มีขนาด 5.21×4.49 m^2 เพื่อใช้สำหรับการจำลอง แสดง Fig. 2

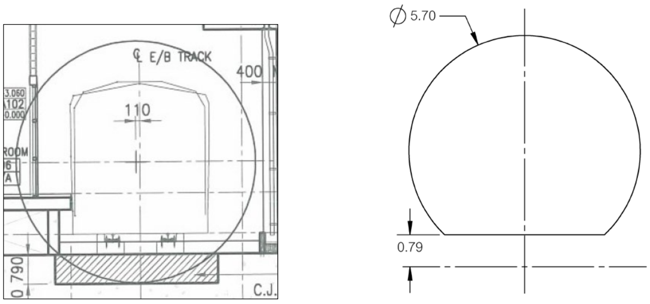


Fig. 1 Metro tunnel cross section (MRT Blue Line) (unit: m)

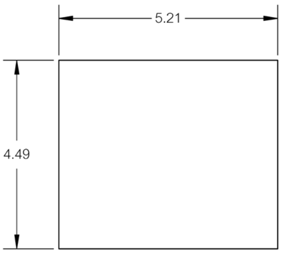


Fig. 2 Tunnel cross-section used for simulation (unit: m)

2. พัดลมระบายอากาศภายในอุโมงค์ (Tunnel Ventilation Fan, TVF)) มีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 (TVF No.1) และ ตำแหน่งที่ 3 (TVF No.3) มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 3.4×6.5 m^2 อยู่ใกล้กับสถานีสนามไชย และสถานีอิสรภาพ ตามลำดับ TVF No.1 และ TVF No.3 อยู่ห่างกันประมาณ 1,254 m และตำแหน่งที่ 2 (TVF No.2) มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 3.4×5.4 m^2 อยู่กลางอุโมงค์ห่างจาก TVF No.1 ประมาณ 950 m แสดง Fig. 3A โดยพัดลมระบายอากาศทุกตัวมีอัตราการไหลสูงสุด 70 m^3/s (การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.)

3. ขบวนรถไฟ มีขนาด 3.12×3.86×65.1 m^3 (การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.) โดยกำหนดให้ขบวนรถไฟจอดติดค้างอยู่กึ่งกลางอุโมงค์ แสดง Fig. 3B

กำหนดตำแหน่งสำหรับวัดค่าทัศนวิสัย ความเร็วของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศ ทั้งหมด 12 จุด ที่ตำแหน่งตาม ความสูงของอุโมงค์ 2.245 m และตามความยาวของอุโมงค์ 30 m, 130 m, 230 m, 330 m, 430 m, 530 m, 700 m, 800 m, 900 m, 1000 m, 1100 m และ 1200 m (เว้นช่วงขบวนรถไฟ) แสดง Fig. 3C

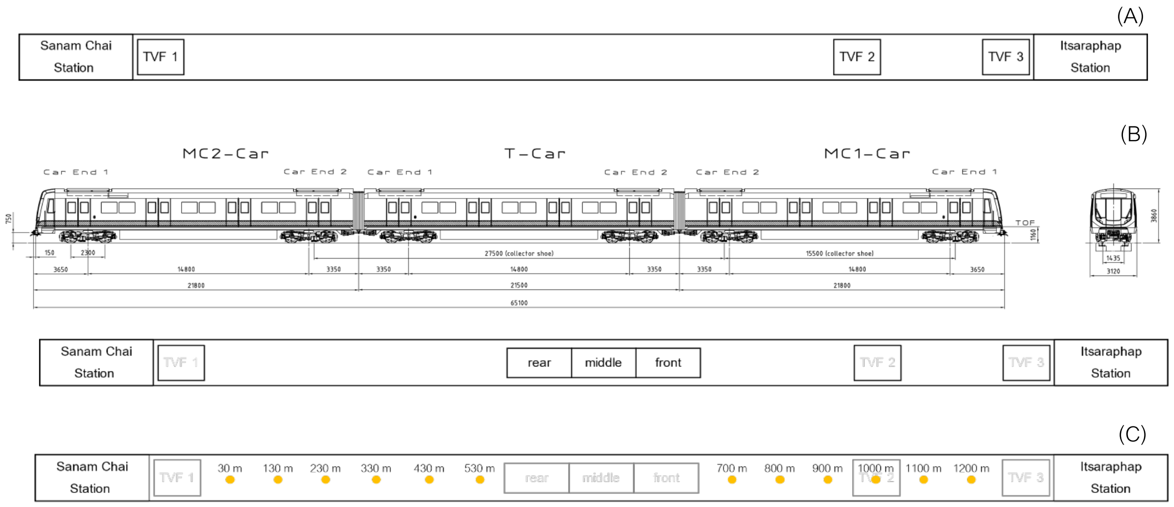


Fig. 3 Model for simulation (not to scale): (A) Position of TVF; (B) Dimension and position of train; (C) Position for measuring point

ออกแบบการทดลองโดยแบ่งเป็นกรณีศึกษา ตาม Table 1

Table 1 Case of study

Case Study Number	Fire Location	Ventilation System	Number of Ventilation Fan
1	Front of Train		
2	Middle of Train	Natural Ventilation	-
3	Rear of Train		
4	Front of Train		
5	Middle of Train	Force Ventilation	3
6	Rear of Train		

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จำลองการเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อศึกษาทัศนวิสัย ความเร็วของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศขณะเกิดเพลิงไหม้ โดยพิจารณาตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้บริเวณต่าง ๆ ของขบวนรถไฟ ได้แก่ หัวขบวน กลางขบวน และท้ายขบวน และรูปแบบระบบระบายอากาศ ได้แก่ระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ และระบบระบายอากาศแบบบังคับ ที่เวลา 360 วินาที หลังจากเริ่มเกิดเพลิงไหม้

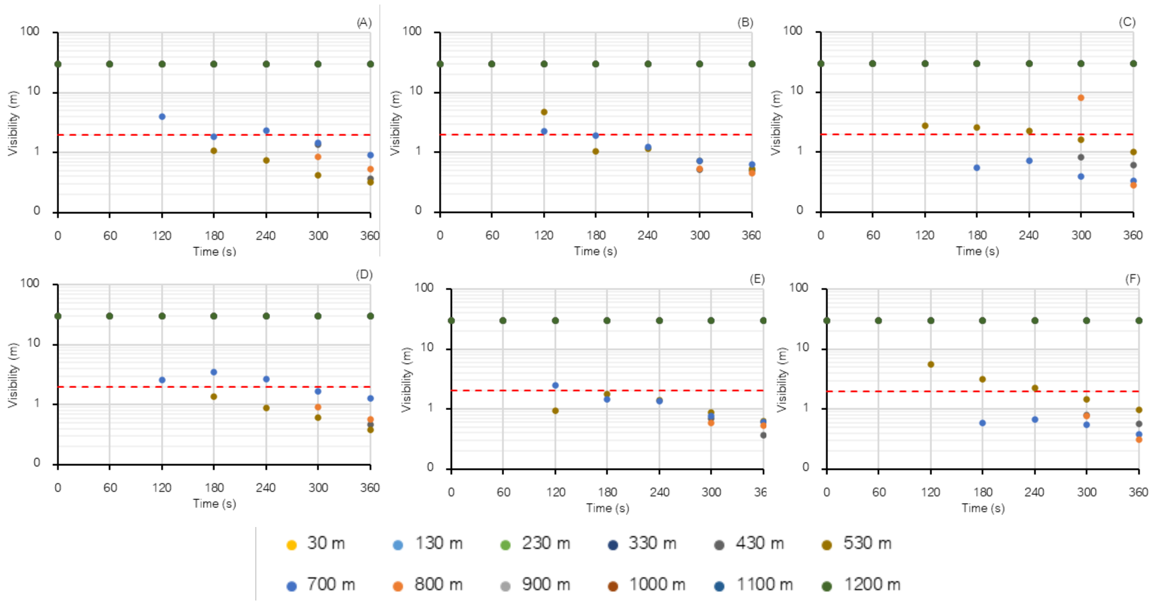


Fig. 4 Visibility from 0 to 360 s Natural ventilation: (A) Case 1; (B) Case 2; (C) Case 3 Force ventilation; (D) Case 4; (E) Case 5; (F) Case 6

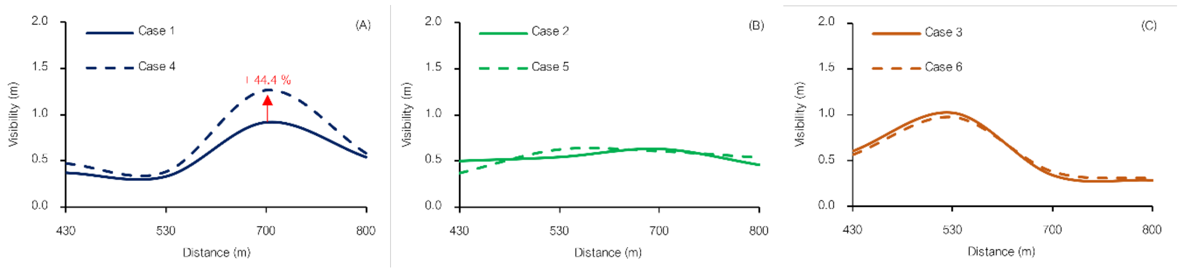


Fig. 5 Visibility at 360 s: (A) fire occurred at front; (B) fire occurred at middle; (C) fire occurred at rear

ทัศนวิสัยหลังจากเริ่มเกิดเพลิงไหม้จนถึงเวลา 360 วินาที แสดงดัง Fig. 4 เห็นได้ว่าทัศนวิสัยโดยรวมของระบบระบายอากาศแบบบังคับมีค่ามากกว่าทัศนวิสัยของระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ และจำนวนจุดที่ทัศนวิสัยมากกว่า 2 เมตร มีมากขึ้น หากพิจารณาทัศนวิสัยที่เวลา 360 วินาที แสดงดัง Fig. 5 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของทัศนวิสัยระหว่างระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ กับระบบระบายอากาศแบบบังคับพบว่า ทัศนวิสัยของระบบระบายอากาศแบบบังคับมีค่าสูงกว่าระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติในทุกกรณี ซึ่งกรณีการเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวน กรณีที่ 4 เพิ่มขึ้นจาก กรณีที่ 1 ถึง 44.4% (Fig. 5A) เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ และทัศนวิสัยสูงสุดของกรณีที่ 4 เท่ากับ 1.3 m (Fig. 5A) ซึ่งยังถือว่าต่ำกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

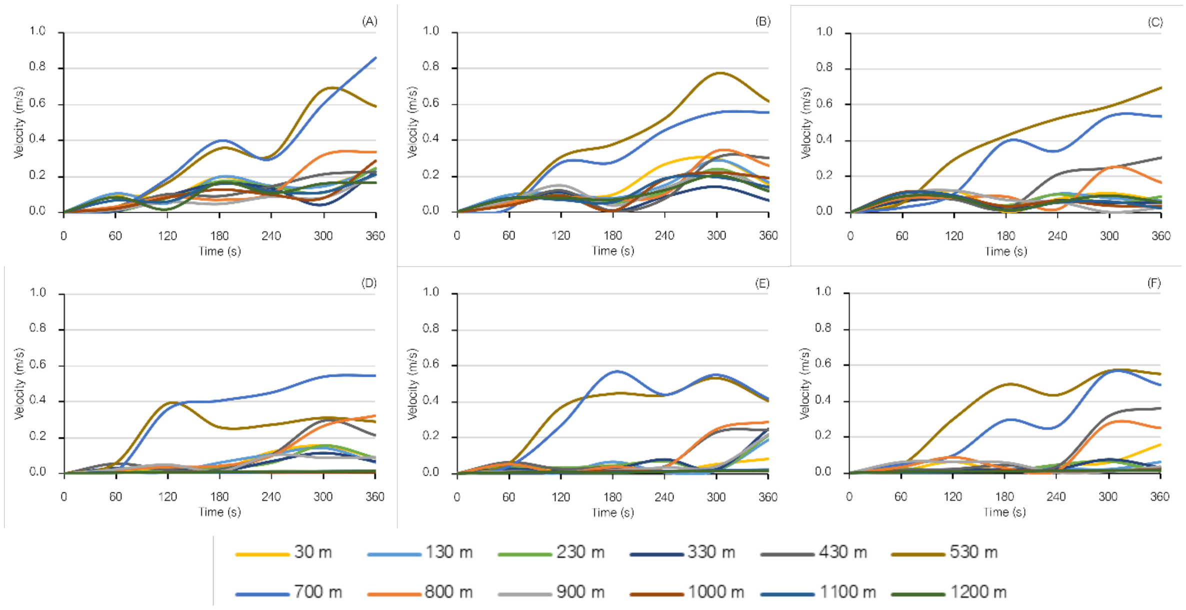


Fig. 6 Air velocity from 0 to 360 s Natural ventilation: (A) Case 1; (B) Case 2; (C) Case 3, Force ventilation; (D) Case 4; (E) Case 5; (F) Case 6

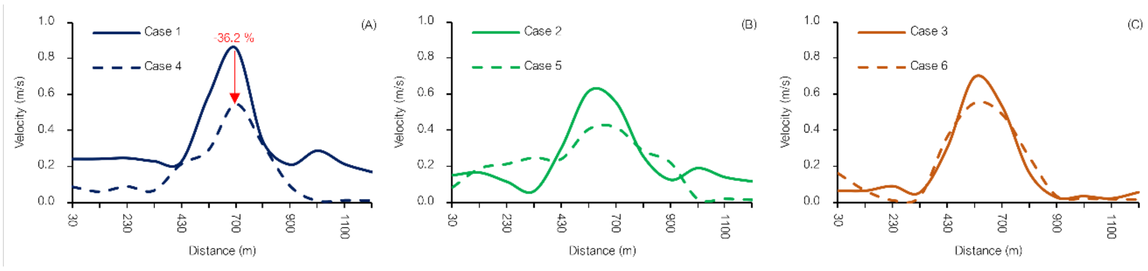


Fig. 7 Air velocity at 360 s: (A) fire occurred at front; (B) fire occurred at middle; (C) fire occurred at rear

ความเร็วของอากาศหลังจากเริ่มเกิดเพลิงไหม้จนถึงเวลา 360 วินาที แสดงดัง Fig. 6 เห็นได้ว่าความเร็วของอากาศโดยรวมของระบบระบายอากาศแบบบังคับมีค่าน้อยกว่าความเร็วของอากาศของระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ หากพิจารณาความเร็วของอากาศที่เวลา 360 วินาที แสดงดัง Fig. 7 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความเร็วของอากาศระหว่างระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติและระบบระบายอากาศแบบบังคับพบว่า ความเร็วของอากาศของระบบระบายอากาศแบบบังคับมีค่าน้อยกว่าระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติในทุกกรณี ซึ่งกรณีการเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวน กรณีที่ 4 ลดลงจาก กรณีที่ 1 ถึง 36.2% (Fig. 7A) ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ

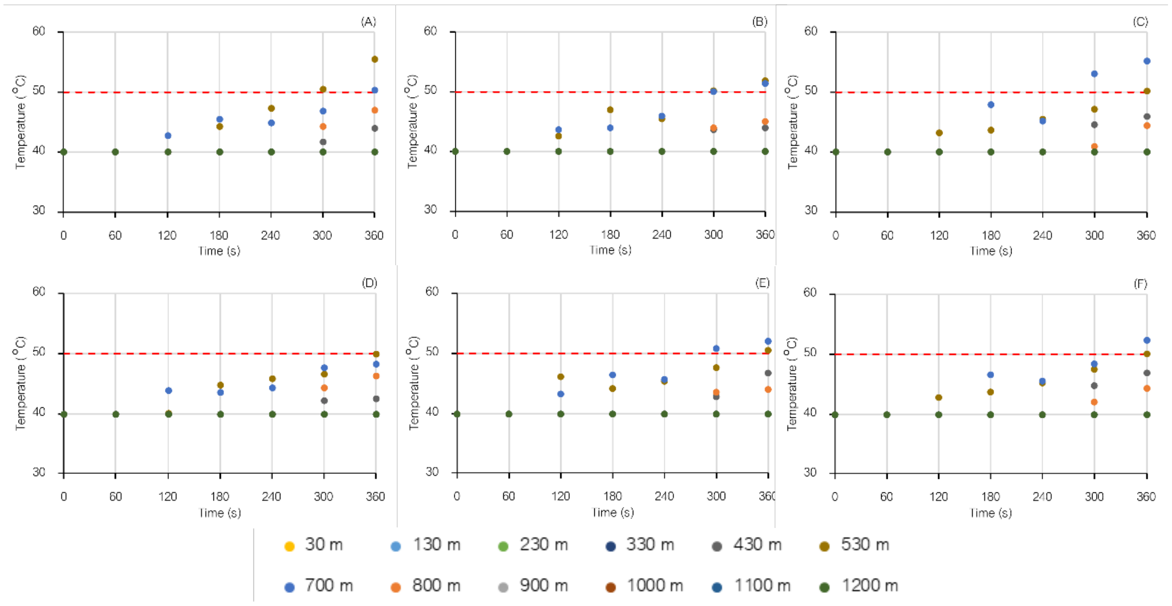


Fig. 8 Air temperature from 0 to 360 s Natural ventilation: (A) Case 1; (B) Case 2; (C) Case 3, Force ventilation; (D) Case 4; (E) Case 5; (F) Case 6

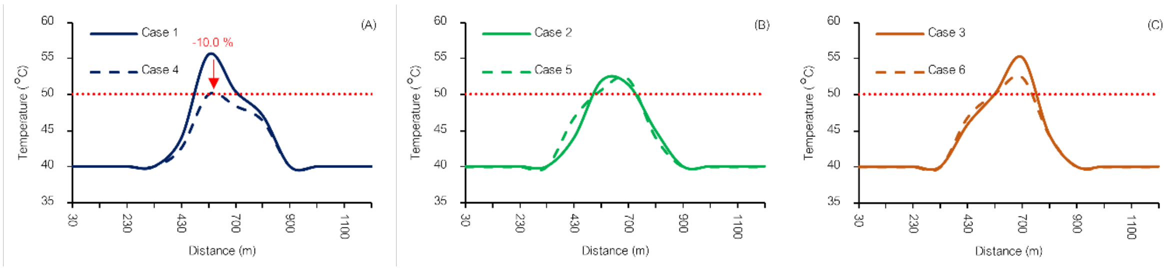


Fig. 9 Air temperature at 360 s: (A) fire occurred at front; (B) fire occurred at middle; (C) fire occurred at rear

อุณภูมิของอากาศหลังจากเริ่มเกิดเพลิงไหม้จนถึงเวลา 360 วินาที แสดงดัง Fig. 8 เห็นได้ว่าอุณภูมิของอากาศโดยรวมของระบบระบายอากาศแบบบังคับมีค่าน้อยกว่าอุณภูมิของอากาศของระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ และจำนวนจุดที่อุณภูมิของอากาศมากกว่า 50 °C มีน้อยลง หากพิจารณาอุณภูมิของอากาศที่เวลา 360 วินาที แสดงดัง Fig. 6 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณภูมิของอากาศระหว่างระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติและระบบระบายอากาศแบบบังคับพบว่า อุณภูมิของอากาศของระบบระบายอากาศแบบบังคับมีค่าน้อยกว่าระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติในทุกกรณี เนื่องจากอากาศบางส่วนที่ถูกระบายออกได้พาความร้อนออกไปด้วย ซึ่งกรณีการเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวน กรณีที่ 4 ลดลงจาก กรณีที่ 1 ถึง 10.0% ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ และอุณหภูมิของอากาศสูงสุดของกรณีที่ 4 เท่ากับ 49.92 °C (Fig. 9A) ซึ่งยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์อุณหภูมิที่ต้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยในการอพยพ

สรุป

จากการศึกษาจำลองการเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินของระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติและระบบระบายอากาศแบบบังคับ ที่เวลา 360 วินาทีหลังจากเริ่มเกิดเพลิงไหม้ พบว่า ค่าของทัศนวิสัย ความเร็วของอากาศและอุณหภูมิของอากาศระบบระบายอากาศแบบบังคับดีกว่าระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติทุกกรณี และการเกิดเพลิง

ไหม้หัวขบวนของระบบระบายอากาศแบบบังคับ (กรณีที่ 4) ให้ค่าทัศนวิสัยเพิ่มขึ้นมากที่สุด 44.4% โดยทัศนวิสัยสูงสุดเท่ากับ1.3 m ซึ่งยังถือว่าต่ำกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ความเร็วของอากาศลดลงมากที่สุด 36.2% อุณหภูมิของอากาศลดลงมากที่สุด 10.0% โดยอุณหภูมิของอากาศสูงสุดเท่ากับ 49.92 °C ซึ่งยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์อุณหภูมิที่ต้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยในการอพยพ จากผลการทดลองจะเห็นว่าตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้ส่งผลต่อค่าของทัศนวิสัย ความเร็วของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศ ขณะเกิดเพลิงไหม้ เนื่องจากการเกิดเพลิงไหม้ในตำแหน่งที่ใกล้กับพัดลมระบายอากาศภายในอุโมงค์ จะสามารถระบายควัน อากาศ และความร้อน ได้ดีกว่า

เอกสารอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. ม.ป.ป. รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล (สายสีน้ำเงิน). https://www.mrta.co.th/th/projectelectrictrain/bangkok-and-vicinities/blueline/#:~:text=เป็นอุโมงค์คู่รางเดี่ยว%20คือ%20เดินรถอุโมงค์ละหนึ่ง,เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก%206.3%20เมตร

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2550. การศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นพดล กรประเสริฐ. 2561. โครงการสร้างแบบจำลองเพื่อวางแผนการอพยพในกรณีเกิดอัคคีภัย ในกรณีเกิดอัคคีภัยภายในสถานี โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.

วิชัย ลักษณาการ. 2544. การระบายอากาศ สำหรับอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน. สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศฯ บทความวิชาการ 6: 189–194.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. 2565. ปริมาณการขนส่งผู้โดยสารทางรางในประเทศ. https://datagov.mot.go.th/dataset/domestic-passenger-transport/resource/90f5696c-cf97-48a8-9f65-500b2b462752

Abadgostar Tasisat Iraninan. 2007. NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems.

Ananda Development. ม.ป.ป. คลายข้อสงสัย! อุโมงค์รถไฟฟ้าลอดใต้แม่น้ำเจ้าพระยาแห่งแรกของไทย. https://www.ananda.co.th/blog/thegenc/คลายข้อสงสัย-อุโมงค์รถไ/

Hadjisophocleous. n.d. Fire Safety Design Guidelines for Federal Buildings.

RailSystem. n.d. Baku Metro Fire (1995). http://railsystem.net/baku-metro-fire-1995/

การศึกษาแบบจำลองการเกิดเพลิงไหม้ และการอพยพของสถานีรถไฟสายสีส้ม

Fire simulation and evacuation of the Orange Line train station

<u>ชนะภัทร ชูจันทร์</u>*, วิชัย ศิวะโกศิษฐ

<u>Chanapat Choojan</u>*, Wichai Siwakosit

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Chanapat.choo@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการอพยพสำหรับการเกิดเพลิงไหม้ในสถานีรถไฟฟ้าสายสีส้ม โดยวิเคราะห์จากระบบป้องกันอัคคีภัย ระบบดับเพลิง ระบบปรับอากาศ ระบบตรวจจับเพลิงไหม้ รวมไปถึงการออกแบบอาคารและเส้นทางหนีไฟ โดยมีมาตรฐาน NFPA 130 (Standard For Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems) เป็นมาตรฐานหลักที่ใช้ในการออกแบบสถานี โดยตามมาตรฐานของ NFPA 130 กำหนดให้ระยะเวลาในการอพยพไม่เกิน 6 นาที จากชานชลาไปยังจุดปลอดภัย โดยวิเคราะห์สถานการณ์เพลิงไหม้ในช่วงเวลาเร่งด่วนเพื่อวิเคราะห์หาเวลาที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ในการอพยพ และความอันตรายจากควันที่ส่งผลอันตรายและทัศนวิสัยในการอพยพ โดยใช้โปรแกรม Pyro-Sim และ Pathfinder ในการจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ เหตุการณ์ในการอพยพ และหาเวลาที่ใช้ในการอพยพ ค่าความหนาแน่นของควันในการอพยพ

คำสำคัญ: การอพยพ,จำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้

Abstract

This research studies evacuation for fires in the Orange Line MRT station. By analyzing the fire protection system, fire extinguishing system, air conditioning system fire detection system. Including the design of buildings and fire escape routes. The standard NFPA 130 (Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems) is the main standard used in station design. According to the NFPA 130 standard, the evacuation time is no more than 6 minutes from the platform to the safety point. By analyzing the fire situation during the rush hour to analyze the greatest possible time to evacuate, and the hazards of hazardous smoke and visibility for evacuations. Pyro-Sim and Pathfinder were used to simulate fire events. Events in evacuation and find out the time it takes to evacuate Evacuation smoke density.

Keywords: Evacuation, Fire simulation

คำนำ

ในปัจจุบันระบบขนส่งสาธารณะในปัจจุบันมีความสำคัญในการเดินทางให้กับประชาชนในเมือง โดยช่วยลดปัญหาการจารจร โดยสายสีส้มมีความสำคัญในการคมนาคมซึ่งมีผู้ใช้บริการจำนวนมาก ซึ่งเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินเช่นอัคคีภัยอาจมีการสูญเสียทางชีวิตและทรัพย์สิน เพราะฉะนั้นการวางระบบป้องกันอัคคีภัยและการออกแบบสถานีให้มีทางหนีไฟที่รองรับผู้ใช้บริการที่เพียงพอ โดยมีมาตรฐาน NFPA 130 (นพดล, 2561) เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบอาคารก่อสร้างและพฤติกรรมของผู้อพยพในสถานการณ์เพลิงไหม้ (Heskestad, 1995) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะจำลองการเกิดเพลิงไหม้ในห้องเครื่องภายในสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน และจำลองการเหตุการณ์อพยพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Pyro-Sim และ Pathfinder เพื่อศึกษาหาเวลาในการอพยพและเวลาในการป้องกันเหตุเพลิงไหม้ของระบบป้องกันอัคคีภัยของสถานีรถไฟมาตรฐาน NFPA 130 คือมาตรฐานสำหรับระบบการขนส่งทางไกลแบบถาวรและระบบรถไฟโดยสาร โดยเป็นมาตรการที่เข้มงวดมากในการบังคับใช้ในโรงสร้างอุโมงค์และสถานีที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ จากการวิเคราะห์แบบอาคาร สามารถจำลองเหตุการณ์ได้ 4 สถานการณ์ โดยมีเกณฑ์สมรรถนะ (Performance criteria) ความปลอดภัยที่ทำให้ไม่มีผู้เสียชีวิต คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีค่าไม่สูงกว่า 14,000 ppm ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีระดับค่าไม่สูงกว่า 5.0% โดยปริมาตรในห้อง หรือรวมไปถึงค่าความร้อนต่อพื้นที่ ที่ต้องไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส และทัศนวิสัยในการมองเห็นเมื่อเกิดควันไฟอยู่ที่ 3 ถึง 5 เมตร (Buchanan, 1994)

ระยะเวลาในการอพยพ

ความปลอดภัยของผู้โดยสาร โดยใช้มาตรฐาน NFPA 130 กำหนดไว้ดังนี้

-ระยะเวลาการอพยพไปจุดปลอดภัย ไม่ควรใช้เวลาในการอพยพเกิน 6 นาที

-ระยะเวลาที่ใช้อพยพออกจากชานชาลา โดยใช้เวลาไม่เกิน 4 นาที และควรมีทางออกที่เพียงพอต่อจำนวนคน โดยการคำนวณค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเพลิง รูปทรงของสถานี และการติดตั้งระบบระบายควัน

โดยเวลาในการอพยพขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการเกิดอัคคีภัย ซึ่งอ้างอิงจากอัตราการปลดปล่อยและพื้นที่ของความร้อนที่จะส่งผลถึงปริมาณของควันและการมองเห็นของผู้อพยพและจำนวนคนที่อยู่ในสถาณี ณ ขณะนั้น รวมถึงจุดปลอดภัยและความกว้างของทางเดินหรือบันไดหนีไฟและความสูงของเพดาน และต้องคำนึงถึงระบบระบายควัน ระบบดับเพลิง ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการกระจายควันซึ่งเป็นอัตรายต่อผู้อพยพ ในการจำลองการอพยพหนีไฟนั้นจะต้องมีเวลาในการอพยพผู้ใช้อาคารไม่มากกว่าเวลากปลอดภัยตามหลักเกณฑ์ NFPA 130 ที่ทำให้มีผู้เสียชีวิต

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1.โปรแกรม Pyro-Sim

2.โปรแกรม Pathfinder

3.แบบแปลนสถานีรถไฟฟ้าสายสีส้มสถานีรามคำแหง

4.แบบแปลนระบบป้องกันอัคคีภัย และระบบปรับอากาศ

วิธีการ

1. โปรแกรม Pyro-sim เป็นโปรแกรมจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ ซึ่งทำนายลักษณะควันไฟ ทัศนวิสัย อุณหภูมิและสารพิษต่าง ๆ ขณะเกิดเพลิงไหม้ โดยถูกพัฒนามาจากโปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS) โดยความละเอียดในการจำลองโปรแกรมขึ้นกับขนาดกริดโดยจำลองแบ่งกริดเซลล์ (Grid Cells) เป็นส่วนเล็ก ๆ เพื่อใช้คำนวณอัตราความร้อน ความเข้มข้นของเขม่าควันไฟ จากการศึกษาขนาดของกริด ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ตาม Equation 1 (วิวรรณ, 2552) โดยผู้วิจัยเลือกใช้ขนาดกริด Moderate เพื่อง่ายต่อการศึกษา โดยขนาดของ Mesh size หรือ grid size (dx) จะอ้างอิงตามค่า D* คือ characteristic fire diameter ซึ่งได้จากสมการ ซึ่งขนาด Mesh ที่เหมาะสมกำหนดให้ $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ = 0.2 m×0.2 m×0.2 m จำนวนปริมาตรจำกัดรวม 43,470 ปริมาตร โดยคำนึงถึงสมรรถคอมพิวเตอร์ เวลา กรณีศึกษา

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho C_p T_0 \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

When $\dot{Q}$ rate of heat release

ρ air density at room temperature is 1.225 kg/m^3

T_0 air temperature at room temperature

C_p specific heat capacity of air at room temperature is 1 kJ/kg.K

g acceleration of gravity is 9.81 m/ s^2

2. โปรแกรม Pathfinder เป็นโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของมนุษย์ โดยสร้างจากการสร้างพื้นที่ทางเดินเป็นรูปเรขาคณิต โดยรูปทรงเรขาคณิตเป็นแบบจำลองที่เกิดจากการสร้างกริดรูปสามเหลี่ยมติดกัน เรียกว่า navigation mesh สามารถจำแนกการเคลื่อนที่ได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.1 The Society of Fire Protection Engineering (SFPE) คือ การเคลื่อนที่แบบเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นไปยังทางออก และความเร็วพิจารณาจากความหนาแน่นของผู้อพยพ และความกว้างของทางเดินหรือประตูหนีไฟ

2.2 Steering คือ การเคลื่อนที่มีการเลี้ยวในแนวโค้งเพื่อหลบหลีกแกนบังคับ มีการเว้นระยะระหว่างคนกับสิ่งกีดขวางและคนกับคน

Priority level เป็นค่าลำดับความสำคัญซึ่งกำหนดถึงค่าความสามารถในการอพยพหนีไฟ การที่ผู้อพยพมีค่า Priority level มากจะมีค่าความสามารถในการหนีไฟมากกว่าลำดับ Priority level ที่น้อยกว่า เช่น เจ้าหน้าที่สถานีรถไฟซึ่งมีการซ้อมการอพยพการหนีไฟในสถานีทำให้มีประสบการณ์และรู้ทางออกจากตัวสถานีมากกว่าผู้โดยสารที่ใช้บริการในสถานี (THUNDERHEADENG ENGINEERING, 2018)

ค่าหน่วงเวลาเริ่มต้น (Initial Delay) คือ การหน่วงเวลาก่อนเริ่มมีการอพยพหนีไฟ โดยค่าหน่วงเวลาสำหรับเตรียมการเคลื่อนย้ายโดยมีช่วงเวลาดังนี้

1.เวลาที่ใช้ในการรับรู้เหตุเพลิงไหม้

2.เวลาที่ใช้แสดงปฏิกิริยาเมื่อเกิดเพลิงไหม้

3.เวลาที่ใช้เตรียมอพยพหนีไฟ

อาคารที่มีระบบสัญญาณเตือนที่ดี จะมีช่วงหน่วงเวลาเท่ากับ 2.5 วินาที จากนั้นจึงเริ่มทำการอพยพไปยังจุดปลอดภัยและรวมระยะเวลาที่ผู้อพยพต้องการสำหรับใช้เคลื่อนที่ไปสู่ภายนอกอาคนารได้อย่างปลอดภัย (Required Safe Egress time, RSET) ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาที่มีอยู่สำหรับการเคลื่อนที่ออกไปสู่ภายนอกได้อย่างปลอดภัยในที่นี้คือ 6 นาที ตามมาตรฐาน NFPA 130 (Available Safe Egress time , ASET) ในกรณีที่ RSET มากกว่า ASET ผู้อพยพอยู่ในช่วงระยะเวลาที่เสี่ยงภัย

3.กำหนดเงื่อนไขของปัญหา

1.1 อัตราการปล่อยพลังงานของความร้อนของกองเพลิง เท่ากับ 10 MW/m^2 และมีพื้นที่ของขนาดกองเพลิงเท่ากับ 1 และ 2 ตารางเมตรตามลำดับ (Kim, 2002) เพลิงไหม้เกิดขึ้นในห้อง UPS Room และห้อง Battery Room ในชั้น Concourse บริเวณตำแหน่งห้องเครื่อง โดยมีอัตราการลุกไหม้ตาม ตาม Equation 2 (ปัญญ์วัฒน์, 2562)

$$\dot{Q} = m_F'' A \chi \Delta h_c \tag{2}$$

โดย $\dot{Q}$ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนกองเพลิง, kW

m_F'' ฟลักซ์การเผาไหม้, g/ m^2.s

A พื้นที่การเผาไหม้, m^2.

χ สัมประสิทธิ์ของการเผาไหม้ (combustion efficiency)

Δh_c ค่าความร้อนของการเผาไหม้,kJ/g

3.2 อุณหภูมิของอากาศภายในสถานีเฉลี่ย (ก่อนเกิดเพลิงไหม้) เท่ากับ 20 °C

3.3 เวลาที่ใช้ในการแสดงผลและคำนวณเท่ากับ 90 วินาที เท่ากับระยะเวลาที่ระบบป้องกันอัคคีภัยจะแจ้งเตือนให้เกิดการอพยพ และสามารถดับเพลิงไหม้ได้ก่อนเพลิงไหม้จะลุกลาม (Hadjisophocleous 1997)

1.4 สร้างระบบป้องกันอัคคีภัยรวมถึงระบบปรับอากาศและอัตราการระบายควันของ FCU ระบบเติมอากาศ มี Volume Flow Rate 1.41 m^3/s และ VEU Volume Flow Rate 0.7 m^3/s มี Sprinkler ชนิด Generic Industrial Spray จำนวน 2 หัว และ มี Smoke Detector ประเภท Cleary Photoelectric P1 จำนวน 1 เครื่อง ในห้อง UPS Room และห้อง Battery Room ตามลำดับ ซึ่งในห้องไฟฟ้าทั้งสองนี้มีลักษณะเป็น High Hazard Contents คือเป็นพื้นที่เสี่ยงที่เมื่อติดไฟแล้วจะเกิดการเผาไหม้รุนแรงอย่างรวดเร็ว (จีราภรณ์, 2562) และโครงสร้าง, เส้นทางการอพยพ ซึ่งได้มาจากแบบแปลนของสถานีรถไฟ

1.5 กำหนดจำนวนคนในสถานีในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยอ้างอิงจากจำนวนผู้โดยสารเพื่อเปลี่ยนสายในช่วงชั่วโมงเร่งด้วน ณ สถานีเตาปูน (สุพล, 2562)

3. นำข้อมูลจากข้อ 1 ถึง 2 สร้างแบบจำลองในรูปแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Pyro-Sim และ Pathfinder ตาม Fig. 1

4. เมื่อได้เวลาในการแจ้งเตือนเมื่อเกิดสัญญาณไฟจากการจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ด้วยโปรแกรม Pyro-Sim ทำให้สามารถหาเวลา response และเวลาในการอพยพ Equation 3 การจำลองเหตุการณ์และใช้ข้อมูล จำนวนบริการผู้ใช้บริการเวลาเร่งด่วน ที่เวลา 7.30–8.30 เนื่องจากสถานียังไม่เปิดใช้บริการ จึงจะนำข้อมูลของงานวิจัย โครงสร้างแบบจำลองเพื่อวางแผนการอพยพในกรณีเกิดอัคคีภัยภายในสถานีโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (นพดล, 2561) มาเป็น

ข้อมูลอ้างอิง โดยปริมาณผู้โดยสารเต็มชานชาลและพื้นท่าสัญจรไม่เกิน 2/5 ส่วน มีผู้คนเต็มสถานีอยู่ที่ประมาณ 650 คน โดยต้องคำนึงถึงจำนวนคนในสถานี อายุ เพศ บุคลิก ความเร็วและสถานที่ที่ผู้อพยพอยู่ในสถานที่ในขณะนั้น

$$t_{tot}=t_{fd}+t_{res}+t_{eva} \qquad (3)$$

When t_{tot} = total required time (s)

t_{fd} = time the fire was discovered (s)

t_{res} = response time (s)

t_{fd} = evacuation time (s)

5. วิเคราะห์การเกิด ความหนาแน่นของควันและความสูงของชั้นควัน ซึ่งมีผลกระทบในการอพยพและความอันตรายต่อผู้อพยพ

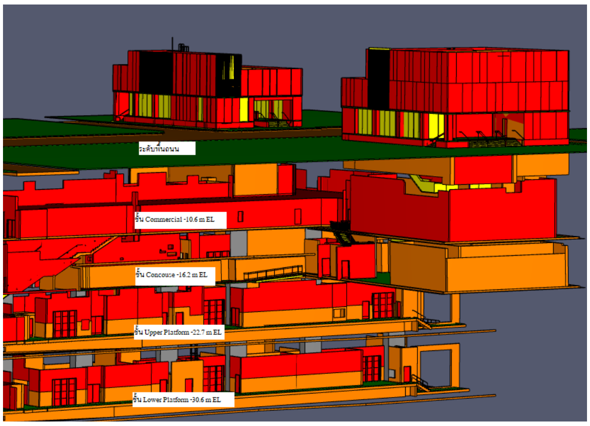


Fig. 1 Train station 3d model

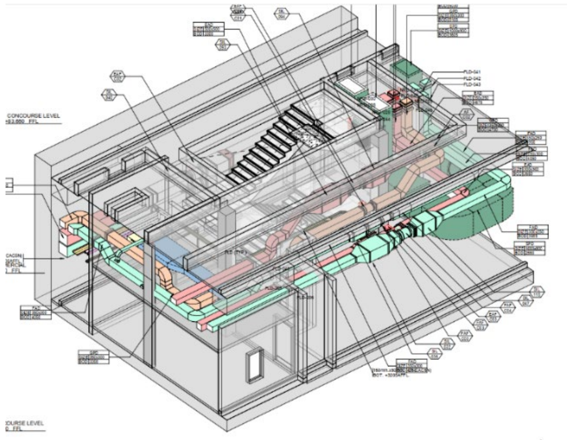


Fig. 2 Battery room air condition system

5. ออกแบบการทดลองโดยแบ่งเป็นกรณีศึกษาและกำหนดขนาดของการลุกไหม้ ในห้อง UPS Room และ Battery Room ซึ่งเป็นห้องไฟฟ้าแรงสูงซึ่งไม่มีพนักงานปฏิบัติงานในห้อง และเป็นห้องที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์จัดเป็นเชื้อเพลิงประเภท C ซึ่งเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นจะมีกระแสไฟฟ้ารวมอยู่ด้วยเนื่องจากเชื้อเพลิงหรือตู้รรบบไฟฟ้าในห้องไฟฟ้าหลัก ซึ่งห้องไฟฟ้าภายในอาคาร ถือว่าเป็นห้องที่มีแหล่งข้อมูลข่าวสารในการเกิดเหตุเพลิงไหม้มากที่สุด โดยทางผู้วิจัยได้นำเสนอข้อมูลเหล่านี้ เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนในการเกิดเหตุเหลิงไหม้มากที่สุด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการคำนวณหาเวลาที่มากที่สุดที่ผู้อพยพในสถานีรถไฟสายสีส้ม สถานีรามคำแหง จะอพยพเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้ใน ห้อง Battery Room และห้อง UPS Room โดยขนาดไฟมีอัตราการปล่อยปลดความร้อน 1,000 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ขนาดพื้นที่ 1 และ 2 ตารางเมตร ตามลำดับ โดยออกแบบเหตุจำลองเพลิงไหม้ด้วยโปรแกรม Pyro-Sim ซึ่งมีองค์ประกอบคือตำแหน่งของหัวสปริงเกอร์ ซึ่งมีผลในการควบคุมไฟในเบื้องต้น ตำแหน่ง Smoke Detector ซึ่งมีผลในการตรวจจับการเกิดเพลิงไหม้และแจ้งเตือนการอพยพ และตำแหน่งพัดลมซึ่งมีผลในการดูดควัน ส่วนในการจำลองการอพยพจะใช้โปรแกรม Pathfinder เพื่อจำลองการอพยพ จากการทดลอง Fig. 3 แสดงถึง Heat Release Rate ของกองไฟที่ใช้ในการจำลองแบบตามเวลาที่กำหนด ซึ่งค่า HRR ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1,000 kW ในกรณีที่กองไฟมีขนาด 1x1 เมตร ทำให้อุณหภูมิที่สปริงเกอร์เพิ่มขึ้นตาม Fig. 4 และส่งผลให้ Smoke Detector สามารถตรวจจับการเกิดเพลิงไหม้ได้ตามเวลาใน Fig. 5 เมื่อเปลี่ยนให้เกิดเพลิงไหม้มีขนาด 2×1 เมตร ส่งผลให้สปริงเกอร์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดทำงานตาม Fig. 8 และส่งผลให้ Smoke Detector สามารถตรวจจับการเกิดเพลิงไหม้ได้ตามเวลาใน Fig. 9 และสามารถควบคุมเพลิงไหม้ได้ส่งผลให้อุณหภูมของไฟลดลง ตาม Fig.10 เมื่อ Smoke Detector สามารถจับการเกิดเพลิงไหม้ได้ จะเริ่มการอพยพภายในสถานี ซึ่งมีจำนวนคนประมาณ 600–650 คนใช้เวลาทั้งสิ้น ประมาณ 5 นาทีครึ่ง ตาม Fig. 6 แสดงปริมาณคนที่อพยพออกจากสถานี

Table 1 Case studies determine the size of the fire

Case	Room	Size of fire (m^2)	Time at Smoke Detector start working (s)	Time at sprinkler start working (s)	Time to control fire (s)	Evacuation time (s)
1	Battery Room	1	5	103	150	350
2	Battery Room	2	5	40	50	340
3	UPS Room	1	10	115	170	362
4	UPS Room	2	10	45	60	352

1. การจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ในห้อง Battery Room ขนาดอัคคีภัย 1 ตารางเมตร

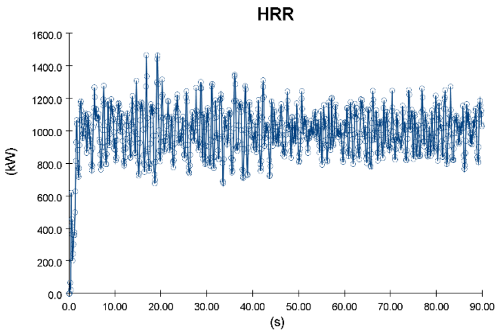


Fig. 3 Amount of heat released

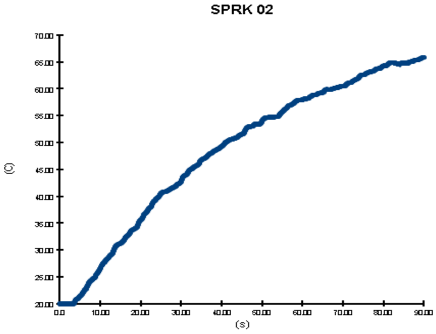


Fig. 4 Temperature at the sprinkler

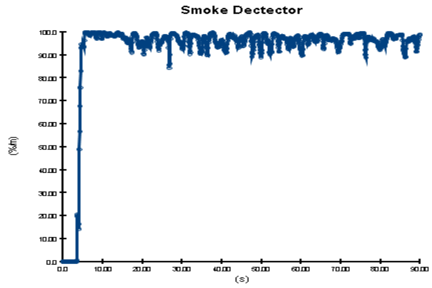


Fig. 5 Time when the smoke detector can detect smoke

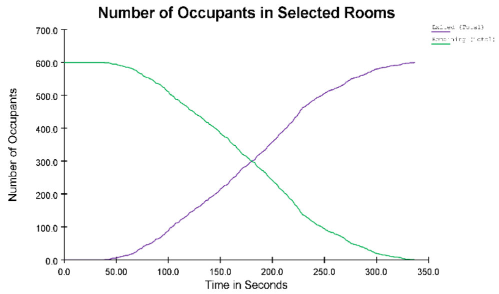


Fig. 6 Time when evacuees can evacuate from station

2. การจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ในห้อง Battery Room ขนาดอัคคีภัย 2 ตารางเมตร

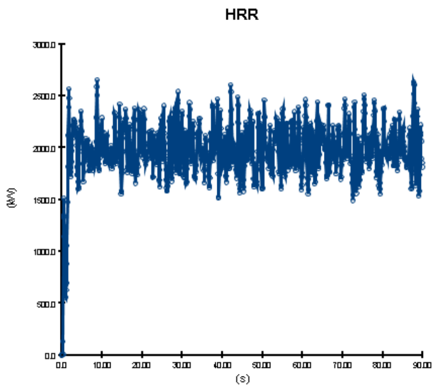


Fig. 7 Amount of heat released

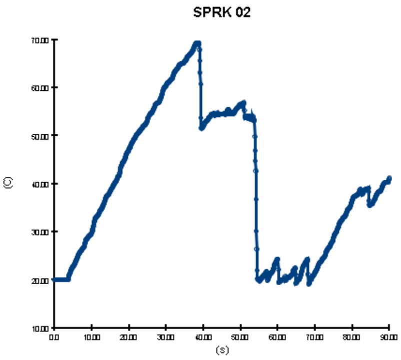


Fig. 8 Temperature at the sprinkler

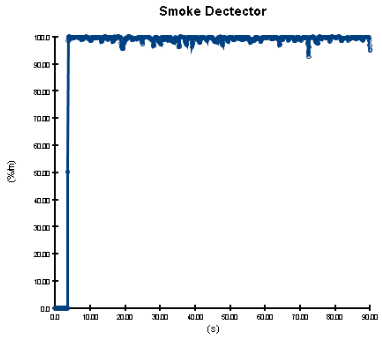


Fig. 9 Time when the smoke detector can detect smoke

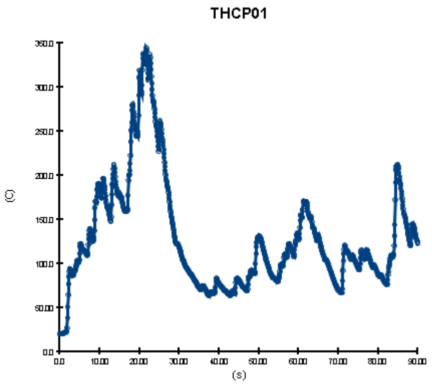


Fig. 10 Temperature at fire location

สรุป

จากการทดลองพบว่าเมื่อเกิดเพลิงไหม้ในห้อง Batter Room มีขนาดไฟที่ 1 ตารางเมตร เมื่อเวลาครบ 90 วินาที อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งหัวสปริงเกอร์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 65 องศา ตาม Fig. 4 ซึ่งยังไม่ถึงอุณหภูมิที่จะทำให้สปริงเกอร์ทำงานได้ ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่า 90 วินาทีซึ่งอาจทำให้ไฟลุกลามไปยังบริเวณอื่น แต่ระบบตรวจจับการเกิดเพลิงไหม้สามารถตรวจจับควันได้ที่เวลาประมาณ 5 วินาที ตาม Fig. 5 หลังจากเกิดเพลิงไหม้เป็นผลทำให้เริ่มเกิดการอพยพผู้โดยสารซึ่งจากการทดลอง ผู้โดยสารในสถานีในช่วงเวลาเร่งด่วนมีประมาณ 600 คน สามารถอพยพออกจากสถานีได้หมดภายในเวลาประมาณ 336 วินาที หรือประมาณ 5 นาทีครึ่ง ตาม Fig. 6 ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ NFPA 130 ที่กำหนดให้ผู้อพยพต้องอพยพออกให้หมดจากสถานีภายในเวลา 6 นาที เมื่อเพิ่มขนาดไฟให้เป็น 2 ตารางเมตร ทำให้เกิดปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยมากขึ้นตามไปด้วย ตาม Fig. 7 ปริมาณความร้อนนี้ส่งผลทำให้เกิดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งหัวสปริงเกอร์ทำงานที่เวลา 40 วินาที ตาม Fig. 8 หลังจากเกิดเพลิงไหม้ ซึ่งเมื่อสปริงเกอร์เกิดการปล่อยน้ำทำให้เกิดการป้องกันอัคคีภัยเบื้องต้นเป็นผลทำให้ไฟที่เกิดในห้องเริ่มลดระดับความรุนแรงลงที่เวลา 50 วินาที ตาม Fig. 10 แต่ไฟก็ยังไม่สามารถดับสนิทได้อาจต้องรอเจ้าหน้าที่ดับเพลิงเข้าไปในพื้นที่เพื่อควบคุมไฟ และระบบปรับอากาศที่ออกแบบมาให้เกิดการระบายควันทำให้ทัศนวิสัยของผู้อพยพสามารถอพยพได้สะดวกรวมถึง การแจ้งเตือนอัคคีภัยก็ยังทำงานอยู่ที่ 5 วินาทีหลังจากเกิดไฟ ตาม Fig. 9 การอพยพผู้โดยสารออกจากสถานีมีค่าใกล้เคียงกับกรณีแรกซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่เกิน 6 นาที เพราะฉะนั้นการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยรวมถึงทางหนีไฟ บันไดหนีไฟของสถานีรถไฟรามคำแหงสามารถป้องกันอัคคีภัยและเหตุฉุกเฉินได้ แม้จะมีผู้โดยสารจำนวนมากในช่วงเวลาเร่งด่วน

กิตติกรรมประกาศ

กิตติกรรมประกาศ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ดร.วิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ หลักที่ให้ความรู้คำปรึกษาและชี้แนะรูปแบบในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้เขียนทุกท่านที่ผู้วิจัยได้นำมาอ้างอิงถึงในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

เอกสารอ้างอิง

นพดล กรประเสริฐ. 2561. โครงการสร้างแบบจำลองเพื่อวางแผนการอพยพในกรณีเกิดอัคคีภัยภายในสถานี โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

จีราภรณ์ สุดเต้. 2562. การวิเคราะห์สมรรถนะเส้นทางหนีไฟของอาคารสูงและขนาดใหญ่พิเศษ ด้วยโปรแกรม Pyrosim และ Pathfinder กรณีศึกษา : พื้นที่ครอบครองประเภทที่อยู่อาศัย วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปัญญวัฒน์ แก้วกุดั่น. 2562. การศึกษาผลกระทบของขนาดกองเพลิงต่อระบบระบายควันไฟของอุโมงค์ทางลอดถนนด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุพล วิสุทธิสมบูรณ์. 2562. การศึกษาผู้โดยสารเพื่อเปลี่ยนสายในช่วงชั่วโมงเร่งด้วนเช้า ณ สถานีเตาปูน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิวรรณ อัศวสุขี. 2552. การศึกษาการอพยพหนีไฟในสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. วิศวกรรมสาร มก. 23: 34–47.

Buchanan, A.H. 1994, Fire Engineering Design Guide, Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, New Zealand.

Hadjisophocleous, G.V., Benichou, N. 1997. Fire Safety Design Guidelines for Federal Building. NRC Publication. Canada.

Heskestad, G. 1995. Fire plumes, flame height, and air entrainment. In: Hurley, M.J., Gottuk, D., Hall, J.R., et al. (Eds.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer. New York, NY, USA, 396–428.

Kim, H.-J., Lilley, D. 2002. Heat release rates of burning items in fires. Journal of Propulsion and Power 18: 886.

Philip, J., DiNenno, P.E. 1995. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.

Thunderheadeng Engineering. 2018b. Technical reference pathfinder 2018. https://www.thunderheadeng.com/2018/12/pathfinder-2018-4-1210/, 10 November 2019.

Rasbash, D., Ramachandran, G., Kandola, B., et al. 2004. Evaluation of Fire Safety. John Wiley & Sons,Ltd.

การจำลองการเกิดเพลิงไหม้และการอพยพหนีไฟภายในโรงแรมที่ดัดแปลงมาจากห้องแถว 4 ชั้น

A study of fire simulation and evacuation of a hotel modified from 4-storey shop house

อภิภพ สวนสอน[a], **ชวลิต กิตติชัยการ**[b,*]

Apipop Suansorn[a], Chawalit Kittichaikarn[b,*]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Fire Protection Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengclk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการเกิดเพลิงไหม้ การแพร่กระจายควันไฟ และพฤติกรรมการอพยพหนีไฟของผู้ใช้อาคารโรงแรมที่ดัดแปลงจากห้องแถว 4 ชั้น ในการศึกษาได้กำหนดเกณฑ์การชี้วัดความปลอดภัยที่ความสูงชั้นควันจากพื้นไม่ต่ำกว่า 2.5 เมตร และอุณหภูมิควันไม่เกิน 200 °C โดยจำลองการเกิดเพลิงไหม้ที่ห้องต้นเพลิงชั้น 2 ของอาคารโดยใช้โปรแกรม Pyrosim2019 จากผลการจำลองพบว่าระดับความสูงของชั้นควันจะต่ำกว่า 2.5 เมตร ที่เวลา 39 วินาที และอุณหภูมิควันเกิน 200 °C ที่เวลา 60 วินาที เมื่อจำลองการอพยพหนีไฟด้วยโปรแกรม Pathfinder2019 พบว่าต้องใช้เวลาในการอพยพออกจากชั้น 2 และออกจากอาคารทั้งหมด นานถึง 89 และ 129 วินาที ตามลำดับ ด้วยเวลาที่นานดังกล่าวทำให้อาคารนี้ไม่ผ่านเกณฑ์การชี้วัดความปลอดภัยเมื่อเกิดเพลิงไหม้ อย่างไรก็ตามเมื่อจำลองการติดตั้งพัดลมดูดควันขนาด 8,327 CFM จำนวน 2 ตัวเพิ่มในบริเวณที่เกิดเพลิงไหม้และปรับปรุงเส้นทางหนีไฟ พบว่าระยะเวลาการอพยพจากชั้น 2 และออกนอกอาคารลดเหลือ 52 และ 103 วินาที ตามลำดับ ผลการปรับปรุงทำให้อาคารนี้ผ่านเกณฑ์ชี้วัดความปลอดภัยเมื่อเกิดเพลิงไหม้

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์เพลิงไหม้, การแพร่กระจายของควันไฟ, การอพยพหนีไฟ

Abstract

This paper presents a study of fire simulation, smoke diffusion and user evacuation behavior from a hotel modified from 4-storey shop house. In this study, the safety performance is based on the smoke layer height must not be lower than 2.5 m from the floor ground and the smoke temperature does not exceed 200 °C. Simulation was performed on the 2nd floor of the building using Pyrosim2019 program. The results showed that the smoke layer height was lower than 2.5 meters at 39 s and the smoke temperature exceeded 200 °C at 60 s. However, the fire evacuation simulation using Pathfinder2019 program showed that the sample group could evacuate from the 2nd floor in 89 s and from the building in 129 s. With this too long evacuation time, the hotel building did not meet the safety performance indicators in the event of a fire. Therefore, additional two 8,327 CFM exhaust fans were installed at the fire area and the fire exit was improved. This results in the evacuation time from the second floor and the total building evacuation time were reduced to 52 s and 103 s respectively. With all these improvements, the hotel building could pass the safety performance indicators.

Keywords: Fire evacuation, Fire simulation, Smoke diffusion

คำนำ

ในปัจจุบันการปรับเปลี่ยนที่พักซึ่งเป็นตึกแถวขนาดเล็กให้เป็นโรงแรมขนาดเล็กกำลังเป็นที่นิยมเพื่อสร้างรายได้ให้กับครอบครัว อย่างไรก็ตามอาคารประเภทนี้ยังไม่มีกฎหมายบังคับเรื่องระบบป้องกันอัคคีภัยภายในอาคาร ดังนั้นการปรับเปลี่ยนมาเป็นโรงแรม และมีผู้เข้าพักอาศัยเป็นจำนวนมากเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้ จะทำให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน งานวิจัยนี้มีวัตุประสงค์ที่จะจำลองสถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์อัคคีภัย Pyrosim 2019 (Fire Dynamics Simulator) ในการศึกษาจะมีการจำลองการเกิดเพลิงไหม้ภายในโรงแรมขนาดเล็กสูง 4 ชั้นที่ปรับเปลี่ยนมาจากตึกแถว เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของควันในแต่ละสถานการณ์เพลิงไหม้รวมถึงใช้โปรแกรม Pathfinder 2019 (Evacuation Simulation) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอพยพของผู้ใช้อาคารทั้งหมด ผลการศึกษาจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงแบบก่อสร้างของตัวอาคารก่อนการดำเนินการปรับเปลี่ยนและก่อสร้างจริง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้ทำแผนฝึกอบรมการอพยพสำหรับพนักงานผู้เกี่ยวข้องในการใช้อาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้การอพยพเป็นไปตามกฎหมาย ข้อกำหนดและมาตราฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันอัคคีภัย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตามกฎกระทรวงได้กำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับการป้องกันและระงับอัคคีภัย พ.ศ. 2555 ได้กำหนดให้นายจ้างจัดให้มีเส้นทางหนีไฟทุกชั้นของอาคารอย่างน้อยชั้นละสองเส้นทางซึ่งสามารถอพยพลูกจ้างที่ทำงานในเวลาเดียวกันทั้งหมดสู่จุดที่ปลอดภัยได้โดยปลอดภัยภายในเวลาไม่เกิน 5 นาที ทั้งนี้หลักการในการอพยพหนีไฟตามมาตรฐาน NFPA 101, Life Safety Code 2021 ได้กำหนดระยะเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพอย่างปลอดภัย (Required Safe Egress Time, RSET) จะต้องน้อยกว่าระยะเวลาที่สามารถอพยพได้โดยปลอดภัย (Available Safe Egress Time, ASET) เสมอ ซึ่งการอพยพหนีไฟนี้จะสอดคล้องกับการเกิดเพลิงไหม้โดยสถานการณ์เพลิงไหม้ (Fire Scenarios) ตามมาตรฐาน NFPA 101, Life Safety Code 2021 จะมีการแบ่งการจำลองสถานการณ์เพลิงไหม้ ออกเป็น 8 สถานการณ์เพลิงไหม้ ดังนี้

สถานการณ์ที่ 1 คือ เกิดเพลิงไหม้เชื้อเพลิงหลักที่อยู่ในอาคาร ในสถานการณ์นี้กำหนดให้ประตูห้องต้นเพลิงเปิดค้างไว้

สถานการณ์ที่ 2 คือ เกิดเพลิงไหม้เชื้อเพลิงพัฒนาตัวได้อย่างรวดเร็ว แล้วไปปิดกั้นเส้นทางหลักของการอพยพหนีไฟจนใช้งานไม่ได้ ในสถานการณ์นี้กำหนดให้ประตูทุกห้องในอาคารถูกเปิดหมด

สถานการณ์ที่ 3 คือ เกิดเพลิงไหม้ในห้องที่ปกติไม่มีคนใช้งานตลอดเวลา แต่ติดกับพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานอาคารอยู่จำนวนมาก ในสถานการณ์นี้กำหนดให้ไฟไหม้ลามออกไปยังพื้นที่ใกล้เคียง และประตูห้องต้นเพลิงถูกเปิดออกในขณะที่ประตูอื่นปิด –เปิดตามการใช้งาน

สถานการณ์ที่ 4 คือ เกิดเพลิงไหม้ในผนัง หรือในฝ้า เพดาน พื้นที่เกิดเพลิงเป็นที่ปิด ไม่มีระบบตรวจจับไฟลามไปในพื้นที่ใกล้เคียงที่มีผู้ใช้อาคารเป็นจำนวนมาก ในสถานการณ์นี้กำหนดให้ประตูทุกห้องเปิดค้างไว้

สถานการณ์ที่ 5 คือ ออกแบบให้แหล่งต้นเพลิงมีขนาดเล็กและเพลิงลุกไหม้อย่างช้าๆ ในพื้นที่จุดอับต่อระบบป้องกันอัคคีภัย ระบบดับเพลิงไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ดังกล่าวได้ จนกระทั่งเวลาผ่านไปไฟจึงลุกลาม สถานการณ์นี้กำหนดให้ประตูทุกห้องในอาคารเปิดค้างไว้

สถานการณ์ที่ 6 คือ เกิดเพลิงไหม้ที่รุนแรงที่สุด สถานการณ์นี้กำหนดให้ประตูห้องภายในอาคารปิดทั้งหมด

สถานการณ์ที่ 7 คือ เกิดเพลิงไหม้ขึ้นภายนอกอาคาร ทำให้เกิดผลกระทบต่ออาคารที่ใช้งาน

สถานการณ์ที่ 8 คือ เกิดเพลิงไหม้ทั่วไปในอาคาร แต่ระบบป้องกันอัคคีภัยภัยเชิงรุกหรือเชิงรับ ไม่มีประสิทธิภาพ สถานการณ์นี้กำหนดให้ประตูภายในอาคารปิดทั้งหมด

ในการคำนวณจำนวนผู้ใช้อาคาร จะใช้มาตราฐาน NFPA 101, Life Safety Code 2021 คำนวณหาได้ตาม Equation 1

$$N=\frac{A}{F} \tag{1}$$

N = Occupant Load (person)

A = Area (m^2)

F = Occupant Load Factor (m^2/person)

อุปกรณ์และวิธีการ

อาคารที่ใช้ศึกษาเป็นอาคารพักอาศัยลักษณะเป็นตึกแถวสูง 4 ชั้น ที่มีการปรับเปลี่ยนลักษณะการใช้อาคารเป็นโรงแรม 4 ชั้น โดยแบบแปลนอาคารเป็นดังแสดงใน Figs. 1A–1D

Fig. 1 Building plan of each level

ในการคำนวณหาจำนวนผู้ใช้อาคารจะยึดตามมาตรฐาน NFPA 101, Life Safety Code 2021 (Equation 1) ได้ผลดังแสดงใน Table 1

Table 1 Shows a number of occupants loaded each floor according to the standard of NFPA 101, Life Safety Code 2021

Floor No.	Occupant Load (persons)	Occupancy
1	39	Hotels and Dormitories
2	17	Hotels and Dormitories
3	9	Hotels and Dormitories
4	7	Hotels and Dormitories

จากการวิเคราะห์สถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้ ตามมาตราฐาน NFPA 101, Life Safety Code 2021 ในอาคารตึกแถวที่ปรับเปลี่ยนมาเป็นโรงแรมสูง 4 ชั้น พบว่าจะมีสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องที่จะใช้ในการศึกษาและจำลอง จากการวิเคราะห์ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งมีเพียง 5 สถานการณ์ เนื่องจากในสถานการณ์ที่ 4 ลักษณะภายในอาคารที่ศึกษาไม่มีฝ้าเพดาน, ในสถานการณ์ที่ 5 อาคารที่ศึกษาไม่มีเชื้อเพลิงขนาดเล็กลุกไหม้อย่างช้าๆ และไม่มีพื้นที่เป็นจุดอับต่อระบบป้องกันอัคคีภัย และในสถานการณ์ที่ 7 ลักษณะภายนอกอาคารที่ศึกษาไม่มีแหล่งเชื้อเพลิงที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดเพลิงไหม้ ทั้ง 3 สถานการณ์ที่กล่าวมาจึงไม่มีความเกี่ยวข้องและไม่ได้นำมาเป็นกรณีศึกษา

Table 2 Shows the determination of fire events

Scenario	Scenario NFPA 101	Event	Fire Origin room	Fuel	Burning Area (m^2)	Fire Size (kW)
1	1	A fire occurred on a bed (typical fire) and the room door was left open. Other doors were able to open and close normally.	Bedroom on third floor	Bed	1	200
2	2	A kitchen staff was collapsed to alcoholic bottles shattered to the open gas stove, causing a fire started in the kitchen (ultrafast-developing fire), thus the kitchen door was left open made the fire spread out, blocking the stairs to the first floor, which making it impossible to use the stairs down to the first floor.	Kitchen room on first floor	Ethanol Alcohol	1	412.7
3	3	The room under the stairs (normally unoccupied room). The washing machine short circuited, causing a fire which is close to the living area on the first floor where are a lot of occupants. The fire room door was left open. Although, other doors were able to open and close normally.	Under stairs room on first floor	Washing Machine	0.4	431
4	6	There was an accident where 10 liters of alcohol spilled on the floor, covering an area of approximately 4 square meters, the alcohol ignited (most severe fire) in the open space without a door blocking. Besides, all the doors in the building were closed.	Dining room on second floor	Ethanol Alcohol	4	1651

Scenario	Scenario NFPA 101	Event	Fire Origin room	Fuel	Burning Area (m^2)	Fire Size (kW)
5	8	An occupant lit a perfume lamp and it accidently spilled onto a wood drawer, class A fire (ordinary combustibles), causing the drawer to catch fire. The fire detection in the room was nonfunctioning, resulting in a significant increase in occupant evacuation time. Thus, all the doors in the building were open.	Bed room on fourth floor	Wood Drawer	0.6	1770

สำหรับการกำหนดโครงข่าย (Mesh) ในการจำลองการเกิดเพลิงไหม้ในแต่ละสถานการณ์ได้มีการศึกษาขนาดของกริดที่เหมาะสม (Grid Independence Study) (ณัฐศักดิ์, 2549) ในแต่ละสถานการณ์มาแล้ว ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Demonstrates parameters to identify the appropriate grid sizes

Scenario	Floor No	Dimension W(m.) × L(m.) × H(m.)	Cell Size m.	total number of cells
1	3	8 × 11.65 × 3	0.05	2,304,000
2	1	8 × 12.9 × 3.9	0.068	1,382,400
3	1	8 × 12.9 × 3.9	0.068	1,382,400
4	2	8 × 12.9 × 3.9	0.117	311,040
5	4	8 × 11.65 × 3	0.121	165,888

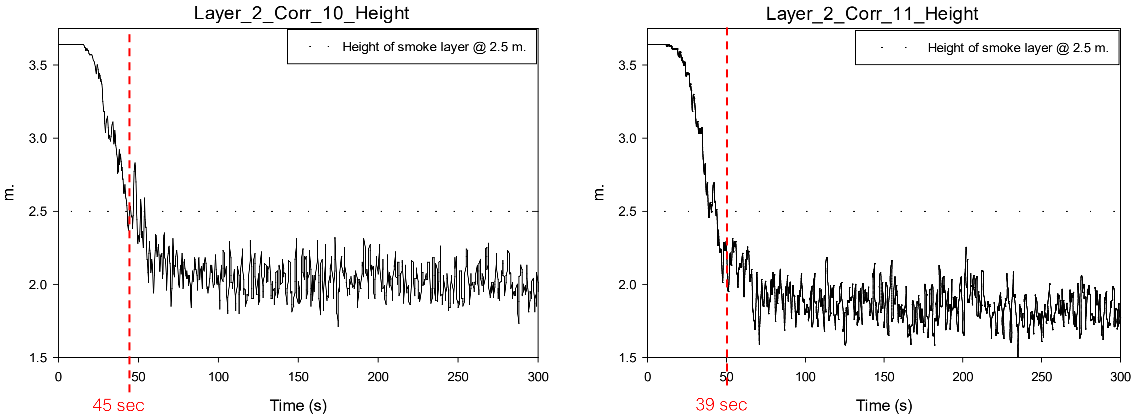
ในการศึกษาจะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิชั้นควันที่บริเวณกลางห้องนอนทุกห้องจำนวน 4 ตำแหน่ง กลางห้องต้นเพลิง 1 ตำแหน่ง และตามทางเดินอาคารชั้น 2 ห่างกันจุดละ 2 เมตร เป็นจำนวน 7 ตำแหน่ง รวม 12 ตำแหน่ง โดยทุกตัวเก็บค่าอุณหภูมิของชั้นควันที่ความสูง 3.564 เมตร จากพื้น เนื่องจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของควันไหลใต้เพดานจะอยู่ใต้เพดานลงมาประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของความสูงของห้องซึ่งมีความสูง 3.6 เมตร(ณัฐศักดิ์, 2560) ดังแสดงใน Fig. 2

Fig. 2 The Positions of the temperature and smoke layer height measurement.

นอกจากนี้ในการศึกษายังมีการตั้งค่า Behaviors(จีราภรณ์, 2562) เพื่อกำหนดค่า Delay Time (Lovreglio, et al., 2019) ของผู้อพยพในแต่ละชั้น โดยจะกำหนดให้ผู้ที่อยู่ชั้นต้นเพลิงจะทำการเริ่มอพยพทันทีเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้ ในขณะที่ชั้นอื่นจะต้องรอเวลาอุปกรณ์แจ้งเตือนดังก่อนแล้วจึงค่อยเริ่มอพยพ ในการศึกษายังกำหนดจุดปลอดภัยที่ใช้อพยพออกไปนอกอาคาร 2 แห่ง คือออกนอกอาคารโดยตรงที่ชั้น 1 และบริเวณบันไดหนีไฟชั้น 2 ซึ่งไม่ทอดยาวถึงพื้นชั้น 1 แต่ต้องอพยพโดยปีนผ่านบันไดลิง ในการศึกษาได้อ้างอิงมาตรฐาน (PD7974-6:2004)เป็นเกณฑ์ชี้วัดความปลอดภัย กล่าวคือ อุณหภูมิสูงสุดในชั้นควันจะต้องไม่เกิน 200 °C, ชั้นควันจะต้องสูงจากพื้นที่ไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร และในการจำลองการอพยพหนีไฟ ต้องมีเวลาในการอพยพ (RSET) น้อยกว่าเวลาสูงสุดที่ทำให้มีผู้เสียชีวิต (ASET)

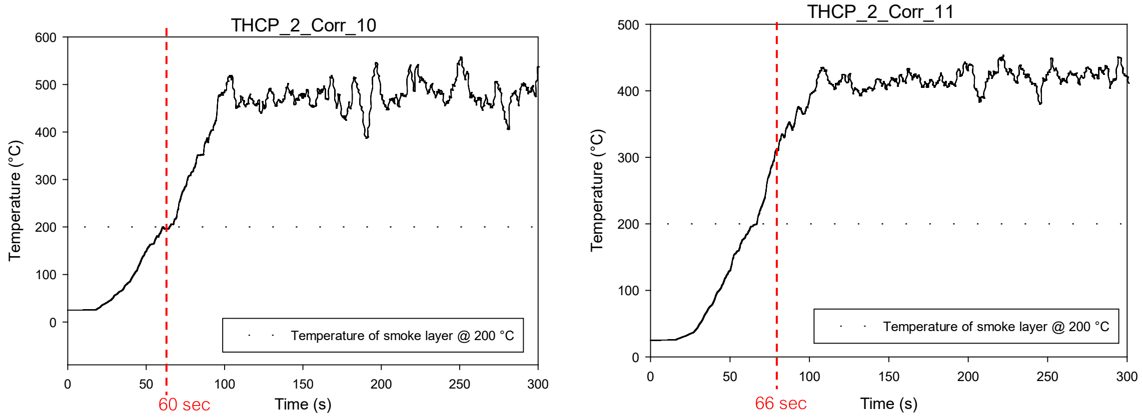
ผลการทดลอง

จากผลการจำลองสถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้และการอพยพหนีไฟทั้ง 5 สถานการณ์พบว่าสถานการณ์ที่ 6 ในมาตราฐาน NFPA 101, Life Safety Code 2021 เป็นสถานการณ์เดียวที่ไม่ผ่านเกณฑ์ชี้วัดสมรรถนะความปลอดภัย เนื่องจากต้นเพลิงอยู่ใกล้ประตูทางหนีไฟ เชื้อเพลิงเป็นแอลกอฮอล์ ทำให้การลุกลามของควันไฟเกิดขึ้นค่อนข้างรวดเร็ว เมื่อนำระยะเวลาการอพยพหนีไฟของผู้ใช้งานอาคารมาเทียบกับผลของการจำลองพลศาสตร์อัคคีภัยด้วยโปรแกรม Pyrosim โดยกำหนดเวลาในการจำลอง 300 วินาที เพื่อพิจารณาผลต่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคารในสถานการณ์ดังกล่าว พบว่าระดับความสูงของชั้นควันในสถานการณ์ที่ 6 ซึ่งก็คือชั้นที่ 2 บริเวณกลางทางเดิน และหน้าประตูหนีไฟมีระดับที่ต่ำกว่า 2.5 เมตร ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ชี้วัดกำหนดที่เวลา 45 วินาที และ 39 วินาที ตามลำดับดังแสดงใน Figs. 3A, 3B สำหรับอุณหภูมิควันที่สูงกว่า 200 °C พบในบริเวณเดียวกับที่ระดับความสูงของชั้นควันต่ำกว่ามาตรฐานที่เวลา 60 วินาที และ 66 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงใน Figs. 4A, 4B



(A) At the center of corridor (B) In front of the fire door

Fig. 3 Smoke layer height on second floor



(A) At the center of corridor (B) In front of the fire door

Fig. 4 The temperature of smoke on second floor

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองการอพยพ Pathfinder ดังแสดงใน Fig. 5 พบว่าตั้งแต่เวลาที่ 39 วินาที มีผู้อพยพในบริเวณชั้น 2 จำนวน 3 คน และมีจำนวนผู้อพยพเพิ่มขึ้นซึ่งลงมาจากชั้น 3 และ ชั้น 4 ผ่านทางเดินชั้น 2 ที่เวลา 68 วินาที นอกจากนี้พบว่าวินาทีที่ 89 มีผู้อพยพย้อนกลับเข้ามาในตัวอาคารเพื่อเปลี่ยนเส้นทางหนีไฟเนื่องจากทางออกสุดท้าย ที่เป็นบันไดลิงไม่ได้ทอดลงสู่พื้นชั้น 1ทำให้เกิดความล่าช้าในการอพยพ และใช้เวลาในการอพยพออกจากอาคารทั้งหมด 129 วินาที เนื่องจากต้องมีการรอคอยในการอพยพ ทำให้สรุปได้ว่าสถานการณ์ดังกล่าวไม่ปลอดภัยต่อผู้อพยพ จึงได้ทำการแก้ไขเพื่อปรับปรุงให้อาคารมีความปลอดภัยมากขึ้น โดยทำการติดตั้งพัดลมดูดควัน(วีรวุฒ และสุรชัย, 2558)บริเวณผนังด้านข้างห้องต้นเพลิงจำนวน 2 ตัว พัดลมที่ใช้มีปริมาณลม 3.93 m^3/s (8,327 CFM) (NFPA 204, 2021) ต่อตัวดังแสดงใน Fig. 6

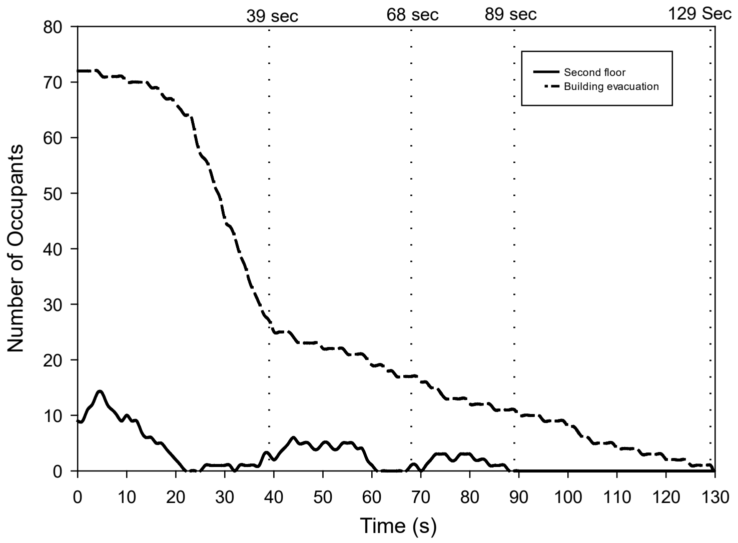


Fig. 5 Second floor evacuation time and building evacuation time

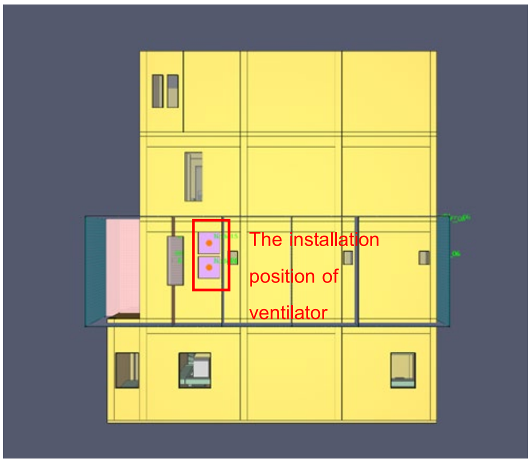
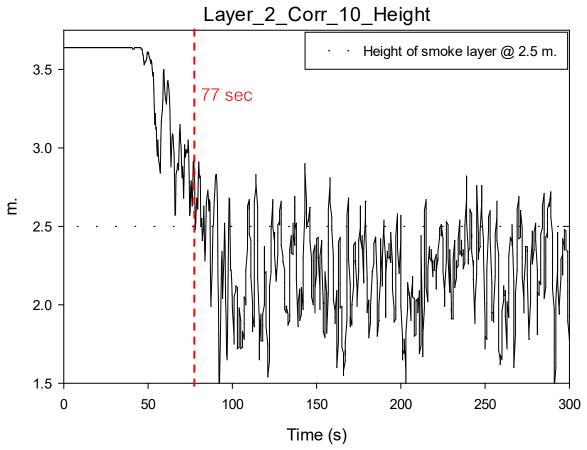
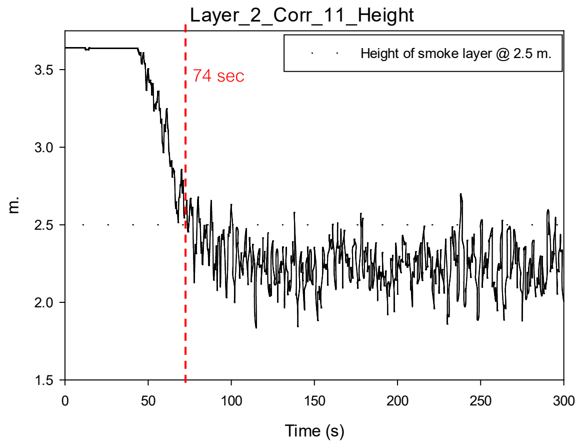


Fig. 6 The installation position of ventilator

จากผลการติดตั้งพัดลมดูดควันพบว่าระดับความสูงและอุณหภูมิของชั้นควันยังไม่ไม่ผ่านเกณฑ์ชี้วัดความปลอดภัยตามมาตรฐาน (PD7974-6:2004) ดังแสดงใน Figs. 7A, 7B และ Figs. 8A, 8B ตามลำดับ

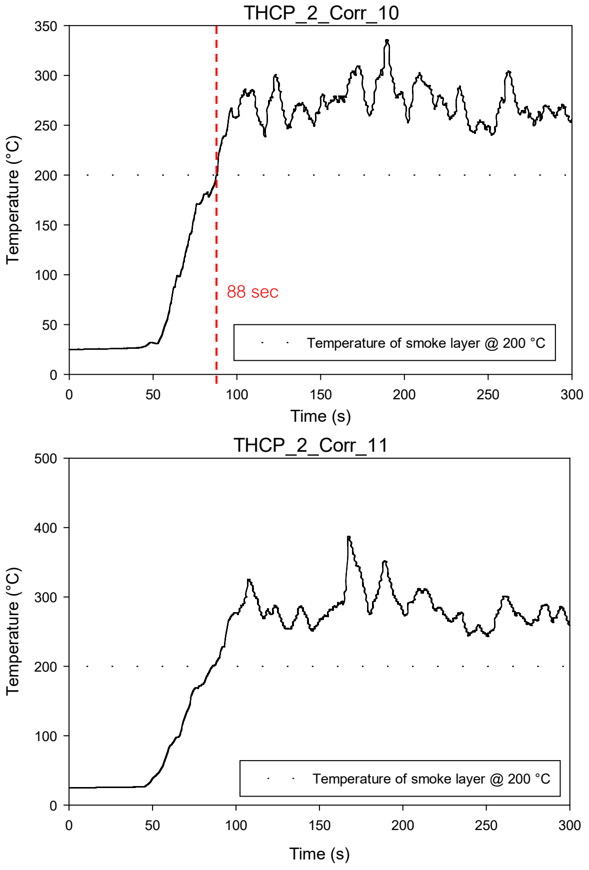


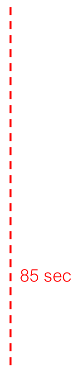
(A) At the center of corridor



(B) In front of the fire door

Fig. 7 The height of smoke layer after installing the ventilator on the second floor





(A) At the center of corridor (B) In front of the fire door

Fig. 8 The temperature of smoke layer after installing the ventilator on the second floor

เนื่องจากการติดตั้งพัดลมดูดควัน จำนวน 2 ตัวแล้วพบว่า ยังไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร จึงทำการปรับปรุงทางหนีไฟให้ทอดยาวถึงพื้นชั้น 1 ทดแทนการใช้บันไดลิง ดังแสดงใน Fig. 9 เพื่อลดระยะเวลาในการอพยพหนีไฟ และไม่ให้เกิดการรอคอยการอพยพ จากผลการปรับปรุงพบว่าระยะเวลาในการอพยพในบริเวณทางเดินชั้น 2 ลดลงเหลือ 52 วินาที ดังแสดงใน Fig. 10 และเวลาการอพยพของคนทั้งหมดลดลงจาก 129 วินาทีเป็น 103 วินาที

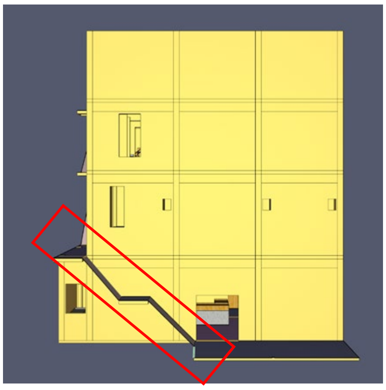


Fig. 9 The amendment of fire stairs along to First Floor

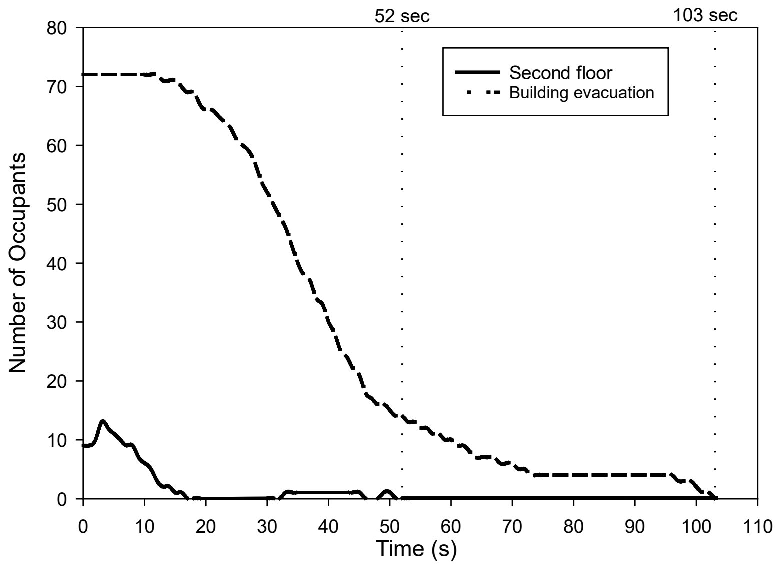


Fig. 10 Second floor evacuation time and building evacuation time after the fire exit improvement

สรุป

จากการวิเคราะห์และจำลองการเกิดเพลิงไหม้ในสถานการณ์ต่างๆตามมาตราฐาน NFPA 101, Life Safety Code 2021 พบว่าสถานการณ์ที่ 6 มีความสูงและระดับอุณหภูมิของชั้นควันในบริเวณชั้น 2 ไม่ผ่านเกณฑ์ชี้วัดความปลอดภัยตามมาตรฐาน (PD7974-6:2004) ทำให้การอพยพในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวไม่ปลอดภัยในการอพยพ อาจเป็นเหตุให้เสียชีวิตได้

เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาวิเคราะห์และปรับปรุงอาคารโดยติดตั้งพัดลมดูดควันปริมาณลม 3.93 m^3/s (8,327 CFM) จำนวน 2 ตัว สามารถช่วยระบายควันสะสมเพิ่มระยะเวลาให้อพยพได้ แต่ยังมีผู้อพยพบางส่วนเสียชีวิตเนื่องจากบันไดหนีไฟไม่ได้ต่อเนื่องถึงพื้นชั้น 1 ต้องใช้บันไดลิงในชั้นสุดท้าย ทำให้คนอพยพเกิดการรอคอยจนทำให้เกิดความล่าช้าในการอพยพ จึงมีผู้อพยพบางส่วนย้อนกลับเข้ามาในตัวอาคารเพื่อเปลี่ยนเส้นทางอพยพหนีไฟ ทำให้ใช้เวลาในการอพยพชั้นดังกล่าวถึง 89 วินาที

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการปรับปรุงทางหนีไฟให้อพยพได้ตลอดถึงชั้น 1 โดยไม่ต้องใช้บันไดลิง ระยะเวลาในการอพยพบริเวณทางเดินชั้น 2 ลดลงเหลือเพียง 52 วินาที และเวลาการอพยพของคนทั้งหมดลดลงเหลือ 103 วินาที ทำให้ผู้ใช้อาคารปลอดภัย ไม่มีใครเสียชีวิตจากการอพยพ และผ่านเกณฑ์ชี้วัดความปลอดภัยตามมาตรฐาน (PD7974-6:2004) รวมถึงผ่านเกณฑ์ตามที่กฎกระทรวงกำหนด

เอกสารอ้างอิง

จีราภรณ์ สุดเต้. 2558. การวิเคราะห์สมรรถนะเส้นทางหนีไฟของอาคารสูงและขนาดใหญ่พิเศษ ด้วยโปรแกรม Pyrosim และ Pathfinder กรณีศึกษา: พื้นที่ครอบครองประเภทที่อยู่อาศัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2549. การหาขนาดกริดที่เหมาะสมสำหรับการจำลองเพลิงไหม้ภายในอาคาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. นครราชสีมา.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. พลศาสตร์อัคคีภัย (Fire Dynamics) พิมพ์ครั้งที่ 2, วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย, ภาควิชาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีรวุฒ หงส์ทอง, สุรชัย รดาการ. 2558. การศึกษาการระบายควันไฟในโถงสูง อาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. วิศวกรรมสาร มก. 28: 17–28.

British Standards. 2004. PD7974-6:2004 The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings Part 6: Human factors: Life Safety strategies – Occupant evacuation, behaviour and condition. UK.

Lovreglio, R., Kuligowski, E., Gwynne, S., Boyce, K. 2019. A pre-evacuation database for use in egress simulations. Fire Safety Journal 105: 107–128. doi:10.1016/j.firesaf.2018.12.009

National Fire Protection Association. 2021. NFPA 101 Life Safety Code, Editon 2021. USA.

National Fire Protection Association. 2021. NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting, Editon 2021. US

ความหนาแน่นของคนที่เหมาะสมในการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคทางอากาศสำหรับพื้นที่อาคารสำนักงานและร้านอาหารที่มีปริมาณการระบายอากาศตามมาตรฐาน

Appropriate occupancy density in preventing airborne transmission for office and restaurant with standard ventilation rate

<u>พิชชาพร ประพิณศรี</u>, สรัล ศาลากิจ*

<u>Pitchaporn Prapinsri</u>, Saran Salakij*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: saran.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 สามารถแพร่กระจายเชื้อได้ทางอากาศ การควบคุมสภาพแวดล้อมสามารถลดปริมาณเชื้อโรคและความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้ใช้งานได้ ซึ่งในพื้นที่อาคารที่มีอยู่แล้วมักมีการระบายอากาศที่จำกัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของคนที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกับดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม และใช้พื้นที่สำนักงานและร้านอาหารเป็นกรณีตัวอย่างเนื่องจากพฤติกรรมของคนทั้งสองพื้นที่มีความแตกต่างกันในสถานการณ์จริง กำหนดระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่ 1–3 ชั่วโมงและความเสี่ยงมีค่าระหว่าง 0.01–0.05 พบว่า เมื่อคนอยู่นานขึ้น ความหนาแน่นของคนควรลดลงทุกพื้นที่ แต่หากยอมรับค่าความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นได้หรือสวมหน้ากากอนามัย ทุกพื้นที่จะสามารถรับคนได้มากขึ้น และการถอดหน้ากากอนามัยส่งผลให้จำนวนคนที่เหมาะสมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลองนี้ใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดมาตรการป้องกันโรคติดต่อได้ เช่น การกำหนดความหนาแน่นของคนในพื้นที่ การกำหนดระยะเวลาเข้าใช้ และการสวมใส่หน้ากากอนามัย

คำสำคัญ: การแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ, การระบายอากาศ, ความหนาแน่นคน, ความเสี่ยงในการติดเชื้อ, ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม

Abstract

Coronavirus disease 2019 can be transmitted through the air. Controlling the environment can reduce the number of pathogens and the risk of infection. Existing areas of buildings often have limited ventilation. Therefore, the appropriate occupancy density has been analyzed by using probability of infection with probability of different distance and use office and restaurants due to occupants' behavior. Staying duration was 1-3 hours, and the risk of infection was 0.01–0.05. It is found that the longer staying time, the less occupancy density for all areas, but if the more risk limit is accepted or wears a mask, the more people will be accepted and removing masks resulted in an occupancy density. This model can be a tool for defining measures for the prevention of diseases, such as the number of people in area, the period of use, and wearing of surgical masks.

Keywords: Airborne transmission, Occupancy density, Probability of different distance, Probability of infection, Ventilation rate

คำนำ

การแพร่ระบาดของโรคติดต่อทางระบบทางเดินหายใจเป็นสิ่งที่มนุษย์เผชิญมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ดังเช่น วัณโรค ซาร์ส เมอร์ส และโรคไข้หวัดใหญ่ เป็นต้น ถึงแม้ว่าทางองค์การอนามัยโลกจะมีการประกาศให้โรคติดเชื้อบางชนิดสิ้นสุดการระบาดลง แต่จะเห็นว่ายังมีโอกาสเกิดโรคอุบัติใหม่ได้เนื่องจากการกลายพันธุ์ของเชื้อไวรัส เกิดเป็นโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งส่งผลกระทบทำให้ยอดผู้ติดเชื้อและยอดผู้เสียชีวิตสูงขึ้นทั่วโลก (WHO, 2021a)

โรคติดต่อทางระบบทางเดินหายใจสามารถแพร่กระจายได้หลากหลายทาง (WHO, 2021b) ทั้งการสัมผัสเชื้อบนพื้นผิวสัมผัสโดยตรง การแพร่เชื้อผ่านละอองน้ำมูกหรือน้ำลาย และการแพร่เชื้อทางอากาศ ซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Ijaz et al., 2020) เป็นละอองฝอยที่มีเชื้อโรคอยู่ภายในและสามารถลอยอยู่ในอากาศได้นานและไกลกว่าหยดน้ำลาย สามารถแพร่กระจายและติดเชื้อได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ภายในอาคารที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอ หรือพื้นที่แคบ และพื้นที่ที่มีประชากรแออัด (WHO, 2021c; Chen et al., 2022) ทำให้มีอัตราเสี่ยงในการติดเชื้อสูง ดังนั้นการปรับปรุงระบบปรับอากาศเพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อของโรคติดต่อทางระบบทางเดินหายใจ (Stephens, 2013) เป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมและป้องกันการเกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรค มีทั้งการจัดการเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ความสะอาด และการกระจายอากาศให้เป็นไปตามที่ต้องการ (Liu et al., 2018)

ทางผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคารเพื่อลดปริมาณเชื้อโรค และความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้ใช้งานอาคารในช่วงวิกฤตการณ์โรคติดต่อทางระบบทางเดินหายใจ โดยการวิเคราะห์ความเหมาะสมของความหนาแน่นของคนในพื้นที่ต่อปริมาณการระบายอากาศที่มีอยู่อย่างจำกัดในพื้นที่นั้น จึงได้การทำศึกษาวิเคราะห์จำนวนความหนาแน่นของคนสูงสุดในพื้นที่ที่เป็นไปได้ เมื่อพื้นที่ดังกล่าวมีปริมาณการระบายอากาศจำกัดตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2013) เพื่อใช้ในการกำหนดมาตรการควบคุมจำนวนคนที่เข้าสู่พื้นที่เสี่ยง และกำหนดระยะห่างของคนในพื้นที่โดยใช้สมการที่พัฒนาจากแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci

วิธีการดำเนินการ

การพิจารณาความหนาแน่นของคนที่เหมาะสมภายในพื้นที่ซึ่งมีปริมาณการระบายอากาศจำกัดตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 ทำได้โดยการพัฒนาแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ ซึ่งใช้คำนวณค่าความเสี่ยงในการติดโรคของบุคคลตามเวลาที่อยู่ในพื้นที่ และสอบเทียบผลของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อมูลการติดเชื้อจากสถานการณ์จริงและค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อซึ่งคำนวณจากสมการแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้ออื่น จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาไปหาความหนาแน่นของคนที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ในพื้นที่

การคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีวิธีการคำนวณได้ด้วยหลากหลายแบบจำลองดัง Table 1 โดยทั่วไปมักใช้สมการจากแบบจำลองของ Wells-Riley (1978) ดัง Equation 1 ซึ่งมีการใช้ค่าอัตราการสร้างอนุภาคติดเชื้อในอากาศหรือควอนตาที่มีค่าแตกต่างกันตามชนิดของโรคในการคำนวณ โดย Wells ระบุว่า จำนวนคนที่ติดเชื้อมีความสัมพันธ์แบบปัวส์ซองกับจำนวนอนุภาคเชื้อโรคที่คนสูดดมเข้าไป และใช้สมมติฐานว่าอากาศในห้องผสมกันแบบสมบูรณ์ที่สภาวะคงที่ หลังจากนั้น Riley จึงได้พัฒนาสมการของ Wells ให้สามารถคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อโดยทำการศึกษาระบาดวิทยาในโรคหัด สมการของ Wells-Riley มีข้อจำกัด คือ ใช้สำหรับกรณีอากาศในห้องผสมอย่างสมบูรณ์ในสภาวะความเข้มข้นของอนุภาคเชื้อโรคคงที่เท่านั้น ใช้ในกรณีที่ความเข้มข้นของอนุภาคเชื้อโรคเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาไม่ได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกพัฒนาแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci (1997) ใน Equation 2-4 ซึ่งใช้ในกรณีค่าควอนตาในห้องเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เป็นเงื่อนไขภายใต้สภาวะไม่คงที่ แต่ยังคงสมมติฐานว่าอากาศในห้องผสมกันอย่างสมบูรณ์ อีกทั้งยังสามารถหาจำนวนผู้รับเชื้อเปลี่ยนแปลงตามเวลา และค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเปลี่ยนแปลงตามเวลา

Table 1 Summary of probability of infection models from other literatures

Year	Model	Parameters	Equations	
1978	Wells-Riley	Probability of infection	$PI = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{\Lambda}\right)$	(1)
1997	Gammaitoni-Nucci	Quanta of infection changed	$\frac{dQ}{dt} = -\Lambda Q + qI$	(2)
		Susceptible changed	$\frac{dS}{dt} = -\frac{p}{V}Q(t)S(t)$	(3)
		Probability of infection	$PI(t,q,\Lambda) = \left(1 - \frac{S(t,q,\Lambda)}{S_0}\right) x\ 100$	(4)
2020	Sun-Zhai	Probability of infection	$PI = 1 - \exp\left(-P_d \frac{Iqpt}{\Lambda E_z}\right)$	(5)
		Probability of social distance	$P_d = -18.19\ln(d) + 43.276$	(6)

นอกจากนี้แบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci ยังมีสมมติฐานคือ ไม่พิจารณาความแตกต่างของสภาพร่างกายของผู้รับเชื้อทุกคน และผู้ที่สามารถรับเชื้อได้ภายในห้องไม่กลายเป็นผู้แพร่เชื้อ ซึ่งแบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci มีการพิจารณาเฉพาะค่าความเสี่ยงในการติดเชื้ออันเนื่องมาจากอนุภาคควอนตาที่แพร่โดยผู้ติดเชื้อซึ่งเข้ามาในพื้นที่ ไม่ได้คำนึงถึงระยะห่างระหว่างบุคคล ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาโดยคำนึงถึงระยะห่างทางสังคม รวมไปถึงการสวมใส่หน้ากากอนามัยเพื่อป้องกันเชื้อโรค ซึ่งส่งผลต่อค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้รับเชื้อด้วยเช่นกัน โดยเมื่อนำแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci มาพัฒนาร่วมกับดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจจะได้สมการแสดงดัง Equations 7 และ 8

$$\frac{dQ}{dt} = -\Lambda Q + (1-\eta_i)qI \quad (7)$$

$$\frac{dPI}{dt} = \frac{P_d' p(1-\eta_s)}{V} Q(1-PI) \quad (8)$$

โดย Q คือ ค่าควอนตัมในการติดเชื้อ (ควอนตัม), t คือ ระยะเวลาในการแพร่เชื้อ (วินาที), Λ คือ ปริมาณการระบายอากาศในห้อง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), q คือ อัตราการสร้างค่าควอนตัมโดยผู้แพร่เชื้อ 1 คน (ควอนตัมต่อวินาที), I คือ จำนวนผู้แพร่เชื้อ (คน), S คือ จำนวนผู้ที่สามารถรับเชื้อได้ (คน), PI คือ ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ, P_d' คือ ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่ได้รับการปรับเส้นโค้ง, p คือ อัตราการหายใจของผู้รับเชื้อ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), V คือ ปริมาตรห้อง (ลูกบาศก์เมตร), η_s และ η_i คือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจของผู้รับเชื้อและผู้แพร่เชื้อตามลำดับ

สำหรับดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม (P_d) เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับระยะทางการแพร่กระจาย (d) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งระยะทางการแพร่เชื้อโรคขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความเร็วลม ความหนืด และทิศทางการไหล เป็นต้น Sun และ Zhai (2020) ได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของขนาดหยดน้ำลายที่แตกต่างกันกับระยะทางการแพร่กระจายจากการทดลองพ่นหยดน้ำ จากนั้นนำค่าไปคำนวณดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง และทำการสร้างสมการเส้นโค้งของข้อมูลได้ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมแสดงดัง Equation 6 Sun และ Zhai (2020) ได้นำดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมมาประยุกต์เข้ากับปัจจัยจากการระบายอากาศ (E_Z) ในสมการของ Wells และ Riley ดังแสดงใน Equation 5 และนำมาประยุกต์เพื่อหาอัตราการระบายอากาศและค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อโดย

ควบคุมค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อให้มีค่าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้สมการของ Sun และ Zhai เป็นสมการที่ประยุกต์มาจากสมการของ Wells และ Riley ดังนั้นจึงมีสมมติฐานเช่นเดียวกัน คือ อากาศในห้องผสมกันแบบสมบูรณ์ที่สภาวะคงที่และผู้รับเชื้อติดโรคได้แต่ไม่สามารถแพร่เชื้อได้เอง

ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมดังกล่าวมีค่าคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับข้อมูลจากการทดลองค่อนข้างมาก ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับเส้นโค้งของดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมใหม่ให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองจริง แสดงดัง Fig. 1 และได้ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมใหม่ดัง Equation 9 โดยเมื่อระยะทางการแพร่กระจายลดลงหรือหยดน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ค่าดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของหยดน้ำลายสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อเกิดการระเหย ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้น

$$P'_d = 0.8796\exp(-1.06\mathrm{d}) + 0.1198\exp(-0.1001\mathrm{d}) \quad (9)$$

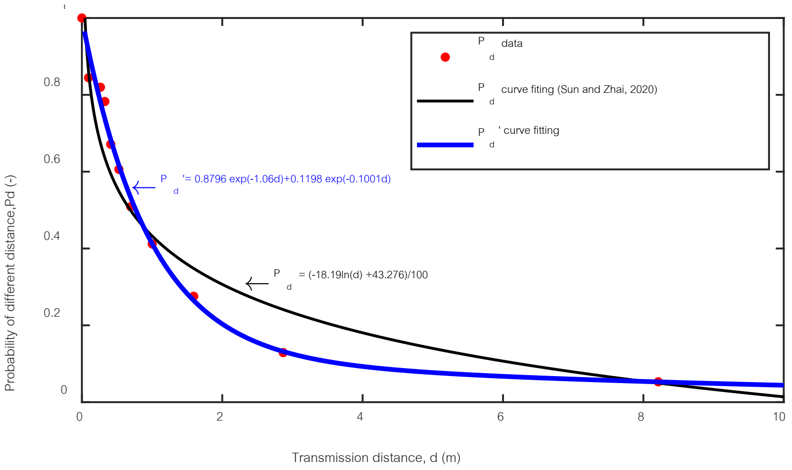


Fig. 1 Comparison of P_d fitting curve (Sun and Zhai, 2020) and new P_d fitting curve with experimental data

ในส่วนของประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ (η) อ้างอิงจากงานวิจัยของ Nicas (1995) ซึ่งคำนึงถึงประสิทธิภาพการรั่วไหลของอากาศผ่านแผ่นกรองในหน้ากากอนามัยประเภทต่าง ๆ และเนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการหาความหนาแน่นของคนที่เหมาะสมในพื้นที่ร้านอาหารและสำนักงานจึงแบ่งกรณีเปรียบเทียบระหว่างการที่คนใส่หน้ากากอนามัยทั้งหมดและไม่ใส่หน้ากากอนามัยทั้งหมดในพื้นที่ โดยกำหนดให้หน้ากากดังกล่าวเป็นหน้ากากอนามัยทางการแพทย์เท่านั้น ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันระบบทางเดินหายใจของอุปกรณ์เท่ากับ 0.58 ทั้งกรณีของผู้รับเชื้อและผู้แพร่เชื้อ และในกรณีไม่สวมใส่หน้ากากอนามัย ค่าประสิทธิภาพการป้องกันจะมีค่าเท่ากับ 0

การสอบเทียบผลแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้ออ้างอิงข้อมูลการเกิดสถานการณ์โรคติดต่อที่แพร่กระจายทางอากาศจริงจากงานวิจัยทั้งหมด 11 สถานการณ์ ได้แก่ การแพร่เชื้อวัณโรคจากการปลูกถ่ายฝี การชันสูตรพลิกศพ การตรวจหลอดลม และการใส่ท่อช่วยหายใจ (Gammaitoni and Nucci, 1997) การแพร่เชื้อโควิด-19 ในเครื่องบินประเทศอิหร่าน ในรถประจำทางของเมืองต่าง ๆ ในประเทศจีน (Sun and Zhai, 2020) ในรถประจำทางประเทศญี่ปุ่น (Tsuchihashi et al., 2021) และในพื้นที่หุบเขาสกากิตในเมืองวอชิงตัน (Miller et al., 2020) โดยอ้างอิงค่าในการคำนวณ ได้แก่ อัตราการหายใจของผู้รับเชื้อ (p) ควอนตัมในการติดเชื้อ (q) ระยะเวลาในการแพร่เชื้อ (t) อัตราการระบายอากาศ (VR) ปริมาณการระบายอากาศในห้อง (Λ) จำนวนคนติดเชื้อในสถานการณ์จริง (N_i) จำนวนคนในห้องทั้งหมด (N_t) จำนวนผู้ติดเชื้อเริ่มต้น (I) และระยะทางการแพร่กระจาย (d) ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Summary of parameters from actual case studies

Case	Disease	p	q	t	VR	Λ	N_I	N_t	I	d
Abscess irrigation, U.S.A. [A]	Tuberculosis	0.01	38	150	20	0.1	4	5	2	0.3
Autopsy, U.S.A.	Tuberculosis	0.01	94	150	20	0.1	4	4	1	0.3
Bronchoscopy, U.S.A.	Tuberculosis	0.01	6	150	20	0.1	10	13	4	0.3
Intubation, U.S.A. [A]	Tuberculosis	0.01	514	66	300	0.1	2	3	2	0.21
Airplane, Iran	COVID-19	0.005	14.28	390	145.7	0.04	37	311	1	0.76
Bus in Hunan-1, China	COVID-19	0.005	14.28	120	18.33	0.04	8	46	1	1.05
Bus in Hunan-2, China	COVID-19	0.005	14.28	60	5.6	0.04	3	12	1	1.3
Bus in Ningbo, China	COVID-19	0.005	14.28	240	22.7	0.04	25	68	1	0.7
Bus in Zhejiang, China	COVID-19	0.01	14.28	100	27.1	0.04	24	68	2	1.05
Bus tour1, Japan [A]	COVID-19	0.01	14.28	212	16.3	0.04	19	41	2	1.05
Skagit Valley, U.S.A.	COVID-19	0.02	14.28	150	32.4	0.04	53	61	4	1

A-Surgical masks were adapted.

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการติดเชื้อในสถานการณ์จริงกับค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่า มีค่าคิดเป็น 10.78% ซึ่งน้อยกว่าแบบจำลอง Wells และ Riley (1978) ใน Equation 1 แบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci (1997) ใน Equation 2-4 และแบบจำลอง Sun และ Zhai (2020) ใน Equation 5 ซึ่งคิดเป็น 54.19% 45.66% และ 16.01% ตามลำดับดังแสดงใน Fig. 2 โดยผลลัพธ์ที่ได้ต่อจากนี้จะอ้างอิงจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่ซึ่งมีการประยุกต์ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่ได้รับการปรับเส้นโค้งใหม่ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจเท่านั้น

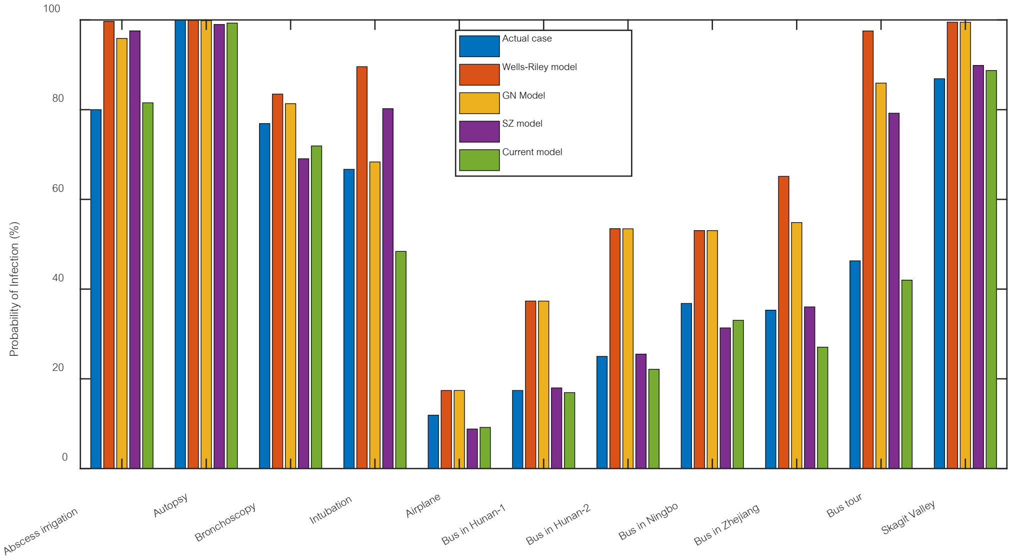


Fig. 2 Comparison of each probability of infection from actual case studies

งานวิจัยนี้พิจารณาพฤติกรรมของคนในพื้นที่ที่แตกต่างกันออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีคนในพื้นที่ทุกคนไม่สวมใส่หน้ากากอนามัย และกรณีคนในพื้นที่ทุกคนสวมใส่หน้ากากอนามัย และพื้นที่จำนวนทั้งหมด 2 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่

สำนักงาน และพื้นที่ร้านอาหาร ดังนั้นจึงพิจารณารวมทั้งสิ้น 4 กรณี และปริมาณการระบายอากาศแต่ละพื้นที่และจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดในพื้นที่มีค่าตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 แสดงดัง Table 3 กำหนดให้ระยะเวลาที่สามารถอยู่ในพื้นที่ได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1–3 ชั่วโมงโดยคนในพื้นที่จะมีความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.01-0.05 แบบจำลองที่ได้รับการพัฒนานี้มีสมมติฐานการใช้งานเช่นเดียวกับแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci และการกำหนดค่าจำนวนผู้ติดเชื้อในห้องเพิ่มเติม คือ ให้จำนวนผู้ติดเชื้อในห้องคิดเป็น 2% ของจำนวนคนในพื้นที่ ณ เวลาที่เข้าออกพื้นที่นั้นๆ และนิวเคลียสของหยดละอองฝอยถูกกำจัดออกทั้งหมดได้โดยอากาศบริสุทธิ์ที่เข้าสู่อาคาร

Table 3 Standard ventilation rate and maximum number of people in each area by ASHRAE standard

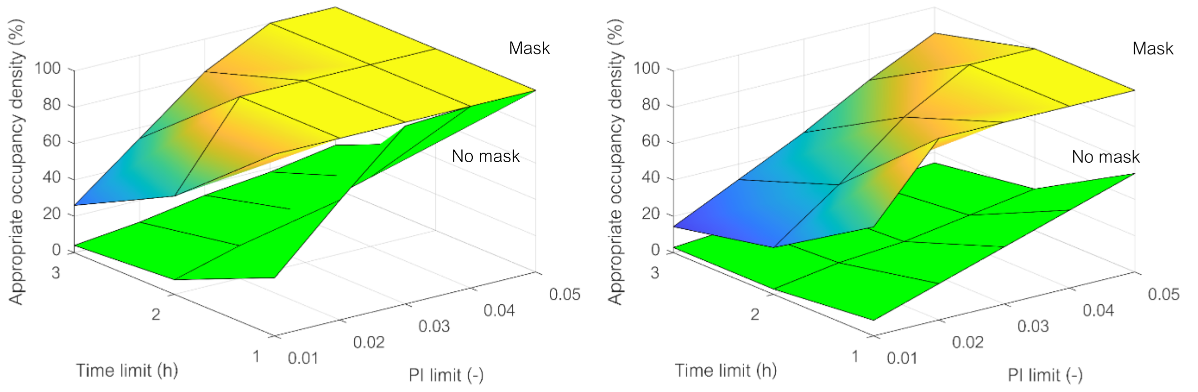
Scenario	People outdoor air rate (R_p) (cfm/person)	Area outdoor air rate (R_a) (cfm/ft^2)	Standard ventilation rate by ASHRAE (ACH)	Maximum people	Volume (m^3)
Office	5	0.06	0.5	50	3000
Restaurant	7.5	0.18	4.1	35	150

ผลและวิจารณ์ผลการจำลอง

เมื่อกำหนดให้ระยะเวลาที่สามารถอยู่ในพื้นที่ได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1–3 ชั่วโมงโดยคนในพื้นที่จะมีความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.01–0.05 พบว่า การกำหนดให้คนสามารถอยู่ในพื้นที่เป็นเวลานานขึ้น จำนวนคนที่สามารถอยู่ในพื้นที่ได้จะมีค่าน้อยลง ดังแสดงใน Fig. 3 โดยเมื่อคนอยู่ในพื้นที่เป็นเวลาเพิ่มขึ้นในพื้นที่สำนักงานจาก 1 ชั่วโมงเป็น 2 ชั่วโมง ความหนาแน่นของคนที่อยู่ในพื้นที่ที่สามารถรับได้สูงสุดจะลดลงเฉลี่ย 66.63% และเมื่อเพิ่มเวลาขึ้นจาก 2 ชั่วโมงเป็น 3 ชั่วโมง ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 51.64% ในขณะที่พื้นที่ร้านอาหาร การเพิ่มเวลาที่อยู่ในพื้นที่จาก 1 ชั่วโมงเป็น 2 ชั่วโมง ความหนาแน่นของคนที่พื้นที่สามารถรับได้สูงสุดจะลดลงเฉลี่ย 61.07% และการเพิ่มเวลาจาก 2 ชั่วโมงเป็น 3 ชั่วโมง ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 25.83%

กรณีที่ทุกคนสวมใส่หน้ากากอนามัย จะทำให้ความหนาแน่นของคนเข้าพื้นที่สูงสุดเพิ่มขึ้นดังแสดงใน Fig. 3 เนื่องจากการแพร่อนุภาคเชื้อโรคหรือควอนตาของผู้แพร่เชื้อลดน้อยลงตามประสิทธิภาพการป้องกันของหน้ากากอนามัย จึงทำให้เมื่อค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของบุคคลในพื้นที่ไม่เกิน 0.01 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดและเป็นมาตรการการป้องกันและควบคุมโรคที่เข้มงวดที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นของคนในพื้นที่ที่ระยะเวลาอยู่ในพื้นที่ไม่เกิน 1, 2, และ 3 ชั่วโมง สำหรับสำนักงานจะสามารถรับคนเพิ่มได้ถึง 212.50%, 575.00% และ 550.00% ตามลำดับเทียบกับขณะไม่สวมใส่หน้ากากอนามัย และในพื้นที่ร้านอาหาร เมื่ออยู่ในพื้นที่ไม่เกิน 1, 2, และ 3 ชั่วโมงจะสามารถรับคนได้เพิ่มขึ้น 600.00%, 800.00% และ 400.00% ตามลำดับ

การใส่หน้ากากอนามัยทำให้ทุกพื้นที่สามารถรับจำนวนคนเพิ่มขึ้นได้ แต่ในทางปฏิบัติเป็นข้อจำกัดที่ทำได้ยากสำหรับร้านอาหารที่จำเป็นต้องเปิดหน้ากากอนามัยเพื่อรับประทานอาหาร และเนื่องจากร้านอาหารมีจำนวนคนต่อปริมาตรพื้นที่ที่สูงกว่าสำนักงานมากทำให้พื้นที่ร้านอาหารมีจำนวนของคนที่เหมาะสมในอัตราส่วนที่น้อยกว่า ที่ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.01 เมื่อทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและอยู่ในพื้นที่เป็นเวลา 1, 2, และ 3 ชั่วโมง จะมีความหนาแน่นของคนคิดเป็น 8.57%, 2.86% และ 2.86% ของพื้นที่ตามลำดับ และเมื่อใส่หน้ากากอนามัย จะมีความหนาแน่นคิดเป็น 60.00%, 25.71%, และ 14.29% ของพื้นที่ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองกรณีแล้วจะเห็นได้ว่า คนอยู่ในพื้นที่เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมงจะสามารถรับคนได้ลดลง 85.71%, 88.89%, และ 80.00% ตามลำดับ



(A) Office scenario (B) Restaurant scenario

Fig. 3 Appropriate occupancy density in room from ASHRAE standard ventilation rate when PI and time were defined. (A) office scenario with and without masks; (B) restaurant scenario with and without masks

สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองความเสี่ยงในการติดเชื้อด้วยดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมและประสิทธิภาพหน้ากากอนามัยจากสมการในแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci ซึ่งสามารถใช้กับกรณีที่อนุภาคเชื้อโรคภายในพื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นของคนที่สูงสุดที่เป็นไปได้เมื่อปริมาณการระบายอากาศมีค่าจำกัด โดยค่าความคลาดเคลื่อนของสถานการณ์การติดเชื้อจริงเทียบกับค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่า 10.78% เพียงเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ แบบจำลองนี้สามารถกำหนดระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่และกำหนดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยกำหนดเป็นเวลา 1–3 ชั่วโมง ความเสี่ยงไม่เกิน 0.01–0.05 พบว่า ในสำนักงานเมื่อคนอยู่ในพื้นที่นานขึ้นจาก 1 เป็น 2 ชั่วโมง และจาก 2 เป็น 3 ชั่วโมง จำนวนคนที่สูงสุดที่เป็นไปได้จะลดลงเฉลี่ย 66.63% และ 51.64% ตามลำดับ และร้านอาหารจะลดลงเฉลี่ย 61.07% และ 25.83% ตามลำดับ แต่หากยอมรับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นได้ ทุกพื้นที่จะสามารถรับคนได้มากขึ้น เมื่อคนอยู่ในพื้นที่เป็นระยะเวลานานถึง 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สัมผัสอนุภาคของเชื้อโรคนานที่สุดตามขอบเขตของงานวิจัยนี้ และกำหนดให้มีพื้นที่ที่สนใจมีค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.01 ซึ่งเป็นมาตรการที่เข้มงวดที่สุด โดยทั่วไปแล้วการอยู่ในที่มีเชื้อเป็นเวลานานจะทำให้มีโอกาสในการติดเชื้อสูง แต่เมื่อคนสวมหน้ากากอนามัยจะทำให้ทั้งสำนักงานและร้านอาหารสามารถรับคนได้เพิ่มขึ้น 550.00% และ 400.00% ตามลำดับเมื่อเทียบกับขณะไม่สวมใส่ เนื่องจากอนุภาคของเชื้อโรคที่แพร่จากผู้ติดเชื้อในอากาศมีค่าต่ำลง และการใส่หน้ากากอนามัยทำให้สามารถมีจำนวนคนในพื้นที่เพิ่มขึ้นได้ แต่ในทางปฏิบัติเป็นข้อจำกัดที่ทำได้ยากสำหรับร้านอาหารที่จำเป็นต้องถอดหน้ากากเมื่อรับประทานอาหารทำให้จำนวนคนที่เหมาะสมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ทั้งนี้แบบจำลองความเสี่ยงในการติดเชื้อยังคงมีข้อจำกัดเนื่องจากใช้สมมติฐานให้ผู้รับเชื้อทุกคนมีอัตราการหายใจเท่ากัน ไม่พิจารณาถึงความแข็งแรงของผู้รับเชื้อ และอากาศในห้องผสมกันอย่างสมบูรณ์ รวมถึงพิจารณาทุกคนในพื้นที่มีพฤติกรรมการไม่ใส่และใส่หน้ากากอนามัยเหมือนกัน ทำให้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากสถานการณ์จริงได้

การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการคำนวณหาความหนาแน่นของคนที่มากที่สุดที่เป็นไปได้โดยไม่ทำให้มีค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเกินกำหนดสามารถใช้กำหนดมาตรการป้องกันและควบคุมโรคติดต่อทางระบบทางเดินหายใจได้ เช่น การกำหนดความหนาแน่นของคนในพื้นที่ การกำหนดระยะเวลาเข้าใช้พื้นที่ การกำหนดมาตรการควบคุมการสวมใส่หน้ากากอนามัย เป็นต้น และเมื่อกำหนดให้อยู่ในพื้นที่ได้นานขึ้น ความหนาแน่นของคนที่สูงสุดที่สามารถอยู่ในพื้นที่ได้จะมีค่าน้อยลง ทั้งนี้หากสามารถยอมรับค่าความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นได้ในเวลาที่กำหนด ทุกพื้นที่จะสามารถรับคนได้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ รุ่นพระแสง ผู้สนับสนุนทุนการศึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนสำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

ASHRAE. 2013. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013 Ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.

Chen, W., Qian, H., Zhang, N., Liu, F., Liu, L., Li, Y. 2022. Extended short-range airborne transmission of respiratory infections. J. Hazard. Mater. 422: 126837. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126837

Gammaitoni, L., Nucci, M.C. 1997. Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures. Emerg. Infect. Dis. 3: 335-342. doi.org/10.3201/eid0303.970310

Ijaz, M.K., Sattar, S.A., Rubino, J.R., Nims, R.W., Gerba, C.P. 2020. Combating SARS-CoV-2: leveraging microbicidal experiences with other emerging/re-emerging viruses. PeerJ. doi.org/10.7717/peerj.9914

Liu, Z., Ma, S., Cao, G., Meng, C., He, B.J. 2018. Distribution characteristics, growth, reproduction and transmission modes and control strategies for microbial contamination in HVAC systems: A literature review. Energy Build. 177: 77-95. doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.050

Miller, S., Nazaroff, W., Jimenez, J., et al. 2021. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. Indoor air. 31: 314-323. doi.org/10.1111/ina.12751

Nicas, M. 1995. Respiratory protection and the risk of *Mycobacterium tuberculosis* infection. Am. J. Ind. Med. 27: 317-333. doi.org/10.1002/ajim.4700270302

Riley, E.C., Murphy, G., Riley, R.L. 1978. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. Am. J. Epidemiol. 107: 421-432. doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112560

Rim, D., Schiavon, S., Nazaroff, W.W. 2015. Energy and cost associated with ventilating office buildings in a tropical climate. PLoS ONE. 10. doi.org/10.1371/journal.pone.0122310

Stephens, B. 2013. HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases. In: NAFA Foundation Report. Illinois Institute of Technology, Chicago, United States of America.

Sun, C., Zhai, Z. 2020. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. Sustainable Cities and Society 62. doi.org/ 10.1016/j.scs.2020.102390

Tsuchihashi, Y., Yamagishi, T., Suzuki, M., et al. 2021. High attack rate of SARS-cov-2 infections during a bus tour in Japan. J. Travel Med. 2021: 1-4. doi.org/10.1093/jtm/taab111

WHO. 2021. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard. http://covid19.who.int, 30 August 2021.

WHO. 2021. Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?. http://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted, 29 August 2021.

WHO. 2021. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. World Health Organization. Geneva, Switzerland.

การศึกษาการอพยพหนีไฟสำหรับอาคารสูงและอาคารสูงระฟ้าเพื่อสร้างเครื่องมือคำนวณเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟด้วยโปรแกรมจำลองการอพยพ

A study of fire evacuation for tall and supertall buildings to create a calculation tool of fire evacuation movement time using evacuation simulation program

ชวนัฏฐ์ อาญาพิทักษ์[a,*], **เฉลิมพล เปล่งสะอาด**[b]

Chawanat Ayaphitak[a,*], Chalearmpol Plengsaard[b]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Fire Protection Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chawanat.a@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟภายในอาคารสูงและอาคารสูงระฟ้า ได้แก่ ความสูงของอาคาร ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้น จำนวนผู้ใช้บันไดและขนาดความกว้างของบันไดด้วยโปรแกรม Pathfinder และนำผลไปเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์การไหลขั้นแรก พบว่า ความสูงของอาคารและระยะห่างระหว่างชั้นเป็นปัจจัยย่อย แตกต่างเพียง 0.49% และ 2.6% ตามลำดับ ปัจจัยหลักคือจำนวนผู้ใช้บันไดและขนาดความกว้างบันได และผลจำลองระยะเวลาที่ได้จากโปรแกรม Pathfinder จะเร็วกว่าผลจากวิธีการวิเคราะห์การไหลสำหรับบันไดที่กว้างตั้งแต่ 1.25 เมตรขึ้นไป เมื่อใช้ MATLAB สร้างเครื่องมือกราฟพื้นผิวและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟต่อจำนวนผู้ใช้บันไดและขนาดความกว้างบันได ได้กราฟและสมการที่มีค่า R-square 99.96%
คำสำคัญ: การอพยพหนีไฟ, เครื่องมือคำนวณเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ, อาคารสูง, อาคารสูงระฟ้า

บทคัดย่อ

This research studies the factors, which are the height of the building, the floor to floor distance, the number of occupants using the staircase and the stair width, affecting evacuation movement time for tall and supertall buildings by Pathfinder program. The Pathfinder result is also compared with that of the first-order model hydraulic analogy evacuation calculation method. The results of the case studies show that the height of the building and the floor to floor distance are not the dominant factor (affecting with difference 0.49% and 2.6%). The evacuation movement time is mainly affected by the number of occupants using the staircase and the stair width. The pathfinder result is faster than the hydraulic analogy method for stair with 1.25 m or more width. The researcher uses MATLAB to create a surface graph and a polynomial equation as the alternative calculation tools of evacuation movement time. The equation showing a relationship between the evacuation movement time, the number of occupants using the staircase, and the stair width with R-square 99.96%.
Keywords: Fire evacuation, Super tall building, Tall building, Tools of fire evacuation movement time

คำนำ

CTBUH (2022) ระบุว่าการก่อสร้างอาคารที่สูงตั้งแต่ 150 เมตรขึ้นไปในประเทศไทยมีมากขึ้น ระบบเส้นทางหนีไฟภายในอาคารสูงและสูงระฟ้าที่เพียงพอจึงเป็นระบบที่สำคัญเพราะผู้ใช้อาคารไม่สามารถได้รับการช่วยเหลือจากภายนอกอาคาร เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ของทีมกู้ภัยที่มีความสูงน้อยกว่าอาคาร

การออกแบบระบบเส้นทางหนีไฟตามวิธี Prescriptive-based design ตามมาตรฐาน NFPA101 (NFPA, 2017) และมาตรฐานป้องกันอัคคีภัย (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2551) ที่อ้างอิงจำนวนคนต่อชั้นเป็นหลักอาจไม่เพียงพอสำหรับอาคารที่มีความสูงมาก ดังตัวอย่างใน Fig. 1 กรณีอาคารสำนักงาน หรือโรงแรมที่มีจำนวน 2 บันได มีจำนวนความสูงและชั้นต่างกันมาก แต่จำนวนคนใช้งานต่อชั้น 500 คนเท่ากัน หากออกแบบตามวิธี Prescriptive-based design ด้วยสมการ Enhance formula ตาม NFPA101 (NFPA, 2017) โดยจะได้ความต้องการขั้นต่ำของบันไดหนีไฟที่มีขนาดความกว้าง 1.70 เมตรเท่ากันสำหรับจำนวนอพยพต่อบันได 250 คน ซึ่งในกรณีที่อาคารมีความสูงมากหรือมีจำนวนผู้ใช้อาคารมาก จำนวนบันไดและความกว้างอาจไม่เพียงพอต่อการอพยพคนออกจากอาคารก่อนมีความสูญเสียหรืออาคารวิบัติจากเพลิงไหม้

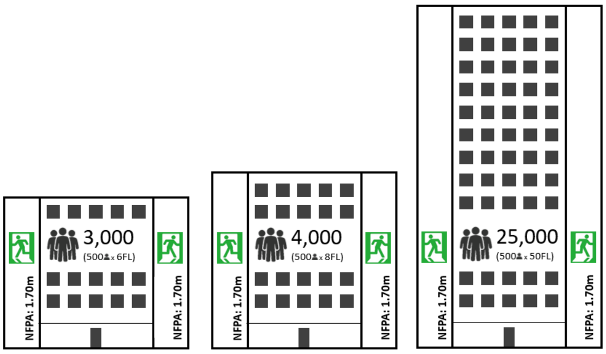


Fig. 1 The minimum stair width following the prescriptive-based design of NFPA standard

จึงควรใช้การคำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟประกอบเพื่อยืนยันสมรรถนะของระบบเส้นทางหนีไฟว่ามีความเหมาะสมกับอาคารสูง สอดคล้องกับกฎกระทรวงควบคุมอาคาร ฉบับ 33 (2535) ที่กำหนดให้แสดงให้เห็นว่าระบบเส้นทางหนีไฟสามารถอพยพคนออกจากอาคารได้ภายในเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง การคำนวณทั่วไปจะใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลแบบขั้นแรก แต่หากต้องการผลการคำนวณที่ละเอียดมากขึ้น จะมีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อน เช่น ต้องคำนวณความเร็วการเคลื่อนใหม่ทุกจุดที่มีการรวมตัวกันของผู้อพยพจาก 2 ทิศทาง ผู้คำนวณต้องมีความเข้าใจขั้นตอนการคำนวณโดยละเอียด และหากใช้โปรแกรมจำลองการอพยพจะมีข้อดีเรื่องความแม่นยำของการคำนวณและคำนวณความเร็วของผู้อพยพตลอดเวลาตลอด แต่มีค่าใช้จ่ายสูง จึงไม่เป็นที่นิยมเพราะการคำนวณด้วยวิธีการวิเคราะห์การไหลแบบขั้นแรกเพียงพอต่อการขออนุญาตและคิดว่ามีผลการคำนวณระยะเวลาเท่ากัน

จากการตรวจเอกสารทำให้รู้ขีดบน-ล่างของระบบเส้นทางหนีไฟและลักษณะร่วมของอาคารสูงในประเทศไทยสามารถนำข้อมูลมาใช้สร้างกรณีศึกษา และจากงานวิจัยต่างๆ ผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม Pathfinder ในการสร้างแบบจำลองระบบเส้นทางหนีไฟเพื่อศึกษาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียกับวิธีการวิเคราะห์การไหลแบบขั้นแรกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

และนำผลที่ได้ไปสร้างเครื่องมือหรือสูตรคำนวณเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟเบื้องต้นที่สามารถใช้งานง่ายและรวดเร็วเพื่อเป็นทางเลือกในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเส้นทางหนีไฟในอาคารสูงและอาคารสูงระฟ้าแทนวิธีการคำนวณเต็มรูปแบบที่ซับซ้อนหรือการใช้โปรแกรมจำลองที่ต้องมีความเชี่ยวชาญและค่าใช้จ่ายสูง

การตรวจเอกสาร

Wikipedia, 2022) ระบุข้อมูลอาคารสูงและสูงระฟ้าในประเทศไทย 100 อันดับแรกมีกิจกรรมการใช้งานเป็นอาคารสำนักงาน โรงแรมและอาคารอยู่อาศัยรวม มีความสูงอาคาร 165 ถึง 318 เมตร พื้นที่ต่อชั้นประมาณ 1,000–3,000 ตารางเมตร มีจำนวนความสูงต่อชั้นเฉลี่ย 4.1 เมตร (ประมาณจากความสูงอาคารและจำนวนชั้น)

กฎกระทรวงควบคุมอาคาร ฉบับ 33 (2535) และกฎหมายฉบับอื่นๆที่เกี่ยวข้องกำหนดขนาดความต้องการขั้นต่ำของระบบเส้นทางหนีไฟ เช่น ระยะห่างระหว่างบันไดหนีไฟวัดตามแนวทางเดินต้องไม่เกิน 60 เมตร ประตูหนีไฟมีความกว้างสุทธิ 0.9 เมตร ความกว้างทางเดินไม่น้อยกว่า 1.50 เมตรสำหรับอาคารสาธารณะ และเทศบัญญัติกรุงเทพมหานคร (2544) กำหนดขนาดบันไดหนีไฟต้องไม่เกิน 1.50 เมตร ในส่วนของมาตรฐาน NFPA101 (2017) และมาตรฐานป้องกันอัคคีภัย (2551) ระบุความต้องการเพิ่มเติมจากกฎหมายคือบันไดหนีไฟต้องมีราวมือจับ 2 ข้าง ทำให้ความกว้างบันไดเมื่อรวมระยะจากการติดราวมือจับมีค่าประมาณ 1.10 ถึง 1.70 เมตร และขั้นบันไดต้องมีลูกตั้งสูงไม่เกิน 18 เซนติเมตร และลูกนอนกว้างไม่น้อยกว่า 28 เซนติเมตร

วิธีการคำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟตามวิธีการวิเคราะห์การไหลตาม SFPE handbook (Hurley et al., 2016) จะพิจารณาว่าคนเดินทางไปตามเส้นทางจนถึงภายนอกอาคารด้วยสมการความเร็วและขนาดเส้นทางหนีไฟสำหรับการวิเคราะห์ขั้นแรก (First order hydraulic analogy model) จะมีการกำหนดสมมติฐานเพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณ เช่น ผู้ใช้บันไดในแต่ละชั้นมารวมตัวกันที่ช่องทางเดิน (Corridor) หน้าประตูหนีไฟ เริ่มอพยพพร้อมกันตั้งแต่วินาทีที่ 0 การอพยพเป็นแบบสมดุล (Optimum balance) และไม่คำนึงถึงผลกระทบจากความเหนื่อยล้าระหว่างการอพยพ อายุ และสุขภาพของผู้อพยพ ผู้วิจัยจึงใช้สมมติฐานข้างต้นในในการตั้งค่าแบบจำลอง

โปรแกรมจำลองการอพยพ Pathfinder ถูกใช้โดยแพร่หลาย เช่น Zang (2021) ใช้ศึกษาการอพยพหนีไฟภายในอาคารสูงโดยเปรียบเทียบด้วยแบบจำลอง 2 รูปแบบ คือการอพยพแบบมีสิ่งกีดขวาง (Obstacle model) และการอพยพแบบไร้สิ่งกีดขวาง (Obstacle-free model) Qin (2020) ศึกษาการอพยพหนีไฟในกรณีเกิดเหตุเพลิงไหม้ที่ชานชาลาในสถานีรถไฟใต้ดินซึ่งมีคนใช้งานจำนวนมาก นอกจากนี้ นรินทร์ (2559) ระบุว่าโปรแกรม Pathfinder สามารถเลือกรูปแบบการจำลองได้ทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ SFPE และ Steering โดยรูปแบบ Steering จะเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับความจริงมากกว่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ Pathfinder รูปแบบ Steering ในการทำวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการและเงื่อนไขขอบเขตการจำลอง

จากการศึกษาเอกสารทำให้กำหนดรูปแบบพื้นฐานของแบบจำลองระบบบันไดหนีไฟแต่ละชั้นในโปรแกรม Pathfinder รูปแบบ Steering สอดคล้องกับความต้องการตามกฎหมายไทยและมาตรฐานใน Fig. 2 และจำนวนผู้ใช้บันไดน้อยสุด-มากสุด คำนวณจาก Table 1 และเพื่อลดหลั่นการลู่เข้าสู่คำตอบของงานวิจัย ผู้วิจัยจะศึกษาปัจจัยเฉพาะช่วงที่เป็นที่นิยมในการก่อสร้างอาคารสูงและสูงระฟ้าในอาคารสูง 150 ถึง 400 เมตร (รองรับอาคารที่มีแนวโน้มสูงขึ้นในอนาคต) ตาม Fig. 3 และ Fig. 4 โดยใช้ขนาดประตูหนีไฟ 0.9 เมตร ที่รองรับคนได้ 180 คน (5 มม.ต่อคน) ขนาดเดียว ตามเกณฑ์

ขั้นต่ำตามกฎหมายและประตูจะสัมพันธ์กับผู้ใช้แต่ละชั้นเท่านั้นไม่มีผลบังคับไปชั้นอื่นๆ แตกต่างจากความกว้างบันไดที่มาตรฐานระบุให้ความกว้างต้องไม่ลดลงจากชั้นที่มีคนใช้งานมากที่สุดตลอดความสูงของบันไดจนถึงจุดปล่อยออก

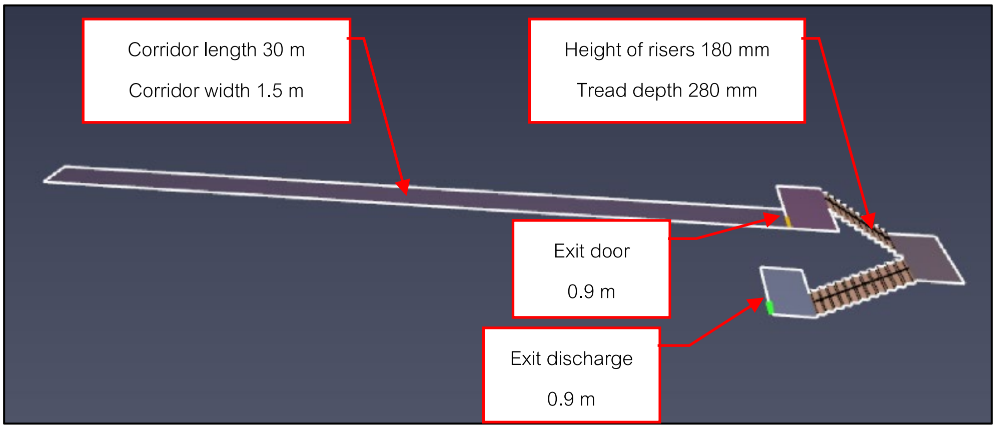


Fig. 2 The Pathfinder model dimension of means of egress system in each floor

Table 1 The method to calculate the occupant load per stairs for building with 2 stairs and 4.1 meters floor to floor distance following NFPA standard

Floor area (sq.m.)	Use of area	Occupant load factor (sq.m. per person)	Occupant load per floor (person)	Occupant load per stairs per floor (person)	Number of the floor (floor)	Occupant load per stairs (person)
1,000	Business	14	54	27	37	999 (Min)
3,000	Residentials	18.6	216	108	98	10,584 (Max)

นอกจากนี้ยังนำสมมติฐานในการอพยพตามวิธีการวิเคราะห์การไหลขั้นแรก ได้แก่ ผู้ใช้บันไดในแต่ละชั้นมารวมตัวกันที่ช่องทางเดิน (Corridor) เริ่มอพยพพร้อมกัน การอพยพเป็นแบบสมดุล และไม่คำนึงถึงผลกระทบจากความเหนื่อยล้าระหว่างการอพยพ อายุ และสุขภาพของผู้อพยพ และนำค่าความเร็วและระยะห่างต่างๆ ตาม SFPE Handbook (Hurley et al., 2016) มาใช้ในการตั้งค่าแบบจำลองในโปรแกรม Pathfinder

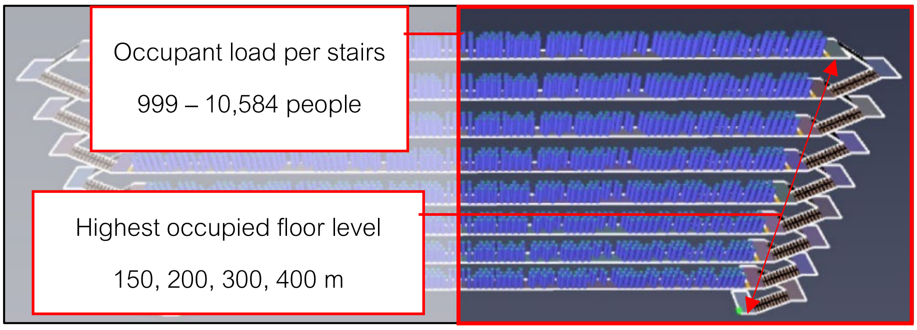


Fig. 3 The definition and research scope of the occupant load per stairs and the highest occupied floor level

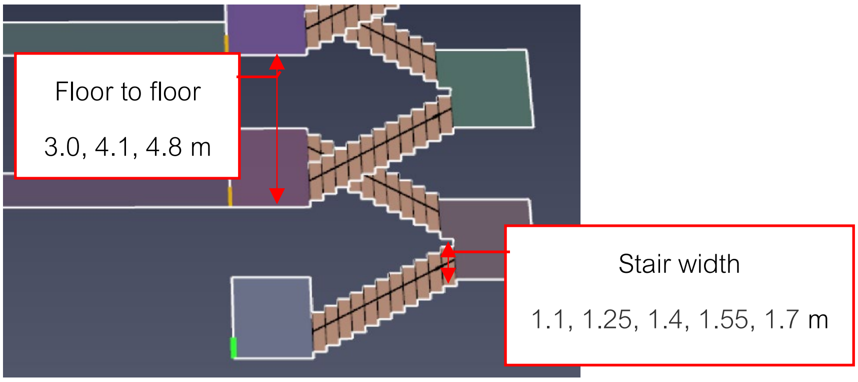


Fig. 4 The definition and research scope of the floor to floor distance and the stair width

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากเงื่อนไขขอบเขตการจำลอง กำหนดเป็นกรณีศึกษาด้วยโปรแกรม Pathfinder ได้ทั้งหมด 276 กรณี และแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วนย่อยเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟได้ดังต่อไปนี้

การศึกษาความสัมพันธ์ของความสูงอาคารจากพื้นถึงที่มีผู้ใช้อาคารสูงสุดต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ

Table 2 The example results shown that the highest occupied floor level was not the dominant factor for the evacuation movement time

Case study	Occupant load per stairs (person)	Highest occupied floor level (m)	Floor to floor (m)	Stair width (m)	Evacuation movement time (s)
9	1,998	300	4.1	1.7	1,537.5
96	1,998	150	4.1	1.7	1,530.8
37	5,292	200	4.1	1.4	4,339
54	5,292	400	4.1	1.4	4,324
73	5,292	200	4.1	1.1	7,259
90	5,292	400	4.1	1.1	7,265.5

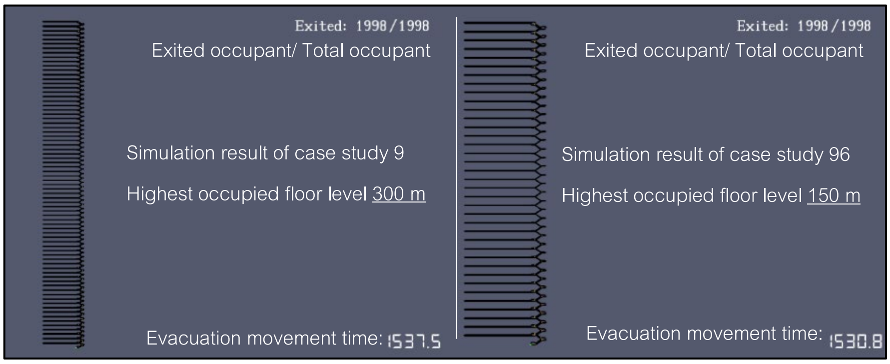


Fig. 5 The comparison between the evacuation movement time of the two case studies with the different heights

จากผลการจำลองการอพยพด้วยโปรแกรม Pathfinder สามารถพิจารณาตัวอย่างกรณีศึกษาใน Table 2 และ Fig. 5 ที่มีจำนวนผู้ใช้บันได ระยะห่างระหว่างพื้นแต่ละชั้น และขนาดความกว้างบันไดเท่ากัน แต่ความสูงอาคารไม่เท่ากัน พบว่าระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟมีค่าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างมากสุดที่กรณี 9 และ 96 คิดเป็น 0.49% สามารถสรุปได้ว่าความสูงของอาคารไม่เป็นปัจจัยหลักต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ

การศึกษาความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างพื้นแต่ละชั้นต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ

Table 3 The example results shown that the floor to floor distance was not the dominant factor for the evacuation movement time

Occupant load per stairs (person)	Stair width (m)	Evacuation movement time (s)				
		Floor to floor 4.1 m	Floor to floor 3.0 m	% of difference to 4.1 m F-F	Floor to floor 4.8 m	% of difference to 4.1 m F-F
999	1.7	779.3	793.8	1.9	785.3	0.8
5,292	1.55	4,181.5	4,130.0	1.2	4,178.3	0.1
10,584	1.4	8,650.3	8,805	1.8	8,663.0	0.1
3,969	1.25	4,171.3	4,124.8	1.1	4,172.8	0.0
7,992	1.1	10,963.5	11,120.8	1.4	11,246.5	2.6

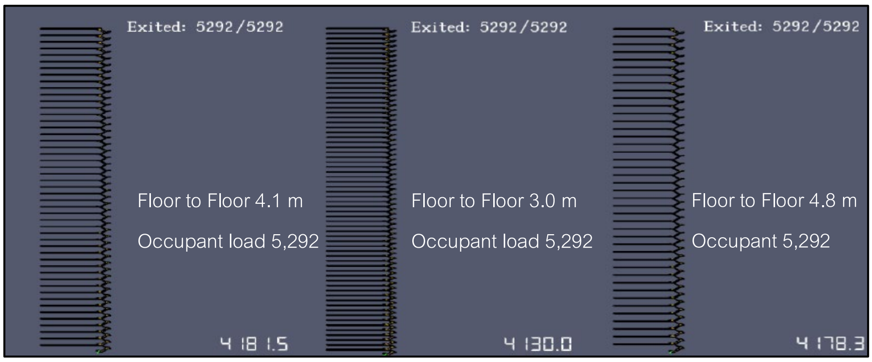


Fig. 6 The comparison among the evacuation movement time of the case studies with the different floor to floor distance

จากตัวอย่างผลการจำลองการอพยพใน Table 3 และ Fig. 6 แสดงให้เห็นว่ากรณีศึกษาที่จำนวนผู้ใช้บันไดเท่ากัน แต่ระยะห่างระหว่างพื้นแต่ละชั้น จำนวนชั้นและจำนวนผู้ใช้บันไดต่อชั้นไม่เท่ากัน ยังคงมีระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างมากสุด คิดเป็น 2.6% จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างพื้นแต่ละชั้น จำนวนชั้นและจำนวนผู้ใช้บันไดต่อชั้นไม่เป็นปัจจัยหลักในการคำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้กรณีศึกษาที่มีระยะห่างระหว่างชั้น 4.1 เมตร เป็นเกณฑ์ในการศึกษาปัจจัยต่อไป

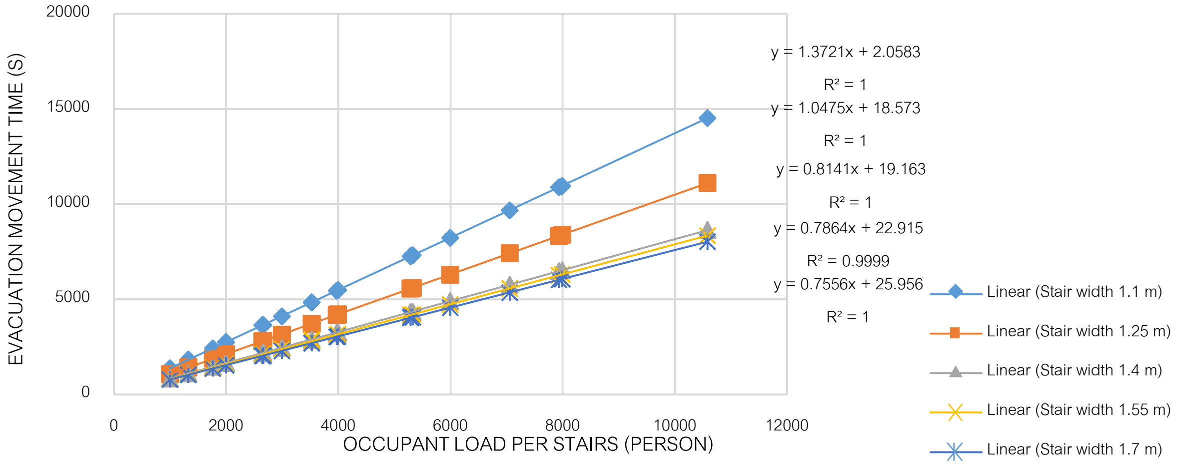


Fig. 7 The relation of the occupant load per stairs and the stair width affecting the evacuation movement time

จาก Fig. 7 แสดงให้เห็นว่าจำนวนผู้ใช้บันไดและความกว้างบันไดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ ผู้วิจัยจึงเลือกตัวแปรข้างต้นในการหาสมการความสัมพันธ์และสร้างกราฟพื้นผิว

Table 4 The example results shown the comparison between the exit rate at the exit discharge in the Pathfinder model and the minimum calculated flow following first-order hydraulic analogy of SFPE handbook

Case study	Occupant load per stairs (person)	Stair width (m)	Evacuation movement time, Pathfinder	Evacuation movement time, SFPE	Exit rate at exit discharge (person/s), Pathfinder	Minimum calculated flow (Fc) (person/s), SFPE
13	10,584	1.7	8,017.5	13,434.62	1.32	0.54
31	10,584	1.55	8,352.3	13,434.06	1.27	0.54
49	10,584	1.4	8,650.3	13,433.51	1.22	0.54
67	10,584	1.25	11,105.3	13,432.95	0.95	0.54
85	10,584	1.1	14,529.5	13,432.40	0.73	0.54

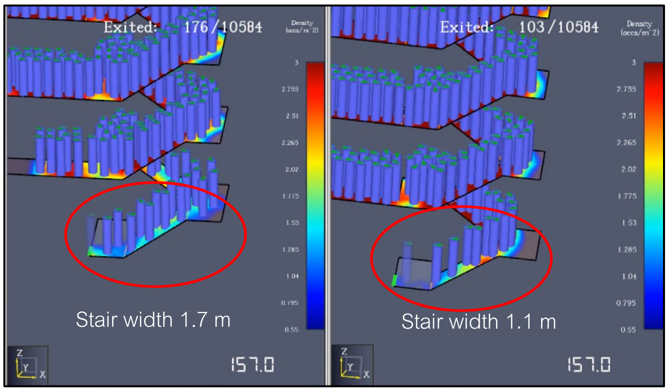


Fig. 8 The Pathfinder model shown that occupants exited faster using wider stairs

นำผลการจำลองการอพยพหนีไฟด้วยโปรแกรม Pathfinder ไปเปรียบเทียบกับวิธีวิเคราะห์การไหลแบบ First-order hydraulic analogy model ตาม SFPE handbook โดยมีวิธีการคำนวณโดยสรุป ดังต่อไปนี้

1.หาขนาดความกว้างที่ใช้หนีไฟ (Effective width) ของบันไดหนีไฟและประตูหนีไฟ

2.คำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้บันไดโดยใช้ความหนา 1.88 คนต่อตร.ม. ที่ทำความเร็วมากที่สุด

3.หาอัตราการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดในระบบเส้นทางหนีไฟเป็นเกณฑ์ในการคำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพ ได้ผลตามตัวอย่างใน Table 4 ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้โปรแกรม Pathfinder สำหรับกรณีศึกษาที่มีบันไดกว้างกว่าหรือเท่ากับ 1.25 เมตร จะมีผลการจำลองระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟน้อยกว่าวิธีการวิเคราะห์การไหลที่จะอ้างอิงตามอัตราการเคลื่อนที่ (Fc) ที่น้อยที่สุดในระบบเส้นทางหนีไฟ ทำให้ความกว้างของบันไดที่เพิ่มขึ้นแทบไม่ส่งผลต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ ทำให้จำนวนผู้ใช้อาคารที่ระบบเส้นทางหนีไฟรองรับได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

Fig. 8 วิดีโอการจำลองการอพยพจากโปรแกรม Pathfinder แสดงให้เห็นการเคลื่อนของผู้ใช้บันไดว่า กรณีศึกษาที่มีบันไดกว้าง 1.7 เมตรจะสามารถลำเลียงผู้ใช้บันไดไปถึงประตูที่จุดปล่อยออกได้ดีกว่า ทำให้ความถี่ของผู้อพยพที่เคลื่อนผ่านประตูที่จุดปล่อยออกมากกว่ากรณีศึกษาที่บันไดกว้าง 1.1 เมตร

เมื่อนำผลการจำลองจำนวน 120 เฉพาะกรณีศึกษาที่มีระยะห่างระหว่างพื้นแต่ละชั้น 4.1 เมตร ไปหาความสัมพันธ์ด้วยฟังก์ชัน CFTOOL ภายในโปรแกรม MATLAB จะได้เครื่องมือการคำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ เป็นกราฟพื้นผิวและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟ (f(x,y)) ต่อจำนวนผู้ใช้บันได (x) และขนาดความกว้างบันได (y) จะได้ความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลตาม Equation 1 ที่มีค่า R-square: 0.9996 และ Adjusted R-square: 0.9996 ซึ่งมากกว่า 95%

$$f(x,y) = 12130 + 7.216\cdot x - 28120\cdot y - 8.085\cdot x\cdot y + 21400\cdot y^2 + 2.52\cdot x\cdot y^2 - 5318\cdot y^3 \quad (1)$$

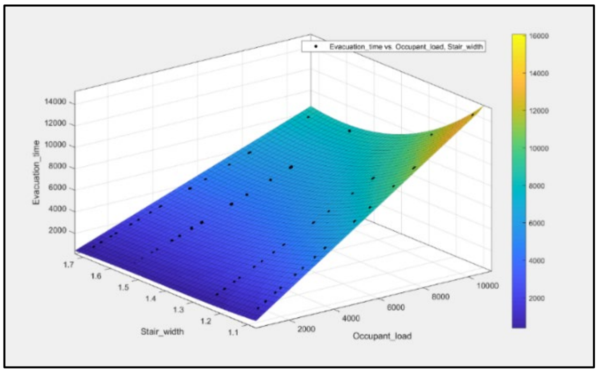


Fig. 9 The 3D surface graph by MATLAB was used as a calculation tool of fire evacuation movement time

สรุป

1. จำนวนผู้ใช้บันไดและขนาดความกว้างบันไดเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟสำหรับอาคารสูงและสูงระฟ้าที่มีลักษณะอาคารและสมมติฐานตามขอบเขตของงานวิจัย
2. Pathfinder เป็นทางเลือกที่น่าสนใจที่จะช่วยลดระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟสำหรับอาคารที่มีขนาดบันไดกว้าง ทำให้อาคารสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บันไดมากขึ้น ซึ่งอาจคุ้มค่าต่อการลงทุนซื้อลิขสิทธิ์ในการใช้โปรแกรมแทนการคำนวณด้วยวิธีการวิเคราะห์การไหลแบบ First-order hydraulic analogy
3. สามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์และกราฟพื้นผิวภายในโปรแกรม MATLAB เพื่อเป็นเครื่องมือทางเลือกในการประเมินระยะเวลาการอพยพเบื้องต้นที่ใช้งานได้ง่าย โดยมีเงื่อนไขการใช้งานคือ
    - ใช้สำหรับอาคารที่มีขนาดและจำนวนภายในช่วงเฉพาะตาม Fig. 2 Fig. 3 และ Fig. 4
    - ระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพอาจเพิ่มขึ้นจากสมมติฐานการอพยพที่เปลี่ยนไป เช่น อายุหรือสุขภาพของผู้ใช้บันไดจริง หรือการที่ต้องจัดวางตำแหน่งบันได การใช้เสียงประกาศ การใช้ระบบ CCTVและแนวทางการอพยพที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดอพยพแบบสมดุล (Optimum balance) ได้จริง
    - ในกรณีที่ใช้สมการและกราฟพื้นผิว ควรเผื่อระยะเวลาเคลื่อนที่อพยพหนีไฟที่อาจเพิ่มขึ้นจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ความสูงชั้นแรกที่มีผู้ใช้อาคาร และกลยุทธ์การอพยพหนีไฟ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพระอาจารย์ที่ปรึกษา ครอบครัว อาจารย์สาขาวิชา และบริษัท ไฟร์แอนด์ไลฟ์เซฟตี้สเปเชียลลิสต์ จำกัด

เอกสารอ้างอิง

กฎกระทรวงฉบับที่ 33. 2535. ออกตามความในกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร พ.ศ. 25225

กรุงเทพมหานคร. 2544. ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. 2551. มาตรฐานการป้องกันอัคคีภัย. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

นรินทร์ บุญประเสริฐ. 2559. การเปรียบเทียบเวลาอพยพในอาคารสูงระหว่างวิธี SFPE และ Steering ด้วยโปรแกรม Pathfinder. ใน: รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

CTBUH. 2022. Building completions timeline in Thailand. The Council on Tall Buildings and Urban Habitat. https://www.skyscrapercenter.com/country/thailand/, 18 October 2022.

Hurley, M.J., Gottuk, D., HallJr., J.R., et al. 2016. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed. Springer, New York, NY, USA.

Qin, J., Liu, C., Huang, Q. 2020. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder. Case Studies in Thermal Engineering 21: 100677. doi.org/10.1016/j.csite.2020.100677

NFPA. 2017. NFPA 101, Life Safety Code Handbook, Edition 2018, National Fire Protection Association. USA.

Wikipedia. 2022. List of tallest structures in Thailand. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_structures _in_Thailand/, 23 June 2022.

Zang, Y., Mei, Q., Liu, S. 2021. Evacuation simulation of a high-rise teaching building considering the influence of obstacles. Simulation Modelling Practice and Theory 112: 102354.

การเปรียบเทียบการจำลองอพยพหนีไฟด้วยโปรแกรม Pathfinder ระหว่างสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ชนิดไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ และระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ชนิดระบุตำแหน่งได้ ในอุตสาหกรรมพลาสติกแห่งหนึ่ง

A Comparison of fire evacuation between hardwire and multiplex fire alarm system of a plastic industry by using Path Finder

พรรษมน นิถากรณ์[a] , **เอกไท วิโรจน์สกุลชัย**[b,*]

Passamon Nithakhon[a], Ekathai Wirojsakunchai [b,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengeka@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาในรูปแบบการจำลองการอพยพหนีไฟ โดยใช้โปรแกรม Path finder ในโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง โดยได้จำลองจากกรณีศึกษาที่เกิดขึ้นจริง 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 ประตูหนีไฟ , บันไดหนีไฟ สามารถใช้งานได้ตามปกติ ใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Hardwire ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับควัน กรณีที่ 2 ประตูหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่บันไดหนีไฟที่ใกล้ที่สุดบริเวณชั้น 2 ของอาคารผลิตไม่สามารถใช้งานได้ ใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex กรณีที่ 3 บันไดหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่ประตูทางออกนอกอาคารคลีนรูม2 ไม่สามารถใช้งานได้ ใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex กรณีที่ 4 ประตูหนีไฟ , บันไดหนีไฟ สามารถใช้งานได้ตามปกติ ใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex ผลการจำลองพบว่า กรณีที่มีการติดตั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Hardwire กรณีที่ 1 ใช้เวลาการอพยพ 952 วินาที ระยะเวลาไม่สอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด กรณีที่มีการติดตั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex กรณีที่ 2 และ 3 ติดตั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex ใช้เวลาการอพยพ 428 วินาที และ 309 วินาที ตามลำดับไม่สอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด แต่ในส่วนของกรณีที่ 4 ติดตั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex เช่นเดียวกัน ใช้เวลาการอพยพ 279 วินาที ระยะเวลาสอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด

คำสำคัญ: การอพยพหนีไฟ, ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้, โรงงานอุตสาหกรรม

Abstract

This study is focused on a fire evacuation simulation in an industrial factory. It was simulated from real case studies using the Path finder program. The simulated environment are as follows: Case 1 fire doors and fire escape stairs can be used normally, with a hardwired fire alarm system, but no smoke detectors are installed. The fire exit door and the fire escape staircase can be used normally. In Case 2 by using a Multiplex fire alarm system, the fire door is normally operated, with the nearest fire escape ladder, located on the second floor of the production building inoperable. In Case 3 by using of a multiplex fire alarm system, the fire escape stairs can be used normally, but the exit door outside the clean room building 2 is not available. Case 4 employs the use of a multiplex fire alarm system, and the environment is the same as Case 1. The simulation results show that by using a hardwire fire alarm system, Case 1 takes 952 seconds of evacuation time, which is in violation of the regulation. By using a multiplex fire alarm system as seen in case 2, it takes the evacuation time only 279 seconds which is in accordance with the regulation. However, in cases 3 and 4 where multiplex fire alarm systems are also installed, the evacuation times are 428 seconds and 309 seconds, respectively, which exceed the legal limit.

Keywords: Fire alarm system, Fire evacuation, Industrial factory

คำนำ

เพลิงไหม้หรืออัคคีภัยเป็นเหตุการณ์ฉุกเฉิน ที่สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วย่อมนำมาซึ่งความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สิน โดยจากสถิติการเกิดอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2563 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2563) มีจำนวนสถานประกอบการณ์ที่เกิดอัคคีภัยทั้งหมด 42 ครั้ง โดยกลุ่มโรงงานที่ประกอบกิจการเกี่ยวกับ พลาสติก โฟม กระดาษ ยาง มีสถิติมาเป็นอันดับ 1 เนื่องจากมีการเกิดอัคคีภัยจำนวน 14 ครั้ง ในปี พ.ศ. 2563 บริษัทที่ประกอบกิจการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรสาคร มีการดำเนินการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับบรรจุน้ำมันหล่อลื่น นม สินค้าอุปโภคและบริโภค สารเคมีทางการเกษตร และชิ้นส่วนพลาสติกสำหรับยานยนต์ ประกอบไปด้วย 5 อาคาร แบ่งเป็นพื้นที่ใช้สอยในส่วนของสำนักงาน พื้นที่การผลิต พื้นที่สนับสนุน และพื้นที่คลัง จัดเป็นโรงงานที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยสูง ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงาน พ.ศ. 2552 จำเป็นที่จะต้องจัดให้มีระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ที่ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ตรวจจับ และอุปกรณ์แจ้งเหตุเพลิงไหม้ให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับ แต่เนื่องด้วยระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ที่ทางสถานประกอบการใช้งานอยู่ในปัจจุบันนั้น มีการออกแบบติดตั้งและใช้งานไม่เป็นไปตามมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับ เนื่องจากในส่วนของแต่ละอาคารที่ดำเนินการก่อสร้างขึ้นมานั้นมีการติดตั้ง ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบ่งแยกเป็นในส่วนของแต่ละอาคาร ไม่มีการเชื่อมต่อระบบถึงกัน และไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับควัน ความร้อน หรือเปลวไฟที่ทำงานโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้เมื่อมีเหตุการณ์เพลิงไหม้เกิดขึ้น ทำให้พนักงานที่ปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่การทำงาน และเจ้าหน้าที่ผู้ที่เกี่ยวข้อง รับทราบการแจ้งเหตุได้ล่าช้า เกิดความสูญเสียและความเสียหาย กับชีวิตและทรัพย์สินในสถานประกอบการ

จากการตรวจเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง หลักของเส้นทางการอพยพหนีไฟต้องจัดให้มีเส้นทางปลอดภัย และต้องสามารถอพยพผู้คนที่อยู่ในพื้นที่ออกจากอาคารให้หมดก่อนที่จะเกิดควันไฟ ความร้อนในปริมาณมากจนถึงระดับที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้อพยพ ซึ่งประกอบไปด้วย เส้นทางที่นำไปสู่ทางออกหนีไฟ, ทางออกหนีไฟ (บันไดหนีไฟ/ประตูหนีไฟ), จุดปล่อยออกของเส้นทางหนีไฟจากจุดใดๆ ของพื้นที่ไปยังพื้นที่ปลอดภัยภายนอกอาคาร (มาตรฐานป้องกันอัคคีภัยในประเทศญี่ปุ่น 2546) เวลาที่ผู้ใช้อาคารโรงงานใช้ในการอพยพออกมาจากอาคารสู่บริเวณ ที่ปลอดภัย (pre-evacuation time และ movement time: RSET) กระทรวงแรงงาน (2555) ตามที่กฎหมายกำหนดได้แก่ 5 นาที เวลาการอพยพหนีไฟไปยังพื้นที่ที่มีความปลอดภัยขึ้นอยู่กับ 4 องค์ประกอบซึ่งมีอิทธิพลต่อการอพยพหนีไฟ ลักษณะทางกายภาพและพฤติกรรมของผู้ที่อยู่ภายในอาคารโรงงาน (Guanquan, 2012) โดยต้องอาศัยการออกแบบระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ ซึ่งส่วนประกอบ และการทำงานของระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ (ชฎาพร, 2556) ส่วนประกอบหลักๆ ของระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ (1) อุปกรณ์เริ่ม/รับสัญญาณ (2) อุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลการแจ้งเหตุเพลิงไหม้ (3) อุปกรณ์การแจ้งเหตุการณ์เกิดเพลิงไหม้ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์แจ้งเหตุชนิดต่าง ๆซึ่งต้องอาศัยการทำงานร่วมกันทั้งของอุปกรณ์ 3 ส่วน การออกแบบส่วนใหญ่ก็จะคำนึงถึงสภาพพื้นที่และรูปแบบโครงสร้างอาคาร และวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ดังนั้นการออกแบบ ติดตั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกตัวอุปกรณ์ของระบบให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ และให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลยอมรับ ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบ่งชนิดของระบบออกเป็น 2 ชนิด (อารุญ, 2558) คือ ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ชนิดไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ (Hard-wire) และ ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ชนิดระบุตำแหน่งได้ (Multiplex) ซึ่งการที่จะสามารถศึกษาการอพยพหนีไฟที่มีประสิทธิภาพได้ จะต้องจำลองการอพยพหนีไฟเพื่อทราบถึงพฤติกรรมการอพยพและเวลาที่ใช้ในการอพยพหนีไฟ โดยใช้โปรแกรม Pathfinder เพื่อ ออกแบบและวิเคราะห์การจำลองการอพยพ และการศึกษาความแออัด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของภาพที่สมจริง ดังนั้นจึงทำให้ประหยัดเวลาและทำให้มั่นใจว่าได้ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ เพื่อประเมิน

ระดับความปลอดภัยในชีวิตสามารถแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบที่ชัดเจนและมีประสิทธิภาพที่สามารถทำให้เข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยการสร้างวิดีโอแสดงการเคลื่อนไหวทำให้เข้าใจได้ดีที่สุดด้วยการมองเห็น และวิดีโอสามารถระบุปัญหาการจราจรหรืออันตรายได้อย่างรวดเร็ว (Engineering, 2014)

ปัจจุบันก็มีการศึกษาวิจัยทางวิศวกกรมศาสตร์และสาขาที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับ การจำลองการอพยพหนีไฟโดยใช้โปรแกรม Pathfinder เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงเส้นทางการอพยพหนีไฟ (อภิชัย, 2561) จำลองการอพยพหนีไฟในอาคารโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ด้วยโปรแกรม Pathfinder มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางปรับปรุงเส้นทางการอพยพหนีไฟ ให้สอดคล้องกับกฎหมาย และเกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร โดยศึกษาการเลือกประตูเพื่อใช้เป็นประตูในการอพยพหนีไฟเพิ่มเติมเพื่อลดความหนาแน่นของผู้อพยพ (นรินทร์, 2559) ได้ทำการจำลองอพยพหนีไฟของอาคารสูงที่มีพื้นที่ครอบครองหลากหลายประเภท โดยใช้โปรแกรม pathfinder เพื่อหาเวลาในการอพยพของคนในอาคาร โดยมีการกำหนดเงื่อนไขกรณีต่างๆเพื่อครอบคลุมทุกเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในการอพยพหนีไฟ และทำการปรับปรุงเส้นทางหนีไฟเพื่อลดเวลาในการอพยพ (สุรพงษ์, 2556) งานวิจัยนี้นำเสนอผลการจำลองการอพยพหนีไฟของอาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้แบบจำลอง Pathfinder เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอพยพหนีไฟ จากงานวิจัยข้างต้นพบว่า โปรแกรม Pathfinder สามารถนำมาใช้ในการจำลองการอพยพหนีไฟโดยสามารถกำหนดเงื่อนไขได้จากเส้นทางการอพยพหนีไฟ อุปกรณ์ป้องกันและระงับอัคคีภัย หรือกรณีต่างๆที่เกิดขึ้นจริง เพื่อให้ได้ทราบถึงพฤติกรรมการอพยพหนีไฟ เวลาที่ใช้ในการอพยพหนีไฟ และนำไปสู่การปรับปรุงเพื่อให้เกิดความปลอดภัย

ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องจำลองการอพยพหนีไฟโดยใช้โปรแกรม Pathfinder เพื่อศึกษาการอพยพหนีไฟในสถานประกอบการที่ใช้ระบบการแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้แบบ Hardwire โดยเทียบกับกรณีศึกษาที่เกิดขึ้นจริง และนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประกอบการพิจารณาปรับปรุงระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ของสถานประกอบการโดยปรับปรุงให้เป็นระบบการแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้ให้เป็นระบบ Multiplex ให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพถูกต้องและเป็นไปตามที่มาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับ และควบคุมดูแลความพร้อมทั้งในส่วนของอุปกรณ์ตอบโต้เหตุฉุกเฉิน และเส้นทางการอพยพหนีไฟ เพื่อให้เกิดความมีประสิทธิภาพของระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ การรับทราบเหตุฉุกเฉินเพลิงไหม้ การตอบโต้เหตุฉุกเฉินเพลิงไหม้ และเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของทรัพย์สินในสถานประกอบการ

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์การจำลองประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ASUS A550V intel CORE i7-6700HQ และโปรแกรม Pathfinder version 2021 สำหรับสร้างแบบจำลองเสมือนจริงเป็นการศึกษาในรูปแบบการจำลองการอพยพหนีไฟ ซึ่งจะศึกษารูปแบบการอพยพหนีไฟในอุตสาหกรรมพลาสติก แล้วทำการวิเคราะห์ระบบด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น การจำลองการอพยพหนีไฟโดยเทียบกับกรณีศึกษาที่เกิดขึ้นจริง

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดปัญหา เก็บรวบรวมข้อมูล ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลที่สนับสนุนงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาข้อมูลของตัวอาคาร เส้นทางการอพยพหนีไฟ จำนวนคน และลักษณะทางกายภาพของคนในอาคาร กำหนด Behave สร้างแบบจำลองในโปรแกรม Path finder

ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

สถานประกอบกิจการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก มีการดำเนินการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก ประกอบไปด้วย 5 อาคาร แบ่งเป็นพื้นที่ใช้สอยในส่วนของสำนักงาน พื้นที่การผลิต พื้นที่สนับสนุน และพื้นที่คลัง แบ่งโซนสัญญาณแจ้งเหตุ

เพลิงไหม้เป็นทั้งหมด 8 โซนดัง Fig. 1 ใช้สัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Hardwire ไม่มีการเชื่อมต่อระบบถึงกัน และไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับควัน ความร้อน หรือเปลวไฟที่ทำงานโดยอัตโนมัติ โดยกำหนดจำนวนพนักงานจากข้อมูลจำนวนพนักงานจริง มีจำนวนทั้งหมด 568 คน แบ่งเป็น เพศชายอายุ 30 ปี – 50 ปี จำนวน 188 คน, เพศชายอายุน้อยกว่า 30ปี จำนวน 55 คน, เพศชายอายุมากกว่า 50 ปี จำนวน 8 คน, เพศหญิงอายุ 30 ปี – 50 ปี จำนวน 237 คน, เพศหญิงอายุน้อยกว่า 30 ปี จำนวน 55 คน, เพศหญิงอายุมากกว่า 50 ปี จำนวน 8 คน

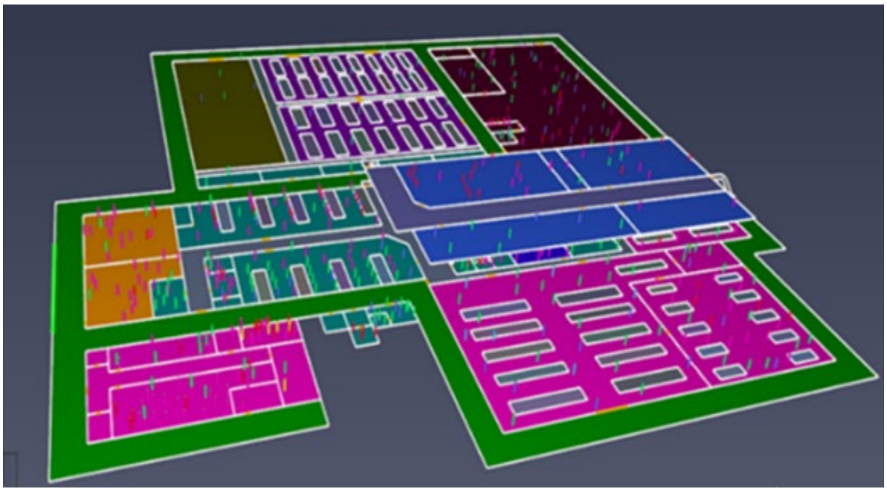


Fig. 1 Modeling in the Path Finder program

กำหนดกรณีศึกษาออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

1.เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกนอกอาคาร ประตูหนีไฟ, บันไดหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Hardwire และไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับควัน

2.เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกจากอาคาร ประตูหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่บันไดหนีไฟที่ใกล้ที่สุดบริเวณแผนกพิมพ์ชั้น 2 ของอาคารผลิตไม่สามารถใช้งานได้โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Multiplex

3.เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกจากอาคาร บันไดหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่ประตูทางออกนอกอาคารคลีนรูม2 (ประตูที่1) ที่อยู่ใกล้ที่สุดไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากมีบรรจุภัณฑ์วางกีดขวางเป็นจำนวนมาก ทำให้พนักงานอาคารคลีนรูม2 ต้องใช้ประตูที่2 เพื่ออพยพออกนอกอาคาร โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Multiplex

4.เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกนอกอาคาร ประตูหนีไฟ, บันไดหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Multiplex

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดพฤติกรรม (Behaviors)

- กรณีที่มีการใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Hardwire จะดำเนินการกำหนด Behaviors ของผู้อพยพ ตามโซนการแจ้งเตือนของระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้และระยะเวลาในการรับทราบเหตุการณ์ ดัง Fig. 2 โดยแบ่งเป็นทั้งหมด 8 โซน

- กรณีที่มีการใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Multiplex จะดำเนินการกำหนด Behaviors ของผู้อพยพให้รับทราบเหตุเพลิงไหม้พร้อมกันทั้งอาคาร ดัง Fig. 2

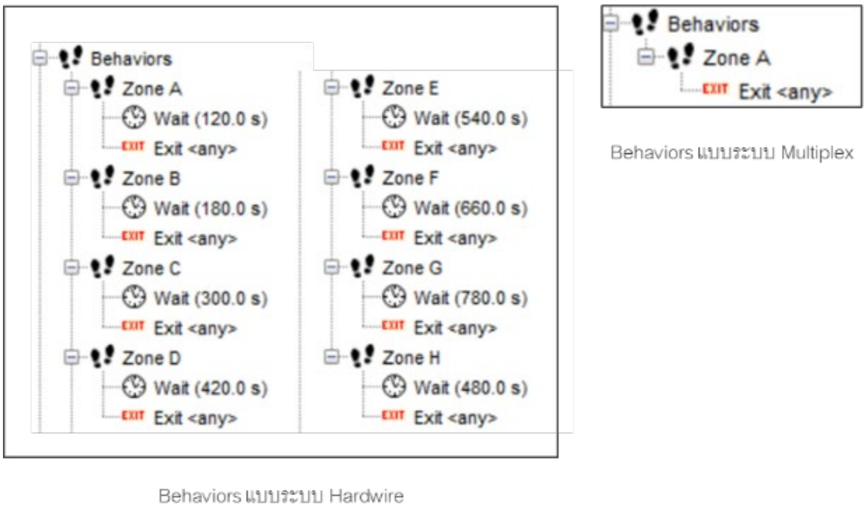


Fig. 2 Defining behavior in pathfinder program, in case of using a Hardwire system and Multiplex system

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดเงื่อนไขการเข้าและออกประตู ดัง Fig. 3 ในกรณีที่พื้นที่เป็นพื้นที่เฉพาะสามารถเข้าและออกได้เฉพาะบุคคลเท่านั้น

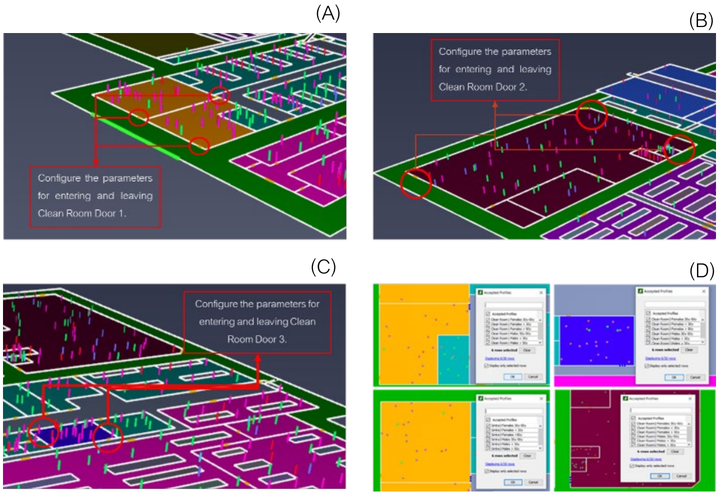


Fig. 3 Entry and exit doors in specific areas are assigned

ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาผลจากการจำลองเหตุการณ์การอพยพหนีไฟ เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมการอพยพหนีไฟ เส้นทางการอพยพหนีไฟ และระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้

ขั้นตอนที่ 6 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยแต่ละกรณี และเสนอแนะแนวทางป้องกันที่เหมาะสม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์อัคคีภัยด้วยโปรแกรม Pathfinder 2021 ได้กำหนดรูปแบบ 4 กรณี

กรณีที่ 1 เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกนอกอาคาร ประตูหนีไฟ , บันไดหนีไฟ สามารถใช้งานได้ตามปกติ โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Hardwire ซึ่งส่งผลให้ และไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับควัน ดัง Fig. 4 จากการศึกษาพบว่า ผู้ใช้อาคารที่อพยพไปยังจุดรวมพลคนสุดท้าย ใช้เส้นทางอพยพไปยังจุดรวมพลระยะเวลาที่ใช้ในการอพยพไปยังจุดรวมพลใช้เวลา 952 วินาทีจากโปรแกรม Pathfinder ดัง Fig. 6 เปรียบเทียบกับผลการฝึกซ้อมอพยพหนีไฟในปีที่ผ่านมา ใช้ระยะเวลา 1,020 วินาทีดัง Fig. 5 ซึ่งเกิน 300 วินาที ไม่สอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด

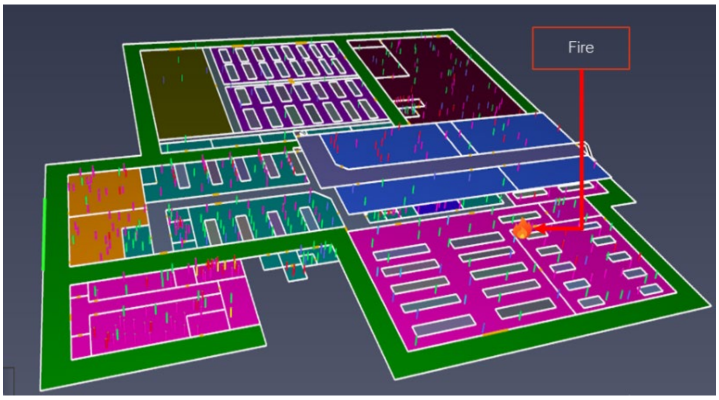


Fig. 4 Display case study 1

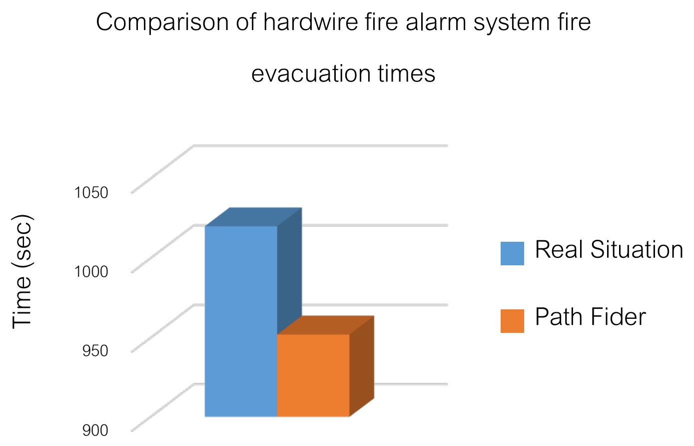


Fig. 5 Comparison of the actual situation with the fire evacuation time used by the Hardwire fire alarm system

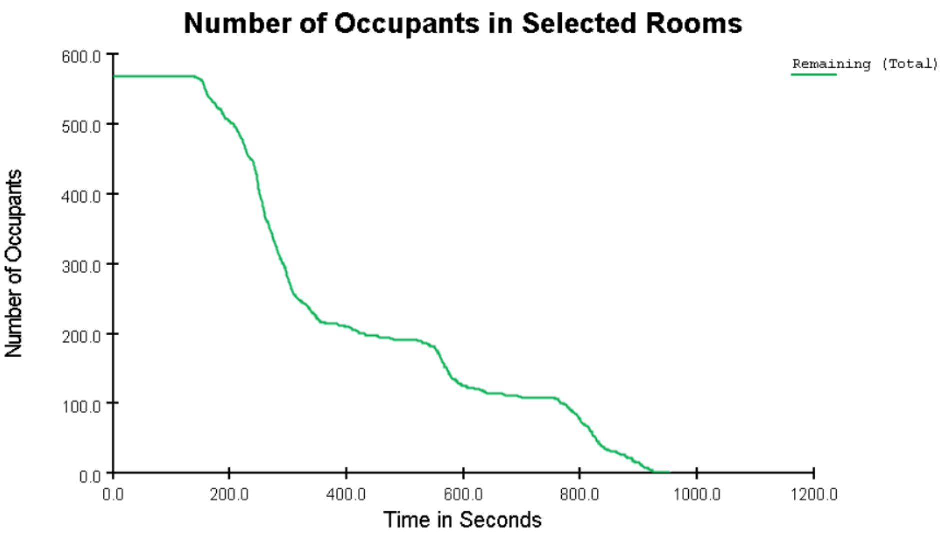


Fig. 6 Displays the number of evacuees and the time it takes to evacuate in case study 1

กรณีที่ 2 เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกจากอาคาร ประตูหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่บันไดหนีไฟที่ใกล้ที่สุดบริเวณแผนกพิมพ์ชั้น 2 ของอาคารผลิตไม่สามารถใช้งานได้ โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Multiplex ดัง Fig. 7 จากการศึกษาพบว่า เส้นทางการอพยพของผู้ใช้อาคารที่อยู่ชั้น 2 ไม่สามารถใช้บันไดหนีหนีไฟที่ใกล้ที่สุดได้ ทำให้ผู้ใช้อาคารแผนกพิมพ์ชั้น 2 ทั้งหมด ต้องใช้บันไดหนีไฟที่อยู่บริเวณหลังแผนกเพื่อออกไปยังจุดรวมพล ผู้ใช้อาคารที่อพยพไปยังจุดรวมพลคนสุดท้าย ใช้เส้นทางอพยพไปยังจุดรวมพลระยะเวลาที่ใช้ในการอพยพไปยังจุดรวมพลใช้เวลา 428วินาที ดัง Fig. 8 ใช้ระยะเวลาเกิน 300 วินาที ไม่สอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด

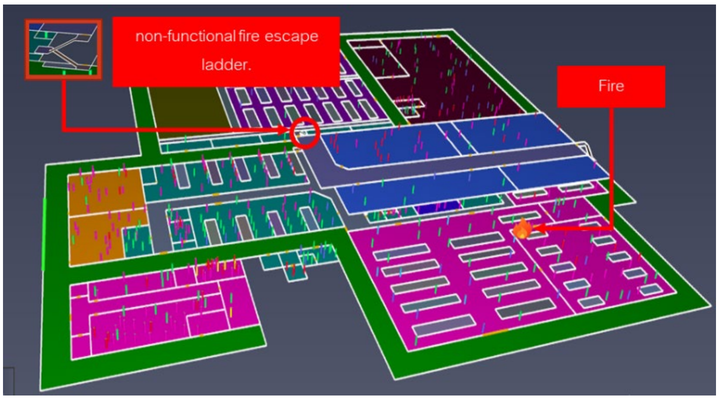


Fig. 7 Display case study 2

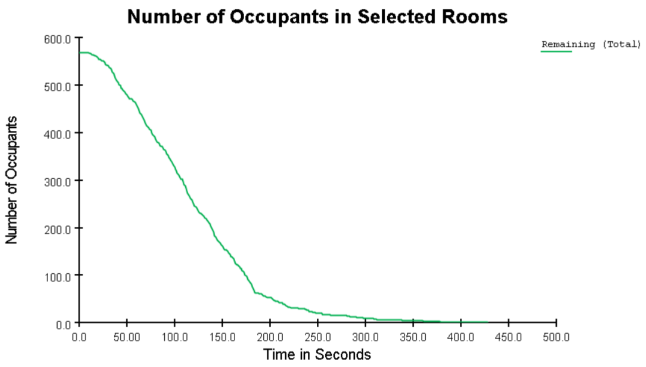


Fig. 8 Displays the number of evacuees and the time it takes to evacuate in case study 2

กรณีที่ 3 เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกจากอาคาร บันไดหนีไฟสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่ประตูทางออกนอกอาคารคลีนรูม 2 (ประตูที่1) ที่อยู่ใกล้ที่สุดไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากมีบรรจุภัณฑ์วางกีดขวางเป็นจำนวนมาก ทำให้พนักงานอาคารคลีนรูม 2 ต้องใช้ประตูที่ 2 เพื่ออพยพออกนอกอาคาร โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Multiplex ดัง Fig. 9 จากการศึกษาพบว่า เส้นทางการอพยพของผู้ใช้อาคารแผนกคลีนรูม 2 ไม่สามารถใช้ประตูหนีไฟที่ใกล้ที่สุดในการอพยพออกนอกอาคารได้ จึงต้องทำให้ผู้ที่ใช้งานอาคารแผนกคลีนรูม 2 ทั้งหมดต้องไปใช้ประตูหนีไฟ (ประตูที่2) เพื่ออพยพออกนอกอาคารไปยังจุดรวมพล ผู้ใช้อาคารที่อพยพไปยังจุดรวมพลคนสุดท้ายใช้เส้นทางอพยพไปยังจุดรวมพลระยะเวลาที่ใช้ในการอพยพไปยังจุดรวมพลใช้เวลา 309 วินาที ดัง Fig. 10 ใช้ระยะเวลาเกิน 300 วินาที ไม่สอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด

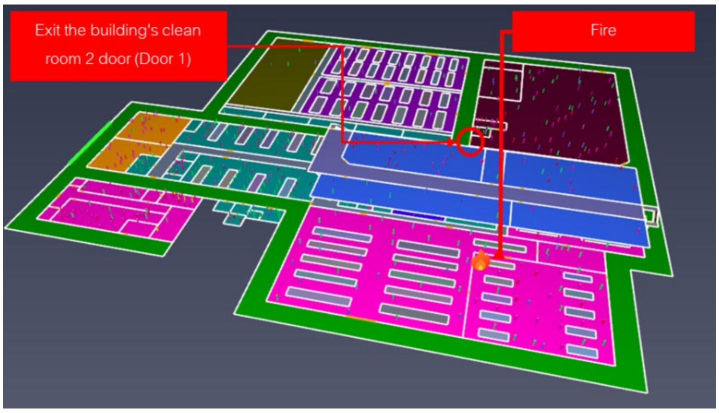


Fig. 9 Display case Study 3

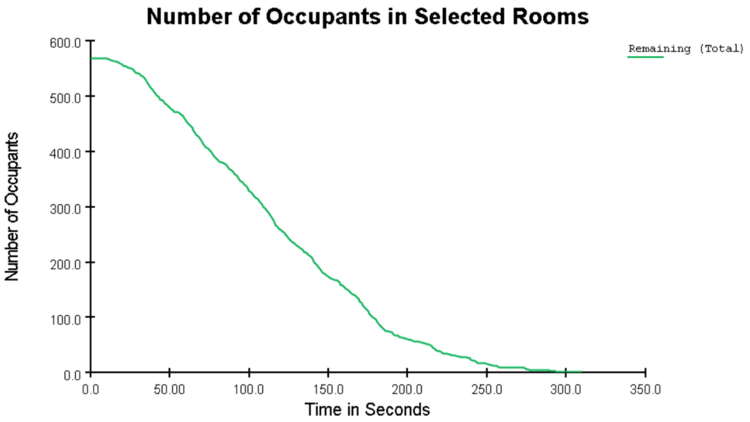


Fig. 10 Displays the number of evacuees and the time it takes to evacuate in case study 3

กรณีที่ 4 เกิดเหตุเพลิงไหม้บริเวณตู้ไฟ (MDB) แผนกเบคุ่ม ผู้ใช้อาคารอพยพออกนอกอาคาร ประตูหนีไฟ , บันไดหนีไฟ สามารถใช้งานได้ตามปกติ โดยใช้ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Multiplex ดัง Fig. 11 จากการศึกษาพบว่า ผู้ใช้อาคารที่อพยพไปยังจุดรวมพลคนสุดท้าย ใช้เส้นทางอพยพไปยังจุดรวมพลระยะเวลาที่ใช้ในการอพยพไปยังจุดรวมพลใช้เวลา 279 วินาที ดัง Fig. 12 ใช้ระยะเวลาสอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด

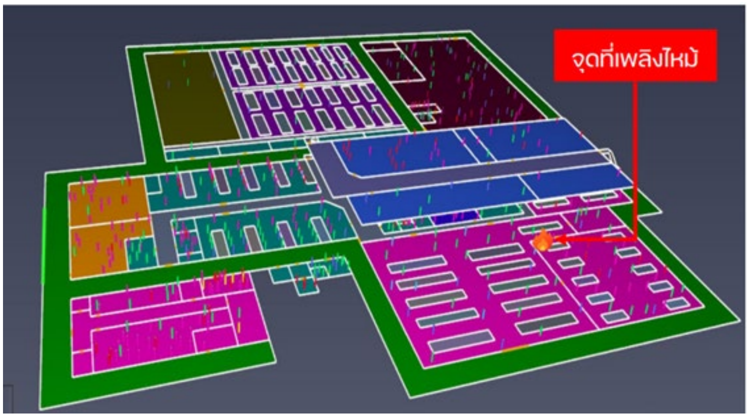


Fig. 11 Display case study 2

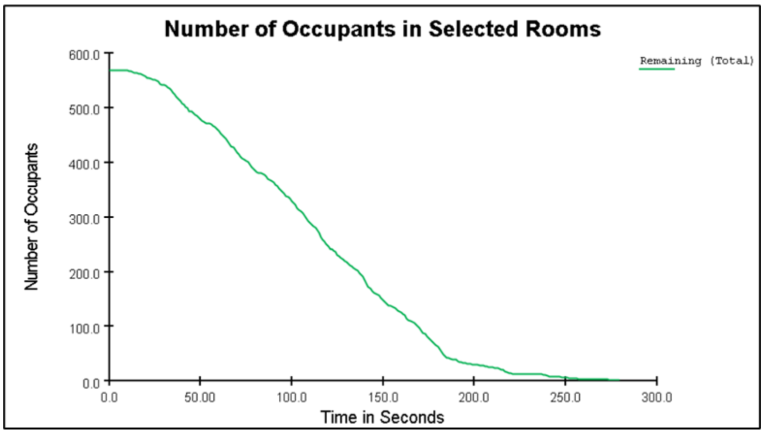


Fig. 12 Displays the number of evacuees and the time it takes to evacuate in case study 4

สรุป

จากการวิจัยดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่า จากทั้ง 4 กรณีที่ได้ทำการศึกษาการอพยพหนีไฟเปรียบเทียบการอพยพหนีไฟ ระหว่างสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Hardwire และระบบ Multiplex พบว่า กรณีที่ 1 ที่มีการใช้ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบ Hardwire ใช้เวลาการอพยพ 952 วินาที ไม่สอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด ส่วนกรณีที่มีการติดตั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex กรณีที่ 2 และ 3 ใช้เวลาการอพยพ 428 วินาที และ 309 วินาที ตามลำดับ ซึ่งใช้ระยะเวลาเกิน 300 วินาที ไม่สอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด ในส่วนของกรณีที่ 4 ที่มีการติดตั้งระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบ Multiplex เช่นเดียวกัน ใช้เวลาการอพยพ 279 วินาที ซึ่งใช้ระยะเวลาสอดคล้องตามที่กฎหมายกำหนด การจำลองแสดงให้เห็นว่า กรณีที่ได้มีการปรับปรุงระบบการแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้ให้เป็นระบบ Multiplex แล้ว แต่ถ้าไม่มีการดูแลความพร้อมของเส้นทางการอพยพหนีไฟ เช่น การมีสิ่งของหรืออุปกรณ์วางกีดขวางประตูหนีไฟ ทางออกหนีไฟ และบันไดหนีไฟ ก็จะส่งผลให้ผู้ใช้อาคารอพยพไปยังจุดรวมพลด้วยความล่าช้า ฉะนั้น

เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคารทางสถานประกอบการณ์ควรปรับปรุง ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ และตรวจสอบความพร้อมของบันไดหนีไฟและประตูหนีไฟให้สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพดังกรณีศึกษาที่ 4

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงแรงงาน. 2555. กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับการป้องกันและระงับอัคคีภัย พ.ศ. 2555.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2563. สถิติการเกิดอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2563 มาตรฐานป้องกันอัคคีภัยในประเทศญี่ปุ่น (2546). คู่มือด้านเทคนิคสำหรับการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัย ม.ป.ท.

ชฎาพร สุขภูวงศ์. 2556. การออกแบบเพื่อติดตั้งส่วนเพิ่มเติมและขยายขีดความสามารถการทำงานของระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ภายในกลุ่มอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นรินทร์ บุญประเสิรฐ. 2559. การจำลองการอพยพหนีไฟของอาคารสูงด้วยโปรแกรม Pathfinder กรณีศึกษาอาคารพื้นที่ครอบครองหลายประเภท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.

อภิชัย ทานะเวช. 2561. การประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการอพยพกรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.

อารุญ เกตุสาคร. 2558. Development of required safe egress time modeling for plastic manufacturing in Thailand.

Engineering, T. 2014. Pathfinder Technical Reference.

Guanquan, C., Jinhui, W. 2012. Study on probability distribution of fire scenarios in risk assessment to emergency evacuation. Reliability Engineering & System Safety 99: 24–32. doi.org/10.1016/j.ress.2011.10.014

การศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมและการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีการใช้เบรคมือ

A study to determine the appropriate amount of parking brake and tractive effort to towing mass rapid transit train to depot while using parking brake

จิรายุ เจริญชัยสกุล*, **วิชัย ศิวะโกศิษฐ**

Jirayu Jaroenchaisakul*, Wichai Siwakosit

ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Rail Engineering Center, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: jirayu11176@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมและการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีการใช้เบรคมือ เพื่อป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะทำการช่วยเหลือบนทางลาดชันโดยผลการวิจัยมาจากการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าจริง โดยพิจารณาลักษณะทางกายภาพของทางวิ่งและคุณสมบัติของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม นำมาวิเคราะห์และคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่และนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะของขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายฉลองรัชธรรม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า จำนวนเบรคมือที่เหมาะสมสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอยู่ที่ 4 เพลาสามารถป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะจอดบนทางลาดชันได้ และสามารถลากจูงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลับศูนย์ซ่อมบำรุงได้ทั้งบนเส้นทางสายหลักและภายในศูนย์ซ่อมบำรุงซึ่งสามารถลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยต่อการปฏิบัติการช่วยเหลือและลากจูงขบวนรถไฟฟ้ากรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้

คำสำคัญ: ระบบเบรคสำหรับรถไฟฟ้า, ระบบลากจูงสำหรับรถไฟฟ้า, ระบบรถไฟฟ้า

Abstract

This paper presents a study to determine the appropriate amount of parking brake and tractive effort to towing mass rapid transit train while using parking brake to prevent sliding of vehicle during operate on slope track and the results based on the testing and analysis of actual mass rapid transit project. The analysis focuses on physical condition track and rolling stock performance of MRT Purple line. The analysis performed by calculated resistance force and compared to tractive effort of mass rapid transit train. The analysis results show that the proper number of remaining parking brake is 4 axle which can prevent sliding of vehicle when parking on slope track and able to tow the mass rapid transit train back to depot both on the mainline route and depot track which can reduce risk and increase safety for rescue and tow mass rapid transit train in case of emergency

Keywords: Railway Braking System, Railway Propulsion System, Rolling Stock

คำนำ

ปัจจุบันการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนถือเป็นตัวเลือกสำคัญในการเดินทางของผู้คนในกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง เนื่องด้วยความสะดวกรวดเร็วสามารถร่นระยะเวลาการเดินทางของผู้คนอันเนื่องจากสภาพการจราจรที่หนาแน่นของกรุงเทพมหานครได้ อย่างไรก็ตามระบบรถไฟฟ้านั้นที่ขึ้นชื่อว่าเป็นการเดินทางที่ปลอดภัยอันดับต้นๆเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเดินทางอื่นๆ นั้นก็ยังมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องของอุปกรณ์หรือความบกพร่องส่วนบุคคลที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในการให้บริการได้ ดังเช่นกรณีรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลไหลชนกันที่สถานีศูนย์วัฒนธรรมเมื่อปี พ.ศ 2548 ซึ่งการศึกษานี้จะวิเคราะห์การลากขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีเบรคมือเพื่อป้องกันการไหลของขบวนรถไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับเป็นข้อมูลในการจัดการเหตุการณ์ในกรณีฉุกเฉินป้องกันปัญหาซ้ำรอยที่เกิดขึ้นในอดีตและเพื่อเพิ่มความปลอดภัยสูงสุดสำหรับการให้บริการต่อไป งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ข้อมูลของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมช่วงบางใหญ่-บางซื่อ เท่านั้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบเบรคมือของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

American Public Transport Association (APTA) ได้กำหนดมาตรฐานและระบุวิธีการการทดสอบเบรคมือสำหรับรถไฟ โดย การนำขบวนรถไฟวางไว้ในทางรถไฟที่มีความลาดชันสูงสุดของระบบหรือทางลาดชันขั้นต่ำ 3% โดยขบวนรถไฟจะต้องไม่ไถลเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 นาที หรือทำการทดสอบดึงรถจักรด้วยอุปกรณ์วัดแรงบริเวณขอพ่วง แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านการเดินรถและอุปกรณ์การทดสอบ งานวิจัยนี้จึงจำลองสถานการณ์โดยอ้างอิงจากมาตรฐานดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการคำนวณหาจำนวนเบรคมือที่เหมาะสม

การคำนวณแรงเบรคของรถไฟฟ้า

การคำนวณแรงเบรค (Braking Force) ในบทความนี้จะเป็นการคำนวณระบบเบรค ของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม ซึ่งระบบเบรคจะเป็นลักษณะเบรคที่อาศัยแรงเสียดทาน (Friction Brake) แบบ Disc Brake ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ทุกเพลา (Axle) ของรถไฟซึ่งสามารถคำนวณแรงเบรคที่กระทำต่อบริเวณจุดสัมผัสระหว่างล้อกับรางได้โดย Equation 1

$$F_b = \frac{4 \times \mu_d \times rm \times \sum_{i=1}^{n} (P_d, i)}{D_0} \tag{1}$$

โดยค่าพารามิเตอร์และลักษณะจำเพาะระบบเบรคของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมนั้นถอดข้อมูลมาจาก Specification ของอุปกรณ์ที่ระบุอยู่ใน Definitive Design Brake System ของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมนั้น ซึ่งต้องใช้ในการคำนวณดัง Table1

Table 1 The Calculation on parameter data of railway brake system

Parking Brake force per brake disc	28500 N
Mean Radius of brake disc	271 mm
Vehicle Mass AW0	116,400 Kg
Rotating Mass	5,820 Kg

μ disc brake	0.3
Number of parking brake	12
Wheel Diameter	830 mm

การคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

แรงต้านการเคลื่อนที่จากความลาดชันของทางรถไฟ (Gradient Resistance, R_g) สามารถคำนวณได้จากการที่ขบวนรถไฟทำมุมกับพื้นระนาบในทิศทางที่ขบวนรถไฟวิ่งไป สำหรับทางลาดชันที่ทำมุมน้อยๆ นั้นค่า sin(α) สามารถแทนได้ด้วยค่า tan(α) ซึ่งในงานทางด้านรถไฟนั้นค่า tan(α) จะถูกแทนด้วยค่าความลาดเอียง (i) ซึ่งปกติค่าความลาดชันของทางรถไฟจะแสดงในหน่วยต่อพันส่วน (Per mill) [‰] โดยเขียนเป็นรูป Equation 2 และ Fig. 1ดังนี้

$$R_g = m \times g \times \sin\alpha = m \times g \times \tan\alpha = m \times g \times i \quad (2)$$

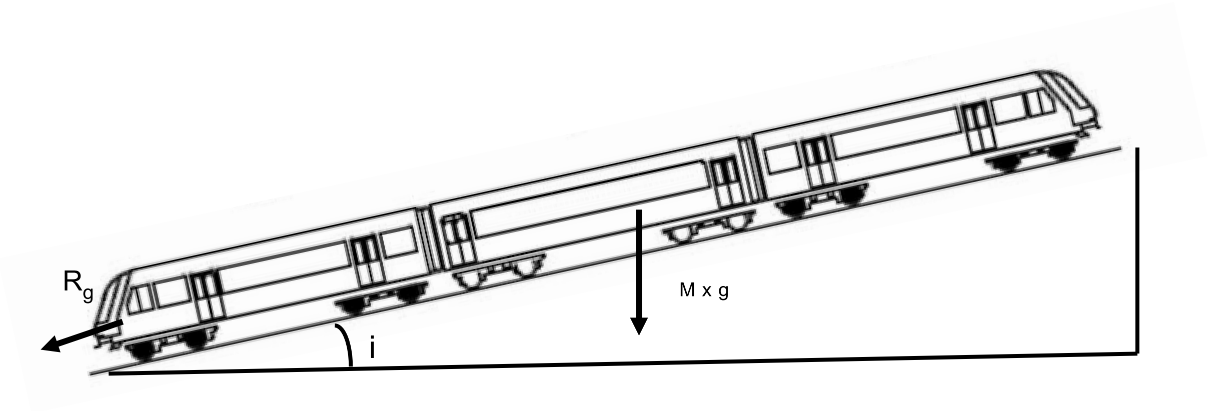


Fig. 1 Free body diagram of gradient resistance

แรงต้านการเคลื่อนที่จากสภาพการหยุดนิ่งของรถไฟ (Starting Resistance, R_S) เป็นแรงต้านทานที่ เกิดน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ภายในอุปกรณ์ทางกลของรถไฟกดทับจนเกิดการเสียรูปน้ำมันหล่อลื่น ทำให้ขบวนรถไฟเกิดแรงต้านทานและต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมากกว่าปกติ โดยแรงต้านการเคลื่อนที่จากสภาพการหยุดนิ่งของรถไฟ (R_S) จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละประเทศ โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่า R_S = 3 Kg/Tons ซึ่งเป็นค่าที่การรถไฟญี่ปุ่นกำหนดไว้ใช้สำหรับขบวนรถไฟฟ้า

แรงต้านจากการฝืนตัวของมวลขณะเร่งความเร็ว (Inertia Resistance, R_{in}) เป็นแรงต้านทานจากความเฉื่อยของอุปกรณ์ส่วนหมุนของรถไฟอาทิเช่นชุดเพลาล้อรถไฟ ขณะรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง โดยแรงต้านจากการฝืนตัวของมวลขณะเร่งความเร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางรูปร่างทางกายภาพและวัสดุที่ถูกติดตั้งอยู่บนขบวนรถไฟ โดยได้ตาม Equation 3 ดังต่อไปนี้

$$R_{in} = M \times \alpha \times \left(1 + \frac{M_{Rot}}{M}\right) \quad (3)$$

จากนั้นนำสมการทั้งหมดมารวมกันจะได้แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขณะหยุดนิ่ง โดยได้ตาม Equation 4 ดังต่อไปนี้

$$R = R_s + R_{in} + R_g \quad (4)$$

การคำนวณแรงขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า (Tractive Effort)

หลักการในการทำให้วัตถุใดวัตถุหนึ่งเคลื่อนที่นั้นเกิดจากการออกแรงให้เอาชนะให้แรงเสียดทานการเคลื่อนที่ ซึ่งระบบรถไฟฟ้านั้นใช้หลักการเดียวกันโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ในการสร้างแรงขับเคลื่อนและทำการเปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลส่งผ่านชุดเพลาเกียร์เพื่อไปทำการขับเคลื่อนล้อรถไฟฟ้า จากนำมาเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยสามารถคำนวณได้จาก Equation 5 ดังต่อไปนี้

$$TE - R - F_b = W \times \alpha \quad (5)$$

โดยแรงขับเคลื่อนของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมดคือ Low Acceleration Mode เป็นโหมดที่ใช้สำหรับ Operation ในสถานการณ์ปกติ และ High Acceleration Mode ซึ่งเป็นโหมดที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉิน เป็นข้อมูลที่ระบุอยู่ใน Definitive design Traction Performance ของโครงการโดยมีรายละเอียดตาม Table 2

Table 2 Tractive effort of normal and high acceleration mode

Tractive Effort per motor Normal Mode	Tractive Effort per motor High Acceleration Mode
AW0 = 19.1 kN	AW0 = 22.1 kN
AW1 = 20.6 kN	AW1 = 23.7 kN
AW2 = 26.9 kN	AW2 = 30.9 kN
AW3 = 28.6 kN	AW3 = 31.4 kN
AW4 = 31.4 kN	AW4 = Not applicable

ลักษณะทางกายภาพของทางกายภาพของทางวิ่งรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม

1. Mainline จากการสำรวจพบว่ามีความลาดชัน Gradient สูงสุดอยู่ที่บริเวณสถานี PP13 แยกติวานนท์ – PP14 วงศ์สว่าง มีค่า 0.8% ยาว 487 เมตร โดยถอดข้อมูลจากแบบแผนผังด้านอาณัติสัญญาณของทางวิ่งหลัก (Signaling Scheme Plan Drawing Mainline) โดยมีตำแหน่งและข้อมูลดัง Fig. 2

2. Depot จากการสำรวจพบว่ามีความลาดชัน Gradient อยู่ที่บริเวณ South Chord Line มีค่า 3.2% ยาว 167 เมตร และบริเวณ North Chord Line มีค่า 2.6% ยาว 205 เมตร โดยถอดข้อมูลจากแบบแผนผังด้านอาณัติสัญญาณของศูนย์ซ่อมบำรุง (Signaling Scheme Plan Drawing Depot) ของโครงการโดยมีตำแหน่งและข้อมูลดัง Fig. 3 และ Fig. 4

Fig. 2 PP13 Yaek Tiwanon Station - PP14 Wong Sawang Station of MRT Purple Line

Fig. 3 South Chord Line of MRT Purple Line

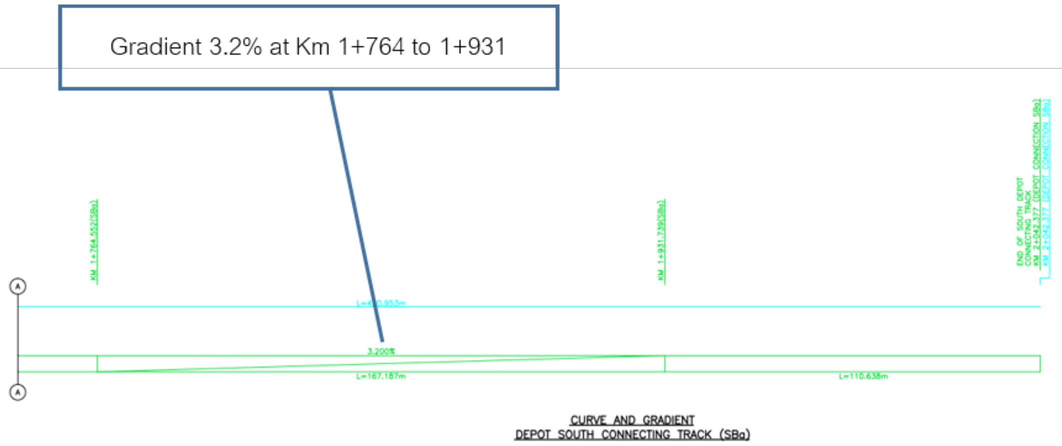


Fig. 4 Curve and Gradient Southbound Track Khlong Bang Phai Depot

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ประการแรกทำการศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมกรณีที่ต่อพ่วงรถไฟฟ้าอยู่บริเวณทางลาดชันเพื่อป้องกันการไถลของรถไฟฟ้า การคำนวณจะจำลองโดยการนำขบวนรถไฟฟ้า 1 ขบวนไปวางไว้ที่ทางลาดชันสูงสุดของระบบจากนั้นทำการคำนวณหาแรงการไหลที่เกิดจากทางลาดชันของทางรถไฟฟ้าและนำมาเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของเบรคมือที่ติดตั้งอยู่ทุกๆ เพลาล้อของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยการทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยค่อยๆเพิ่มการลงเบรคมือทีละ 1 เพลาโดยเริ่มจาก 0 เพลาไปยัง 12 เพลา ซึ่งจะทำให้แรงต้านทานการเคลื่อนที่จากเบรคมือแตกต่างกันโดยผลการคำนวณพบว่า จำนวนคงเหลือขั้นต่ำของเบรคมือที่เหมาะสมอยู่ที่ 4 เพลา (Axle) ซึ่งจะทำให้ลดไม่เกิดการไหล กรณีรถไฟฟ้าจอดอยู่ที่บริเวณทางลาดชัน Gradient 3.2% นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบบริเวณอื่นๆของโครงการ แสดงดัง Fig. 5

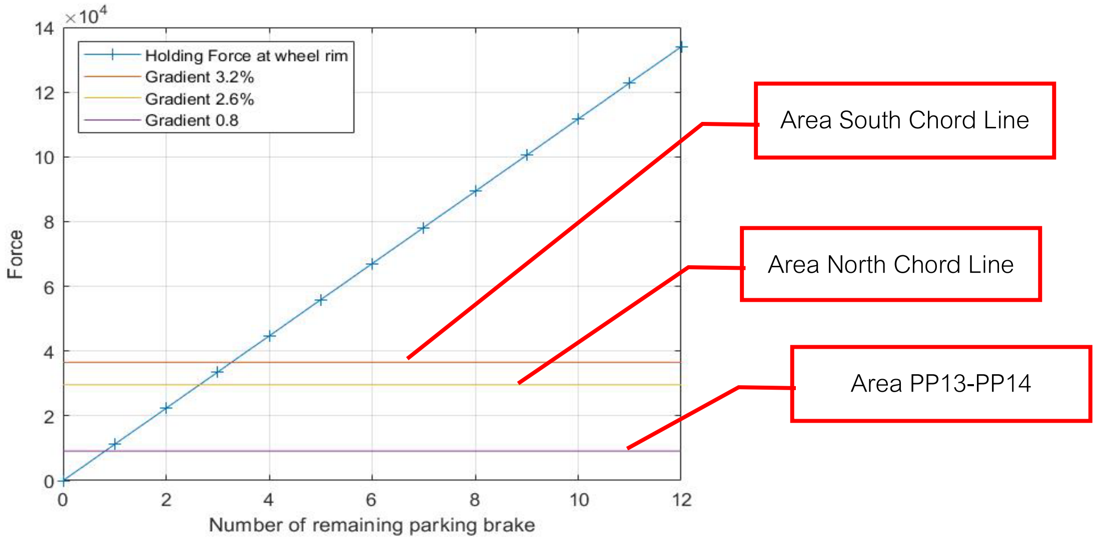


Fig. 5 The Parking brake force compared with resistance force at different area

ประการที่สอง ทำการศึกษาหาความลาดชันสูงสุดที่รถไฟฟ้าสามารถลากจูงขณะที่มีการใช้เบรคมือ โดยคำนวณจะใช้สมมุติฐานรถไฟฟ้าเป็นลักษณะน้ำหนักแค่ตัวรถไม่รวมคนโดยสารหรือ Tare Load (AW0) เนื่องจากในสถานการณ์ฉุกเฉินนั้นการช่วยเหลือขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะกระทำหลังมีการอพยพผู้โดยสารแล้ว และเนื่องจากระบบขับเคลื่อนของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรมถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมด ได้แก่ Normal Mode และ High Acceleration Mode การคำนวณจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีเนื่องจากแรงขับเคลื่อนของแต่ละโหมดต่างกันดัง Table 2 โดยการทดลองจะดำเนินการทดสอบโดยค่อยๆเพิ่มการลงเบรคมือทีละ 1 เพลาโดยเริ่มจาก 0 เพลาไปยัง 12 เพลา ซึ่งจะทำให้แรงต้านทานการเคลื่อนที่จากเบรคมือแตกต่างกัน จากนั้นนำค่าที่ได้ในแต่ละช่วงเพลามาคำนวณร่วมกับแรงขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเพื่อคำนวณย้อนกลับหาแรงต้านการเคลื่อนที่จากความลาดชัน (R_g) จาก Equation 5 และนำแรงต้านการเคลื่อนที่จากความลาดชันไปหาค่าความลาดชันสูงสุดที่รถไฟสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้จาก Equation 2 โดยผลการคำนวณพบว่ากรณีลากจูงด้วย High Acceleration Mode สามารถลากจูงโดยคงจำนวนของคงเหลือของเบรคมือได้มากสุดที่ 5 เพลา และ กรณีลากจูงด้วย Normal Mode สามารถลากจูงโดยคงจำนวนของคงเหลือของเบรคมือได้มากสุดที่ 3 เพลา นั้นสามารถลากจูงผ่าน

ความลาดชัน Gradient 3.2% ซึ่งเป็นจุดที่มีความลาดชันและความต้านทานการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงการได้ แสดงดัง Fig. 6

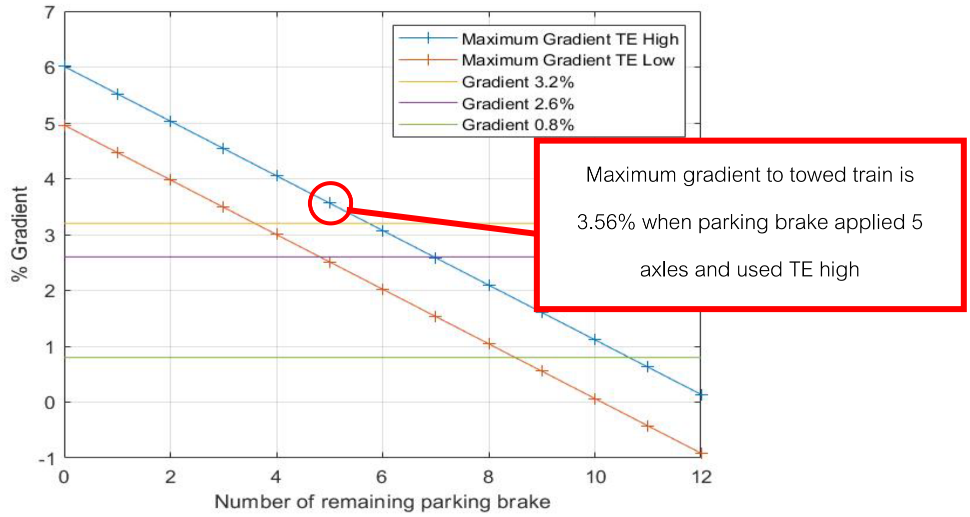


Fig. 6 Maximum gradient while towing with normal and high acceleration mode

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาจำนวนคงเหลือของเบรคมือที่เหมาะสมและการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะที่มีการใช้เบรคมือเพื่อป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะทำการช่วยเหลือบนทางลาดชันของโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า จำนวนเบรคมือที่เหมาะสมสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอยู่ที่ 4 เพลาซึ่งสามารถป้องกันการไหลของรถไฟฟ้าขณะจอดบนทางลาดชันได้ และสามารถลากจูงรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลับศูนย์ซ่อมบำรุงได้โดยใช้โหมด High Acceleration Mode ทั้งบนเส้นทางสายหลักและภายในศูนย์ซ่อมบำรุง แต่ทั้งนี้จากผลการศึกษาพบว่ามีข้อจำกัดเพิ่มเติมกรณีลากจูงขบวนรถไฟฟ้าด้วย Normal Mode จะไม่สามารถลากจูงผ่านความลาดชันสูงสุดที่ 3.2% ของโครงการที่บริเวณ South Chord Line เนื่องจากกำลังลากจูงของรถไฟฟ้าไม่เพียงพอ แต่ทั้งนี้สามารถหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่ผ่าน South Chord Line ได้โดยเสนอแนะให้พิจารณาใช้เส้นทาง North Chord Line ในการลากจูงขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลับศูนย์ซ่อมบำรุงแทนเนื่องจากมีความลาดชันเพียง 2.6% ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยต่อการปฏิบัติการช่วยเหลือและลากจูงขบวนรถไฟฟ้ากรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนข้อมูลของกรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม

เอกสารอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. โครงการรถไฟฟ้า. https://www.mrta.co.th/th/index.php, 10 กุมภาพันธ์ 2559.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. Signaling Scheme Plan Drawing MRT Purple Line.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. Definitive Design Train braking system MRT Purple Line.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. Definitive Design Traction Performance MRT Purple Line.

นคร จันทศร. 2555. ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

วิชัย ศิวะโกศิษฐ. 2563. หลักการวิศวกรรมระบบราง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วเรศรา วีระวัฒน์, โชคชัย จูฑะโกสิทธิกานนท์, อิทธิโชติ จักรไพวงศ์, สมนิดา รัตนาปนะโชติ, ธรรมวฤทธิ สิงหวิลัย, ภูมินท์ กิระวานิช. 2557. ระบบรางขั้นพื้นฐาน (Fundamentals of rail systems). โครงการศูนย์นวัตกรรมทางโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล. นครปฐม.

American Public Transportation. 2017. Parking Brakes for Passenger Locomotives and Cars, 3rd ed. Washington DC, USA.

Cruceanu. C. 2012. Train braking. In: Perpinya, X. (Ed.). Reliability and Safety in Railway. Intech. Rijeka, Croatia, pp. 30–46.

Profillidis, V.A. 2014. Railway Management and Engineering, 4th ed. Ashgate Publishing Limited. UK.

Limpert, R. 1999. Brake Design and Safety. 2nd ed. Society of Automotive Engineers. Inc., USA.

การจำลองการเผาไหม้ของหอหล่อเย็นด้วยโปรแกรมจำลองพลศาสตร์อัคคีภัยโดยคอมพิวเตอร์

Cooling tower burning simulation with computing fire dynamics simulation

วันภพ ลิมป์โกมล[a,*], **ณัฐศักดิ์ บุญมี**[b]

Wanbhop Limkomol[a,*], Nathasak Boonmee[b]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Fire Protection Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wanbhop.l@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการติดไฟและการลุกลามของวัสดุติดไฟที่เป็นส่วนประกอบหลักของหอหล่อเย็น (Cooling Tower) ที่ได้ปลดปล่อยพลังงานความร้อนด้วยวัสดุที่ใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกและพลาสติกเสริมแรงของอุปกรณ์ ด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Computational Fluid Dynamics (CFD) โดยใช้โปรแกรมแบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ Fire Dynamics Simulator (FDS) ที่พัฒนาโดย National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา การวิจัยได้ดำเนินการจำลองเพลิงไหม้ที่บริเวณด้านล่างของหอหล่อเย็น ด้วยวิธีการกำหนดแหล่งพลังงานความร้อนด้วยอัตรา 50 กิโลวัตต์ (kW) เพื่อวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนที่แสดงให้เห็นเป็นข้อมูล ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบดับเพลิงของ National Fire Protection Association (NFPA) ที่ใช้เป็นแนวทางการติดตั้งอย่างมีประสิทธิภาพต่อภาคธุรกิจ และอุตสาหกรรมในประเทศต่อไปและดียิ่งขึ้นในระดับสากล

คำสำคัญ: ระบบดับเพลิงสำหรับหอหล่อเย็น, หอหล่อเย็น, อัตราการปล่อยพลังงาน

Abstract

The objective of this research for investigate the cooling tower under burning. The unit consists of mostly combustible material with its heat release rate and mass loss rate under burning. The simulations were took performed by the Computational Fluid Dynamics (CFD) program called Fire Dynamics Simulator (FDS), the software developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST), USA. This research prepares the simulation by heat conductive under the assumption of the heat under the bottom of the cooling tower by heat flux at 50 kW, and compare it between analyzing the flame spread and total heat release rate. Then collect some data to analyze by comparing with other units under fire suppression based on the National Fire Protection Association (NFPA). This result could be effective in the best guideline of design and installation to assist the economic and industrial country, thus improving the fire protection system nationwide.

Keywords: Cooling tower, Fire protection for cooling tower, Heat release rate.

คำนำ

เนื่องด้วยความต้องการความต่อเนื่องในการดำเนินกิจการ และการแข่งขันทางด้านธุรกิจที่สูงขึ้น ตามความต้องการของตลาดโลกในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านอุสาหกรรม จึงอาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงระบบทำความเย็นที่ใช้งานอยู่เป็นประจำดังเช่น ระบบปรับอากาศ ระบบหล่อเย็นเครื่องจักร โรงผลิตไฟฟ้า และอื่นๆ อีกมากมายในทุกพื้นที่ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ระบายความร้อนออกจากระบบต่างๆ กับระบบที่ใช้งานดังกล่าวอย่างสม่ำเสมอ คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศและระบายความร้อนด้วยน้ำ ด้วยเงื่อนไขของต้นทุนในการใช้พื้นที่และค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงาน หอหล่อเย็น (Cooling Tower) ที่ใช้วิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb) ได้ 2–3 องศาเซลเซียส จึงมีความสามารถระบายความร้อนด้วยอัตราการใช้น้ำน้อยกว่า 5% ต่อการใช้งานปกติ ซึ่งระบบปรับอากาศมักนิยมใช้หอหล่อยเย็น (Cooling Tower) นี้ ทั้งชนิดน้ำกับลมไหลขวางทาง (Cross Flow) และชนิดน้ำกับลมไหลสวนทาง (Counter Flow) (ASHRAE, 2016. HVAC System and Equipment (SI) Handbook)

ในส่วนวัสดุที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนและระบายความร้อนด้วยน้ำแบบหอหล่อเย็น (Cooling Tower) ดังกล่าวสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลายชนิดเช่น ไม้ โลหะ พลาสติก และคอนกรีต ที่ในการใช้ประกอบเป็นโครงสร้างหลัก แต่ในส่วนที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนมักนิยมจะใช้เป็นวัสดุพลาสติก (Plastic) และพลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว (Fiber glass resin plastic) ซึ่งทั้งสองอย่างรวมกันมากกว่า 70% โดยปริมาตรทั้งหมดของเครื่อง และในชุดขับเคลื่อนอากาศจะประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้าและใบพัดลมของอุปกรณ์ดังกล่าว (ASHRAE,2016. HVAC System and Equipment (SI) Handbook)

ในส่วนสถานที่ในการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนและระบายความร้อนด้วยน้ำแบบหอหล่อเย็น (Cooling Tower) จำเป็นต้องติดตั้งในพื้นที่ภายนอกอาคาร และต้องอยู่บนที่สูงของตัวอาคาร จึงมีความเสี่ยงที่อุปกรณ์ดังกล่าวมักเกิดเหตุอัคคีภัยจากสาเหตุหลักๆ คือมอเตอร์ไฟฟ้าชำรุด และฟ้าผ่า อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

จากวัสดุพลาสติก (Plastic) และพลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว (Fiber glass resin plastic) ซึ่งทั้งสองอย่างรวมกันมากกว่า 70% ของเครื่องแลกเปลี่ยนและระบายความร้อนด้วยน้ำแบบหอหล่อเย็น (Cooling Tower) เป็นวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิงอย่างดี ซึ่งลักษณะของแข็งใดๆ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนอันเนื่องมาจากการนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน จนสามารถเกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) มีการแยกสลายกลายเป็นถ่าน (Char) ที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ก่อตัวเป็นชั้นอยู่ที่ผิวหน้าของวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิงเหล่านั้น ส่วนไอเชื้อเพลิง (Fuel Gases) ซึ่งไหลออกไปผสมกับอากาศโดยรอบก่อตัวเป็นก๊าซผสมติดไฟได้ (Combustible Mixtures) จนยากต่อการควบคุมอัคคีภัยอันเนื่องจากความเสี่ยงดังกล่าว (ณัฐศักดิ์, 2565. พลศาสตร์อัคคีภัย (Fire Dynamics).)

งานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานความร้อนที่ (Heat Release Rate) ที่ได้จากการจำลอง โดยใช้โปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความเชื่อถือทางด้านวิศวกรรม จนถึงข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบดับเพลิงในอนาคต เพื่อยกระดับความสามารถของประเทศ ให้มีความทัดเทียบกับระดับสากล

อุปกรณ์และวิธีการ

การทำวิจัยนี้ได้จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในในครั้งนี้ประกอบไปด้วยเอกสารทางด้านวิชาการ และเครื่องมือดังแสดงในรายการต่อไปนี้ ด้านฮาร์ดแวร์เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook. ที่มีหน่วยประมาลผล Processor: i7-7700HQ; หน่วยประมวลผลด้านกราฟฟิก GPU: GTX 1050Ti; หน่วยความจำ Ram: 32GB; ข้อมูลที่ใช้ในการบันทึก

SSD: 1TB. ด้านซอฟต์แวร์ประกอบด้วย ระบบปฏิบัติการ Windows 11 x64, โปรแกรม PyroSim 2019 x64, โปรแกรม Auto CAD 2020 x64 และโปรแกรม Microsoft Office 2019 x64

การสร้างแบบจำลองของหอหล่อเย็น

ทำการสร้างโมเดลจำลองโดยอ้างอิงขนาดจากแบบที่ใช้ในการติดตั้ง หรือทำการวัดขนาดจากอุปกรณ์จริงที่มีอยู่ตาม Fig. 1 แล้วนำมาใส่ในโปรแกรมโมเดลจำลองนี้ และเพื่อให้มีความถูกต้องมากขึ้น โมเดลจำลองดังกล่าว ต้องทำการแยกวัสดุแต่ละชนิดออกจากกันให้ชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุติดไฟที่เป็นแหล่งเชื้อเพลิงตาม Fig. 2

Fig. 1 Cooling tower actual cross section

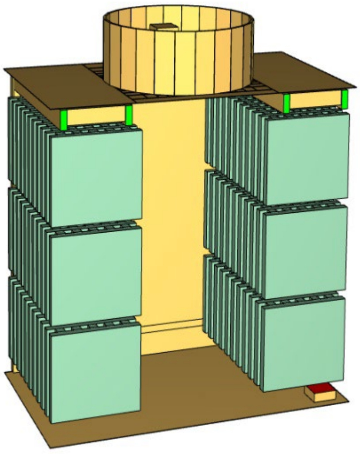


Fig. 2 Cooling tower model cross section

กำหนดคุณลักษณะของวัสดุในโปรแกรมจำลอง PyroSim

กำหนดแหล่งกำเนิดและขนาดพลังงานความร้อนโดยเหตุการณ์ของอัคคีภัยในหอหล่อเย็น (Cooling Tower) ที่ผ่านมานั้น มีสาเหตุหลักจากการที่มีพลังงานความร้อนไปสัมผัสกับส่วนประกอบของเครื่องที่เป็นวัสดุติดไฟ อันเป็นเชื้อเพลิงที่ทำให้จุดติดไฟและลุกลามได้อย่างรวดเร็ว เช่น สะเก็ดไฟจากช่างบำรุงรักษาที่มีการเชื่อม-ตัดเจียร โลหะ,

อุปกรณ์ไฟฟ้าส่องสว่างชำรุด, มอเตอร์พัดลมลัดวงจร, คราบน้ำมัน-เคมีปะปนจากเครื่องจักรในกระบวนการผลิต, พนักงานใช้ที่จุดบุหรี่แบบพกพา, จากการเผาขยะบริเวณข้างเคียง รวมถึงภัยธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า

ด้วยความหลากหลายของสาเหตุการเกิดอัคคีภัยที่ผ่านมา จึงนำเสนอด้วยจุดกำเนิดความร้อนจากที่จุดบุหรี่แบบพกพา ที่แสดงใน Table 1 จะแสดงให้เห็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่ 63 (kW/m^2) (Justin, 2003)

Table 1 Maximum for heat flux rate from cigarettes Lighter

Lighter Label	Visible Flame Height, h_f (mm)	Maximum Heat Flux, $(q''_o)_{max}$ (kW/m²)	Maximum Temperature, T_{max} (K)	Maximum Ignition Height, $(h_{ig})_{max}$ (cm)
Diffusion	20	63	1930	5.5
Premixed1	9	169	1763	6.1
Premixed2	15	326	2022	9.6

Source: Justin (2003)

Table 2 Heat Flux of PVC

Test Piece ID	Piece Weight, (g)	Heat Flux, (kW/m²)	Ignition Time, (s)	Ignited Burning Flux, (g/m² s)	Maximum Burning Flux, (g/m² s)
PVC 50-1	32.76	50.0	15	2.43	16.40
PVC 50-2	32.66	50.0	19	2.26	15.17
PVC 40-1	31.67	40.0	48	8.34	9.86
PVC 40-2	32.00	40.0	54	9.93	10.52
PVC 30-1	32.66	30.0	58	5.85	10.58
PVC 30-2	32.79	30.0	43	0.74	11.16
PVC 20-1	31.96	20.0	Non-Ignition	N/A	N/A
PVC 20-2	32.86	20.0	Non-Ignition	N/A	N/A

Source: Kitti (2554)

แต่เนื่องด้วยค่าจำเพาะบางรายการไม่เพียงพอ จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มชุดข้อมูลให้มีความครบถ้วนสมบูรณ์มากขึ้นและเพื่อเป็นการต่อยอดผลงานการวิจัยที่ผ่านมา จึงต้องปรับค่าฟลักซ์ความร้อนที่ 50 (kW/m^2) ที่แสดงใน Table 2 (กิติ, 2554)

กำหนดค่าวัสดุติดไฟที่เป็นแหล่งเชื้อเพลิง

เนื่องจากวัสดุของ Fill cooling tower ทำจาก PVC ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัติของ PVC เพื่อทำการทดสอบการกำหนดค่าการปล่อยพลังงานความร้อนจะกำหนดโดยใช้ค่า Mass Loss Rate g/m^{2}s ของวัสดุ PVC (กิติ, 2554) ได้

ทดสอบค่า Mass Loss Rate ของวัสดุ PVC โดยใช้เครื่อง Cone Calorimeter พบว่า PVC มีค่า Burning flux = 12.28 g/m^2.s และยังพบว่าอุณหภูมิติดไฟของ PVC = 769 K หรือ 495.85 $^{\circ}$C

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกทดลองโดยใช้ค่า Mass Loss Rate = 12.28 g/m^{2}s และอุณหภูมิติดไฟ = 495.85 $^{\circ}$C ดังที่แสดงใน Fig. 3

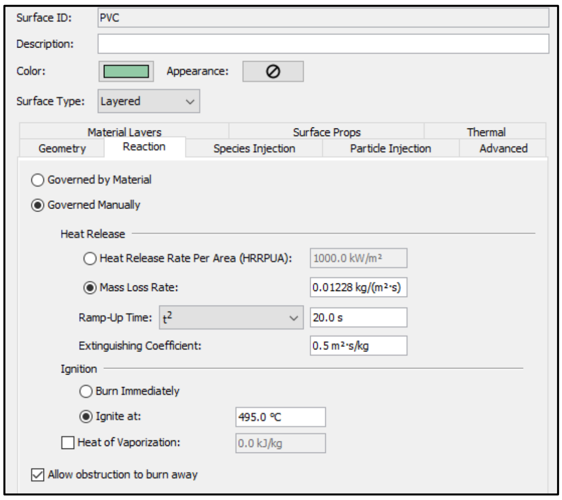


Fig. 3 Material Properties-PVC

กำหนดให้ติดตั้งระบบดับเพลิงสำหรับหอหล่อเย็น (Cooling Tower)

ทำการออกแบบ วางแบบติดตั้งระบบดับเพลิงโดยการกำหนดตำแหน่งหัวกระจายน้ำตามแบบที่ได้ออกแบบตามมาตรฐาน NFPA-214 ตามที่แสดงใน Fig. 4

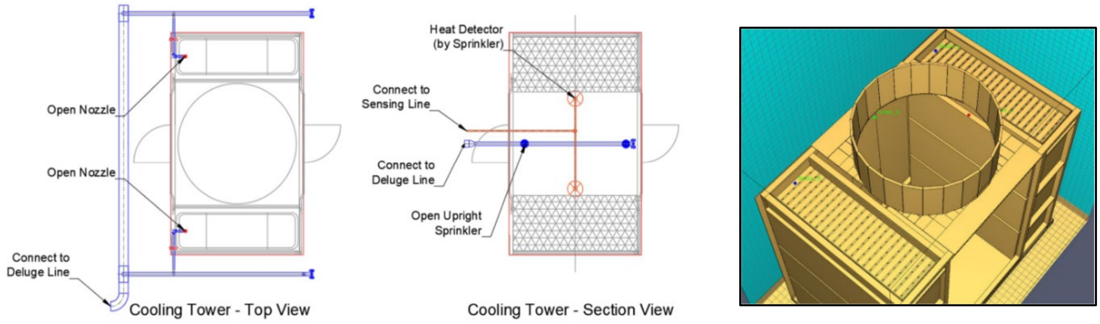


Fig. 4 Design and configuration accroding NFPA standard

ทำการทดลองในโปรแกรมจำลอง จากกรณีทั่วไป ไม่มีระบบดับเพลิงจะได้ผลตามที่แสดงใน Fig. 5

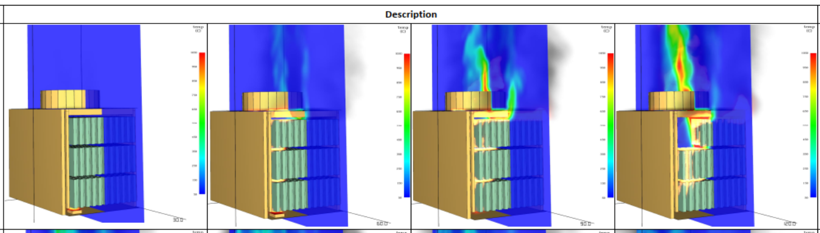
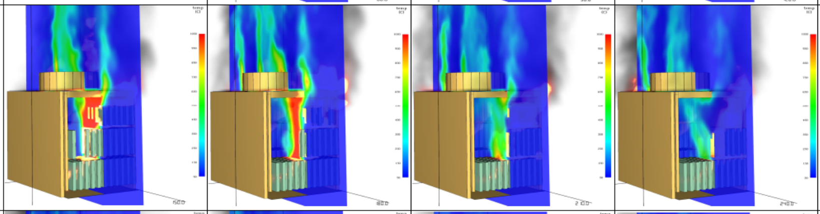
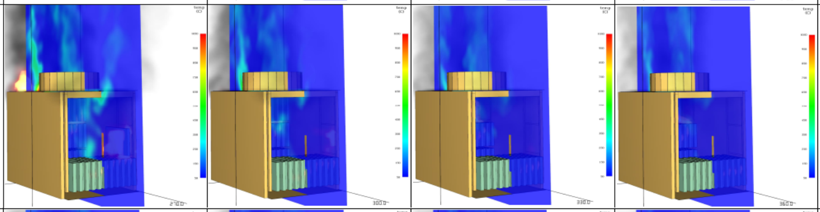
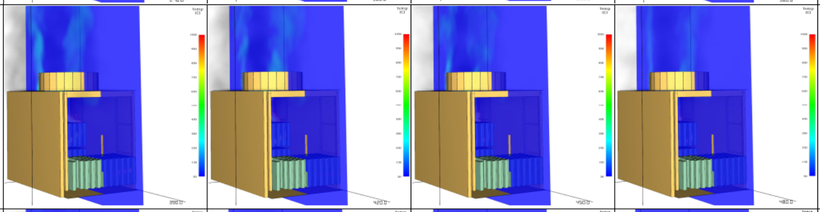
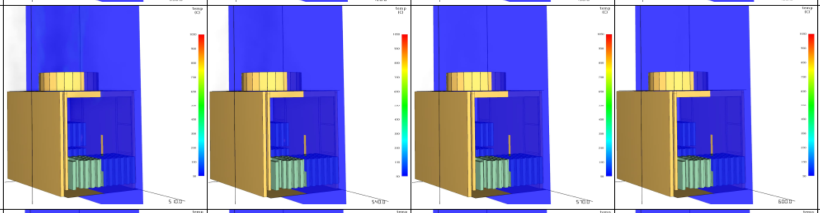
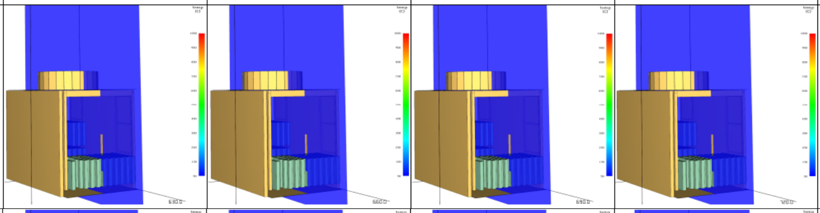
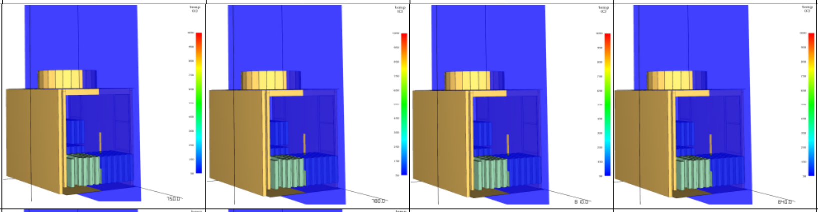
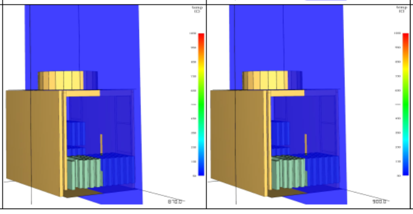
Time	Description	Remark
0~120		
121~240		
241~360		
361~480		
481~600		
601~720		
721~840		
841~900		

Fig. 5 Time frame in general case

ทำการทดลองในโปรแกรมจำลอง จากกรณีติดตั้งระบบดับเพลิงจะได้ผลตามที่แสดงใน Fig. 6

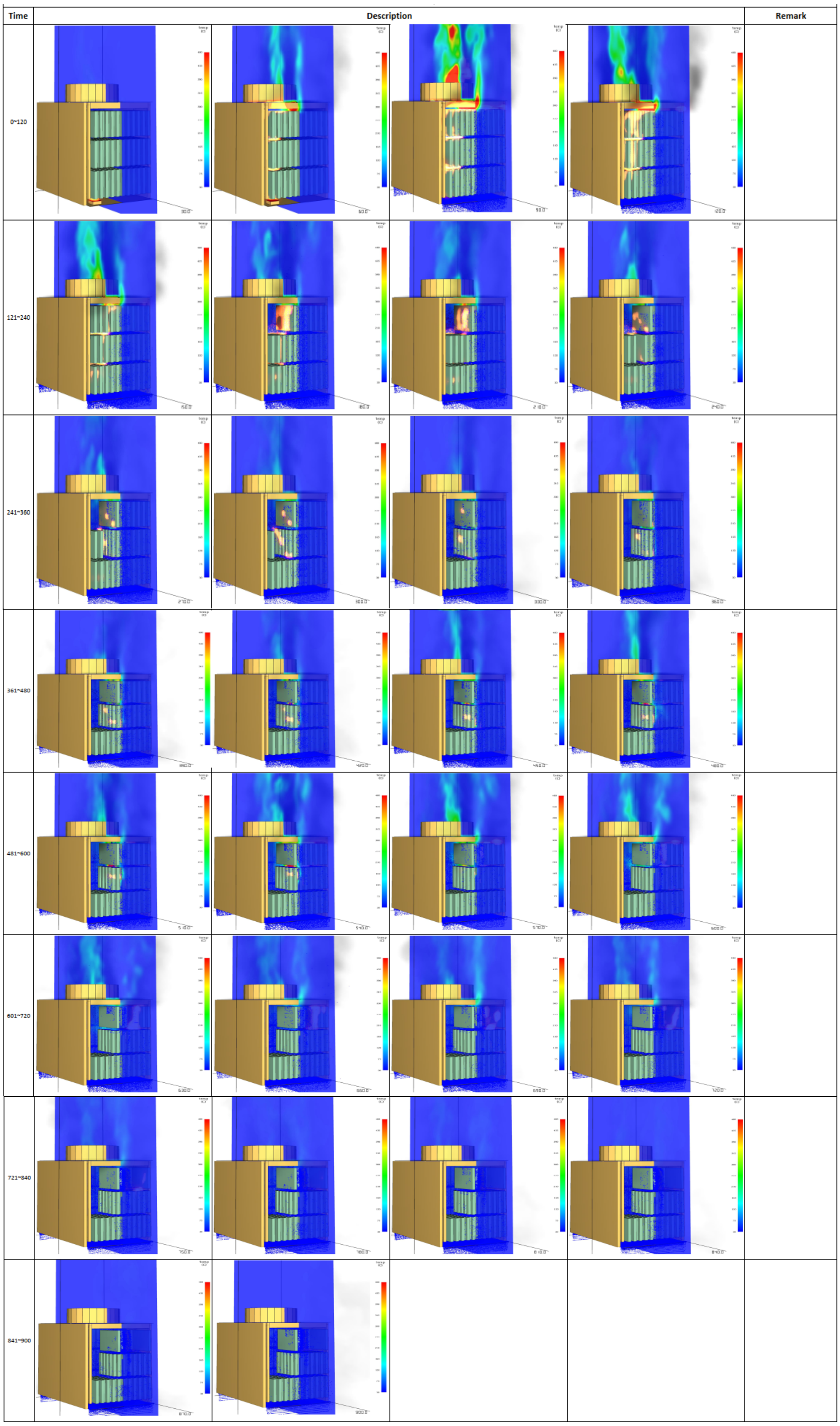


Fig. 6 Time frame in fire protection case

นำค่าที่ได้จากการทดลองมาแสดงในรูปแบบกราฟ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงค่าปลดปล่อยพลังงานความร้อน ตามที่แสดงใน Fig. 7

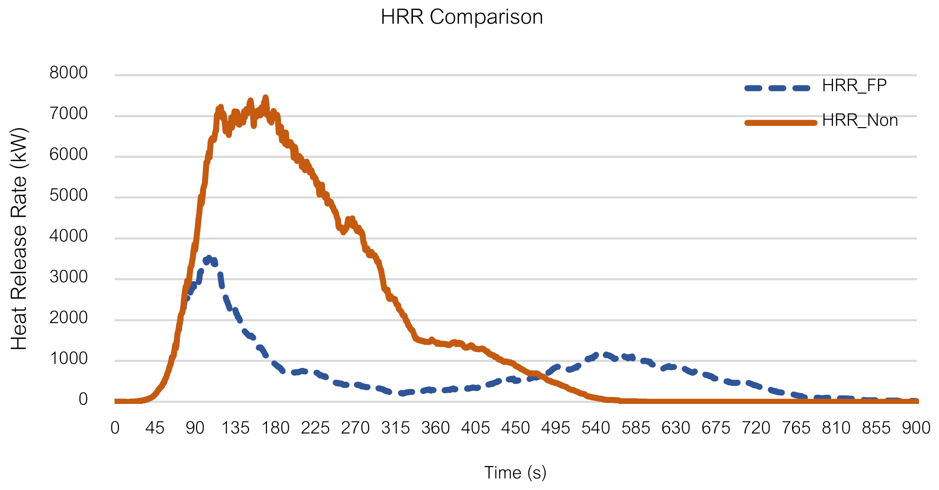


Fig. 2 Comparison graph on HRR between install and non-install fire protecion

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

เนื่องจากอุปกรณ์เครื่องหอหล่อเย็น (Cooling Tower) นี้จะมีขนาดที่ใหญ่ การทดลองค่าพลังงานตามมาตรฐาน อาจไม่สามารถทำโดยเครื่องทดสอบภายในห้องการทดลอง รวมถึงด้านความปลอดภัยและเป็นการอนุรักษ์ภาวะโลกร้อน ดังนั้นการจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ จึงมีความเหมาะสมในการหาค่าพลังงาน (HRR) และการเปรียบเทียบ ก่อนและหลังมีระบบดับเพลิงที่เป็นมาตรฐานสากล

การเผาไหม้จากกราฟแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมโดยรวมของเชื้อเพลิงหลักจากวัสดุติดไฟที่เป็นส่วนประกอบหลัก ของหอหล่อเย็นนี้ จากผลการทดลองก็สามารถแสดงให้เห็นค่าพลังงานที่ปล่อยจากกระบวนการ Pyrolysis จนเชื้อเพลิง หมดหรือไม่มีฟลักซ์ความร้อนมาเสริม-เพิ่มเติม จึงทำให้หยุดการเผาไหม้ในที่สุด

โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องหอหล่อเย็นที่ไม่มีระบบดับเพลิงและมีระบบดับเพลิงตามมาตรฐานสากล ให้เห็นถึงความสามารถป้องกันการลุกลามของเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสทธิภาพ ด้วยเหตุผลดังกล่าว

ทั้งนี้ในส่วนของการออกแบบวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หัวกระจายน้ำในระบบดับเพลิงรวมถึงอุปกรณ์ ตรวจจับความร้อนนั้น ยังคงต้องการการจัดวางตำแหน่งให้ถูกต้องตามระยะที่ระบุในมาตรฐานที่กำหนด เพราะส่งผล โดยตรงกับประสิทธิภาพในการดับเพลิง

หากหอหล่อเย็นที่ลักษณะที่แตกต่างจากชนิดที่กำหนด เช่น ไม่มีแผ่นปิดกั้นน้ำใต้ถาดน้ำร้อนหรือ ไม่มีฝาปิด ด้านบนถาดน้ำร้อน และลักษณะหอหล่อเย็นที่ไม่ใช่ชนิดอากาศไหลขวางทางน้ำ ก็สามารถศึกษาเพิ่มเติมในมาตรฐาน NFPA-214

ส่วนหัวกระจายน้ำชนิดหัวฉีดแบบลักษณะอื่นๆ ทางมาตรฐานสากล NFPA-214 ได้กำหนดลักษณะการใช้งาน จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ โดยที่ผลิตภัณฑ์นั้นต้องผ่านการรับรองของมาตรฐานการทดสอบระดับสากล เช่น UL Listed หรือ FM Approved ซึ่งเป็นที่ยอมรับในระดับสากล

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี ที่ให้แนวคิดในการสนับสนุนการทำงานวิจัยนี้ และคอยให้คำแนะนำรวมถึงหลักการในการทำงานวิจัยให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้อง พร้อมให้คำปรึกษาในความรู้ที่เกี่ยวข้อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถนำวิชาที่ได้รับการศึกษามาใช้ให้เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณพี่และเพื่อนวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัยรุ่น 11, 12 และ 13 ทุกคน ที่เป็นเพื่อนและคำปรึกษากับข้าพเจ้าในเรื่องต่างๆ ทั้งเรื่องการเรียนและเรื่องการทำงาน

ความสำเร็จในการศึกษาของข้าพเจ้าในครั้งนี้ ขอมอบเป็นรางวัลแห่งความสำเร็จให้กับบิดาและมารดา เพื่อให้เป็นความภูมิใจ และอีกทั้งยังสามารถนำมาใช้เป็นเกียรติประวัติแก่ตัวข้าพเจ้าเอง เพื่อความสำเร็จและความเจริญก้าวหน้าต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

กิตติ ภูษณะเบญญา, ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2554. ผลงานวิจัยการศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Piloted และการเผาไหม้ของกลุ่มพลาสติก. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. เอกสารประกอบการเรียน Fire Simulation with PyroSim 2560 ภาควิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2550. การศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. กรุงเทพฯ.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2565. พลศาสตร์อัคคีภัย (Fire Dynamics), พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ASHRAE. 2016. HVAC System and Equipment (SI) Handbook. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.

FM 1-06. 2020. Cooling tower. Factory Mutual Property Loss Prevention Data Sheets.

NFPA 13. 2019. Standard for Fire Protection. National Fire Protection Association. USA.

NFPA 214. 2019. Standard for water cooling tower. National Fire Protection Association. USA.

Quintiere J.G. 2017. Principles of Fire Behavior, second edition. Taylor & Francis Group. CRC Press.

Williamson, J.W. 2003. Characterizing Cigarette Lighter Flames to Reduce Unwanted Ignition. Department of Fire Protection Engineering, University of Maryland. Maryland, MD, USA.

การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากทะลายปาล์ม
An experimental study of spontaneous ignition of palm residues

ธนาเดช ริยาพันธ์[a], **วิชัย ศิวะโกศิษฐ**[b,*]
Thanadet Riyapan[a], Wichai Siwakosit[b,*]
[a]หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[a]Fire Protection Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: thanadet.r @ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากทะลายปาล์ม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณหาค่าคุณสมบัติการจุดติดไฟด้วยตนเองของกากทะลายปาล์มและเพื่อประมาณหาขนาดการกองเก็บกองกากทะลายปาล์มที่ไม่ทำให้เกิดการจุดติดไฟด้วยตัวเองของกองกากทะลายปาล์มของโรงสกัดปาล์มน้ำมันแห่งหนึ่งในภาคใต้ พื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จากการทดลองการจุดติดไฟได้เองของชิ้นทดสอบกากทะลายปาล์มรูปทรงลูกบาศก์มีความยาวด้าน 8, 9, และ 10 เซนติเมตร คำนวณค่าคุณสมบัติการจุดติดไฟด้วยตัวเอง $E/\overline{R}$ เท่ากับ 10707 K และค่า และ $A\,\Delta h_c$ / k เท่ากับ 2.22×10^{14} k/m^2 การประมาณขนาดการจัดเก็บของกากทะลายปาล์มที่ปลอดภัย สามารถทำได้โดยใช้ภาพกราฟผลเฉลยของความสัมพันธ์ของรัศมีและครึ่งหนึ่งของความสูงของกองกากทะลายปาล์มรูปทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยพื้นที่ใต้เส้นกราฟคือบริเวณที่ปลอดภัยไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองของกองกากทะลายปาล์มของโรงงานสกัดปาล์มน้ำมันแห่งหนึ่ง ในภาคใต้ พื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานีที่นำมาเป็นกรณีศึกษา โดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นที่ภาคใต้เท่ากับ 32.5 °C พบว่า ขนาดที่ปลอดภัยคือจุดใด ๆ ในพื้นที่ใต้เส้นกราฟ 32.5 °C เช่น ถ้า r_0 เท่ากับ 20 เมตร l_0 ที่ปลอดภัยจะต้องไม่เกิน 11 เมตร เป็นต้น

คำสำคัญ: กากทะลายปาล์ม, การลุกไหม้ได้เอง, สกัดปาล์มน้ำมัน

Abstract

This paper presents the results of an experimental study on the self-combustion of palm bunch waste. The purpose of this study was to estimate the self-igniting property of palm bunch waste and to estimate the size of the non-self-igniting palm bunch waste pile of the palm waste bunch of the palm extraction mill. One of the oil in the south, in the area of Surat Theni province. From the self-ignition experiments of cube-shaped palm pulp test specimens with side lengths of 8, 9, and 10 cm, self-ignition properties $E/\overline{R}$ were calculated to be 10707 K and A and $A\,\Delta h_c$ / k is equal to 2.22×10^{14} k/m^2. Estimating the safe storage size of palm bunch meal this can be done by using the solution graph of the relationship between the radius and half the height of the rectangular-shaped palm bunch mound at different temperatures. The area under the curve is a safe area that does not spontaneously combustion of the palm bunch residue pile of an oil palm mill in the southern part of Surat Theni province, taken as a case study. By using the average temperature of the southern area was 32.5 °C, it was found that what is the safe size point? In the area under the 32.5 °C curve e.g. if r_0 is 20 m, safe l_0 must not exceed 11 m etc.

Keywords: Oil palm extraction, Palm bunch meal, Spontaneous

คำนำ

อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจภาคใต้เป็นอันมากประเทศไทยมีเนื้อที่ให้ผลผลิตประมาณ 4.88 ล้านไร่ เป็นสินค้าการเกษตรสำคัญอันดับ 5 รองจาก ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง เกษตรกร 2.25 แสนครัวเรือน ภาคใต้มีเนื้อที่ให้ผลผลิตประมาณ 4.21 ล้านไร่ (86%) สินค้าเกษตรสำคัญอันดับ 2 รองจากยางพารา 22% ของมูลค่าสินค้าเกษตร 9% ของมูลค่าสินค้าอุตสาหกรรม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและธปท. สำนักงานภาคใต้, 2558 – 2560) สำหรับการเก็บกากทะลายปาล์มน้ำมันนิยมเก็บแบบเทกองบนพื้นโล่ง (Bulk Size) เนื่องจากมีปริมาณมาก โดยทะลายปาล์ม 1,000 กิโลกรัม จะได้น้ำมัน 250 กิโลกรัม โดยเป็นน้ำหนักจากเปลือก (CPO : Crude Palm Oil) ประมาณ 50 กิโลกรัม ส่วนที่เหลือประมาณ 750 กิโลกรัม เป็นของเสียคือส่วนที่เป็นกากทะลายปาล์มน้ำมันทำให้กองกากทะลายปาล์มน้ำมันมีขนาดตั้งแต่ 10,000 ถึง 200,000 ตัน โดยส่วนใหญ่ปริมาณจำนวนกากทะลายปาล์มน้ำมันขึ้นอยู่กับขนาดของโรงงาน โดยมีโรงงานอยู่ประมาณ 140 โรง มีกำลังการผลิตเฉลี่ย 38.3 แสนตัน/วัน ซึ่งอุปสรรคที่สำคัญของการจัดเก็บกากทะลายปาล์มแบบ Bulk Size คือการเกิดการระอุและไฟไหม้ขึ้นโดยเฉพาะในโรงงานปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ก่อให้เกิดความสูญเสียอย่างใหญ่หลวงต่อชีวิตและทรัพย์สิน ในบางครั้งยังส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยรอบอีกด้วย (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2525) ผู้วิจัยเองในสถานะพนักงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจึงมีความสนใจที่จะหาสาเหตุของการเกิดเพลิงไหม้และการป้องกันมิให้เกิดเพลิงไหม้ขึ้นมาได้อีก

จากอดีตจนถึงปัจจุบันมีนักวิจัยส่วนหนึ่งได้ทำการศึกษาการลุกไหม้ได้เองของวัสดุ โดยใช้ทฤษฎีของ Frank – Kamenetskii ในการวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น การทดลองการติดไฟได้เองของเศษไม้ (หฤษฎิ์, 2553) การศึกษากระบวนการลุกไหม้ได้เองของวัสดุที่มีลักษณะพรุน (Tamburello, 2011) การทดลองการลุกไหม้ได้เองของผ้าฝ้ายชุบน้ำมันเมล็ดฝ้ายด้วยวิธีตู้อบความร้อนและวิธีการหาจุดตัดอุณหภูมิ (Worden, 2011)

ทฤษฎีการลุกไหม้ได้เอง

การวิเคราะห์การลุกไหม้ได้เองใช้วิธีของ Frank-Kamenetskii (Frank, 1969) จะใช้ตัวเลข Damkohler (δ) ซึ่งตัวเลขนี้หมายถึง อัตราส่วนระหว่างพลังงานเคมีเนื่องจากการเผาไหม้ต่อพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการนำความร้อน โดยค่าตัวเลข Damkohler (δ) มีค่าตาม Equation 1

$$\delta = \left(\frac{E}{\bar{R}T_\infty}\right)\left[\frac{r_o^2(A\Delta h_c)e^{-\frac{E}{\bar{R}T_\infty}}}{kT_\infty}\right] \tag{1}$$

โดยที่ E (kJ/mol) คือ พลังงานกระตุ้น, $\bar{R}$ (kJ/mol.K) คือ ค่านิจคงที่ของแก๊ส, T_∞ (K) คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, A (kg/s.m^3) คือ Pre-exponent factor, Δh_c (kJ/kg) คือ ความร้อนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง, k (W/m.K) คือ สภาพการนำความร้อนของเชื้อเพลิง และ r_o (m) คือ ขนาด (ณัฐศักดิ์, 2560; Quintiere, 2006)

จาก Equation1 นำมาจัดรูปใหม่และใส่ค่าล็อคทั้งสองข้างของสมการ จะได้ Equation 2

$$\ln\left[\delta_c\left(\frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right)\right] = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\frac{1}{T_{ig}} + \ln\left[\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\left(\frac{A\Delta h_c}{k}\right)\right] \tag{2}$$

เทียบ Equation 2 กับสมการเส้นตรง $y = m_1x + c_1$ เมื่อ m_1 คือความชัน และ c_1 คือจุดตัดแกน y โดยกำหนดให้ $y = \ln\left[\delta_c \frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right]$, $m_1 = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)$, $x = \frac{1}{T_{ig}}$ และ $c_1 = \ln\left[\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\left(\frac{A\Delta h_c}{k}\right)\right]$ จะเห็นว่า $\ln\left[\delta_c \frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right]$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ $\frac{1}{T_{ig}}$ ถ้าพล๊อตกราฟเส้นตรงระหว่างตัวแปรทั้งสอง ความชันของกราฟจะให้ค่า $E/\bar{R}$ และค่าจุดตัดแกน y จะให้ค่า c_1 นำค่าทั้ง 2 แทนลงในสมการจุดตัดแกน y (c_1) จะสามารถคำนวณหาค่า $A\Delta h_c/k$ ของเชื้อเพลิงได้ นำมาคำนวณหาค่า Damkohler (δ) เพื่อไปเปรียบเทียบกับค่า Damkohler วิกฤติ (δ_c) หากค่า δ สูงเกินกว่าค่า δ_c แสดงว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยตัวเอง ที่สภาวะการพาความร้อนที่ผิวเชื้อเพลิงมีค่ามาก ($Bi \longrightarrow \infty$) ตัวเลข Damkohler วิกฤตจะมีค่าขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของก้อนเชื้อเพลิงเท่านั้น ในกรณีของก้อนเชื้อแพลิงรูปทรงกระบอกที่มีรัศมี r_o และครึ่งหนึ่งของความสูง l_o เท่ากันค่า Damkohler วิกฤติมีค่าเท่ากับ 2.84 โดยคำนวณมาจาก Equation 3

$$\delta_c = 2.0+0.841\left(\frac{r_o}{l_o}\right)^2 \qquad (3)$$

วิธีการคำนวณหาค่า $E/\bar{R}$ จากการทดลองมี 2 วิธีคือ

1. วิธีของ Frank-Kamenetskii

ดังการวิเคราะห์การลุกไหม้ได้เองของ Frank-Kamenetskii ข้างต้นทำให้ได้ค่า $E/\bar{R}$ และค่า $A\Delta h_c/k$ ซึ่งจะต้องหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เองที่ต่ำที่สุดของเชื้อเพลิงที่ทดลองในแต่ละภาชนะบรรจุรูปทรงกระบอกที่มีขนาดแตกต่างกันมากกว่าหนึ่งขนาด ทำให้ต้องทำการทดลองแบบลองผิดลองถูกหลายครั้งและใช้เวลาหลายชั่วโมงในแต่ละครั้ง

2. วิธีจุดตัดอุณหภูมิ (Crossing point)

เพื่อแก้ปัญหาที่จะต้องทำการทดลองหลายครั้ง Jones et al. (1996, 1998) ได้เสนอทางเลือกในการหาค่า $E/\bar{R}$ ของเชื้อเพลิงจากการทดลองด้วยวิธีจุดตัดอุณหภูมิ พิจารณาที่อุณหภูมิกึ่งกลาง (T_o) ตัดกับอุณหภูมิตู้อบ (T_∞) โดยเมื่อจุดที่อุณหภูมิตัดกันจะพบค่าแกร์เดียนของอุณหภูมิภายในเนื้อวัตถุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\nabla T = 0$) ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานของชิ้นทดสอบเมื่อ $dT/dx = 0$ ที่จุดตัดอุณหภูมิจะลดรูปดัง Equation 4 ซึ่งในทุกๆการทดลองจะพบจุดตัดอุณหภูมิเสมอไม่ว่าอุณหภูมิของตู้อบ (T_∞) จะเท่าหรือไม่เท่ากับค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เอง (T_{ig}) ก็ตาม

$$\rho C_p \left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP} = \dot{Q}_R''' = Ae^{\frac{-E}{\bar{R}T_{CP}}}\Delta h_c \qquad (4)$$

เมื่อตัวห้อย CP หมายถึงค่าของตัวแปรที่จุดตัดอุณหภูมิ (Crossing point)

จาก Equation 4 นำมาจัดรูปใหม่และใส่ค่าล็อคทั้งสองข้างของสมการ จะได้ Equation 5

$$\ln\left[\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP}\right] = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\frac{1}{T_{CP}} + \ln\left[\frac{A\Delta h_c}{\rho C_p}\right] \qquad (5)$$

เทียบ Equation 5 กับสมการเส้นตรง $y = m_2x + c_2$ เมื่อ m_2 คือความชัน และ c_2 คือจุดตัดแกน y โดยกำหนดให้ $y = \ln\left[\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP}\right]$, $m_2 = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)$, $x = \frac{1}{T_{CP}}$ และ $c_2 = \ln\left[\frac{A\Delta h_c}{\rho C_p}\right]$ จะเห็นว่า $\ln\left[\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP}\right]$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ $\frac{1}{T_{CP}}$ ถ้า

พล็อตกราฟเส้นตรงระหว่างตัวแปรทั้งสอง ความชันของกราฟจะให้ค่า $E/\overline{R}$ เช่นเดียวกันกับวิธีของ Frank-Kamenetskii และสามารถหาค่าได้ในทุกๆอุณหภูมิของตู้อบ (T_∞) และทุกๆขนาดของชิ้นทดสอบที่ทำการทดลอง

อุปกรณ์และวิธีการ

1.ชิ้นทดสอบ คือ กากทะลายปาล์ม เป็นกากอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเป็นส่วนหนึ่งของน้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการหนีบก่อนที่จะได้น้ำมัน ซึ่งเป็นส่วนของเปลือกหรือสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำมันปาล์ม

Fig. 1 Palm bunch meal test piece

2. ภาชนะบรรจุ (Basket) รูปทรงลูกบาศก์จำนวน 3 ขนาด คือ ขนาดด้านละ 8 เซนติเมตร, 9 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร (512, 729 และ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ)

Fig. 2 Palm bunch meal containers

3. เครื่องบันทึกข้อมูล Data Acquisition รุ่น Personal Daq /54 และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Thermocouple K-Type (0 °C ถึง 482 °C) ความยาว 2 เมตร จำนวน 3 เส้น

Fig. 3 Data Acquisition Data Logger and Thermocouple K-Type Temperature Instrument

4. คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูล

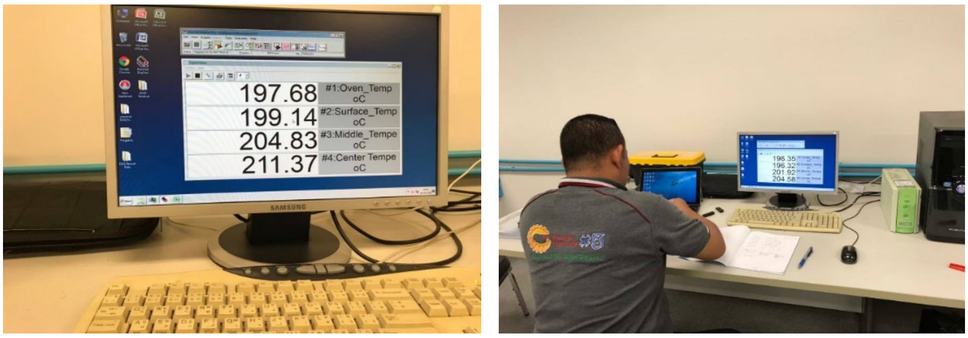


Fig. 4 Computer data recorder

5. ตู้อบ Memmert รุ่น UNB100 ความสามารถอุณหภูมิช่วง 0–220 °C ความละเอียด +0.5 °C

Fig. 5 Incubator Memmert Model UNB100

วิธีการทดลอง

การทดลองหาอุณหภูมิการลุกไหม้ได้เองของกากทะลายปาล์มน้ำมัน ดำเนินการโดยเริ่มจากเก็บตัวอย่างจากกองกากทะลายปาล์มนำมาย่อยเพื่อใช้เป็นชิ้นทดสอบ กำหนดภาชนะบรรจุ (Basket) รูปทรงลูกบาศก์มีความยาวด้าน 8, 9, และ 10 เซนติเมตร และติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ Thermocouple K-Type จำนวน 3 จุด ได้แก่ ที่กึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ และภายในตู้อบตาม จากนั้นนำชิ้นทดสอบเข้าตู้อบ ตั้งค่าตู้อบให้ทำงานตามอุณหภูมิที่กำหนด (ปรับเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 25 °C)

1. เตรียมตัวอย่างกากทะลายปาล์มจากฤดูการเก็บเกี่ยวปี 2560 จากโรงงานปาล์มน้ำมันของเกษตรกรในอำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี เพื่อใช้เป็นชิ้นทดสอบ โดยควบคุมตัวแปร เช่น น้ำหนัก ความหนาแน่น และความชื้นให้เป็นค่าเริ่มต้นเหมือนกับสภาพการที่เป็นจริงที่สุด

2. สอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ มีขั้นตอนดังนี้

1) นำเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple K-Type) มาวัดอุณหภูมิน้ำแข็งเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ และอ่านค่าอุณหภูมิของเครื่องมือวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับค่าของเทอร์โมมิเตอร์ ควบคุมไม่ให้ค่าต่างกันเกิน 0.1 °C

2) ทั้ง 3 ขนาด โดยกำหนดความหนาแน่นให้เท่ากับ 0.10 g/cm^3 ทุกชิ้นทดสอบ นำเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple K-Type) มาวัดอุณหภูมิน้ำเดือดเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ อ่านค่าอุณหภูมิของเครื่องมือวัดอุณหภูมิกับเปรียบเทียบกับค่าของเทอร์โมมิเตอร์ ควบคุมไม่ให้ค่าต่างกันเกิน 0.1 °C

3. นำกากทะลายปาล์มน้ำมันใส่ภาชนะบรรจุ (Basket) รูปทรงลูกบาศก์เซนติเมตร

Fig. 6 Add palm bunch meal in a cube shaped container, size 8, 9 and 10 cm

4. นำภาชนะบรรจุชิ้นทดสอบเข้าตู้อบ โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ จำนวน 3 จุด ได้แก่ที่ กึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ และภายในตู้อบ (อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม)

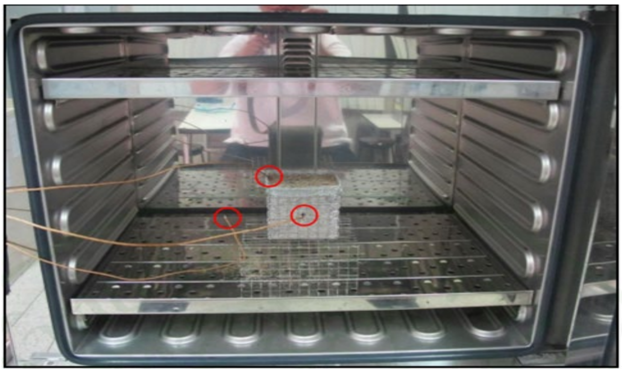


Fig. 7 Put the test specimen container into the incubator by installing 3 temperature measuring devices

5. ติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูลกับคอมพิวเตอร์
6. ตั้งค่าตู้อบให้ทำงานตามอุณหภูมิที่กำหนด (ปรับเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 2.5 °C) โดยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อหาค่าอุณหภูมิสูงสุดสิ่งแวดล้อม ณ จุดที่ทำให้อุณหภูมิกึ่งกลางของชิ้นทดสอบมีค่ามากกว่าอุณหภูมิผิวของชิ้นทดสอบและเกิดการลุกไหม้ได้เอง (T_{ig}) โดยเปิด Air Valve สูงสุด เพื่อให้มีการไหลเวียนอากาศภายในตู้อบมากที่สุด
7. เริ่มบันทึกค่าทดลอง โดยแต่ละครั้งของการทดลองกำหนดระยะเวลาการรอคอย 2 ชั่วโมง 30 นาที นับจากจุดที่อุณหภูมิกึ่งกลางเท่ากับอุณหภูมิผิวของชิ้นทดสอบ
8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3–7 ในชิ้นทดสอบทั้ง 3 ขนาดที่เตรียมไว้ เพื่อให้ได้อุณหภูมิจุดติดไฟ T_{ig} ของทั้ง 3 ชิ้นทดสอบ
9. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองโดยนำทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาอธิบายผลกรทดลองและประมาณขนาดการจัดเก็บของกองกากทะลายปาล์มน้ำมันที่ปลอดภัย ไม่เกิดอัคคีภัยที่มีสาเหตุมาจากจุดติดไฟได้เอง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จาก Fig. 9 การทดลองของชิ้นทดสอบขนาด 8 เซนติเมตร พบว่าอุณหภูมิตู้อบที่ทำให้อุณภูมิที่จุดกึ่งกลางมีค่ามากกว่าอุณหภูมิตู้อบและเกิดการลุกไหม้ได้เอง T_{ig} เท่ากับ 200 °C (มีการทดลองซ้ำได้ค่าตรงกัน ตาม Fig. 10) อุณหภูมิตู้อบที่ 197.5 °C ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เอง จากการทดลอง พบว่าลักษณะการลุกไหม้ของชิ้นทดสอบจะเป็นการลุกไหม้ที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง โดยเริ่มลุกไหม้จากจุดกึ่งกลางชิ้นทดสอบและขยายกว้างออกไปสู้ด้านผิวของชิ้นทดสอบ การลุกไหม้ทำ

ให้เนื้อของกากทะลายปาล์มเปลี่ยนเป็นสีดำ เนื่องจากเกิดกระบวนการไพโรไลซิส และปฏิกิริยาเคมีคายความร้อนออกมา ดัง Fig. 9

Fig. 8 Combustion characteristics

อุณหภูมิจุดติดไฟได้เอง (T_{ig})

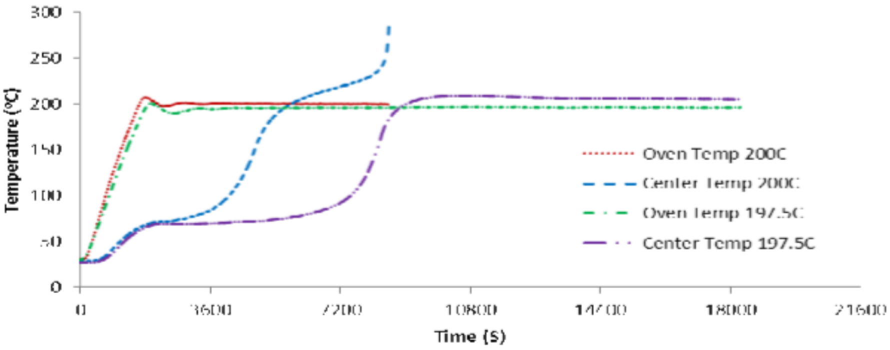


Fig. 9 Experiment to determine the ignition temperature of an 8-centimeter test container

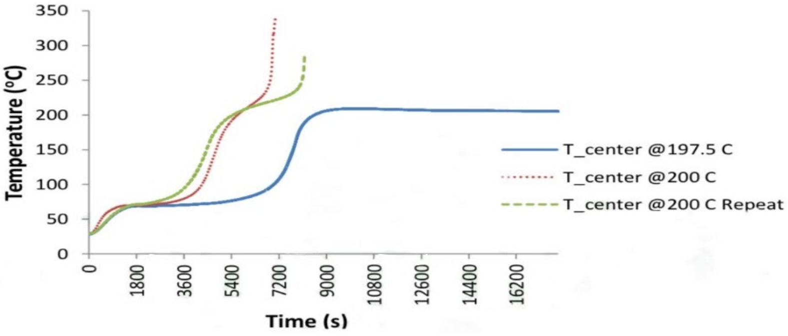


Fig. 10 Experimental results of the ignition temperature of an 8-centimeter container

จาก Fig. 10 พบว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของกากทะลายปาล์มน้ำมันในภาชนะบรรจุรูปทรงลูกบาศก์ ความยาว 8 เซนติเมตร การลุกไหม้ได้เอง T_{ig} เท่ากับ 200 °C (ผลการทดลองซ้ำได้ค่าตรงกัน) อุณหภูมิตู้อบที่ 197.5 °C ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เอง

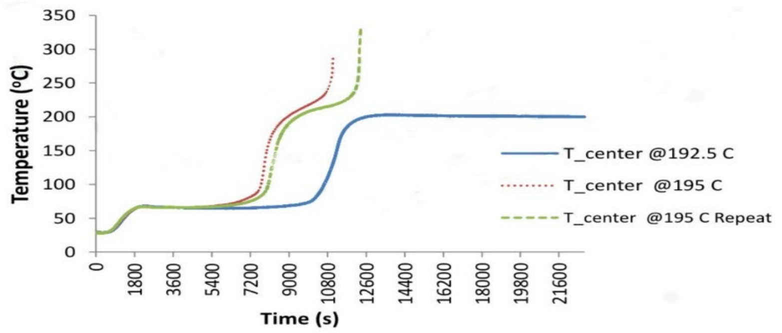


Fig. 11 Experimental results of the ignition temperature of a 9-centimeter container

จาก Fig. 11 พบว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของกากทะลายปาล์มน้ำมันในภาชนะบรรจุรูปทรงลูกบาศก์ ความยาว 9 เซนติเมตร การลุกไหม้ได้เอง T_{ig} เท่ากับ 195 °C (ผลการทดลองซ้ำได้ค่าตรงกัน) อุณหภูมิตู้อบที่ 192.5 °C ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เอง

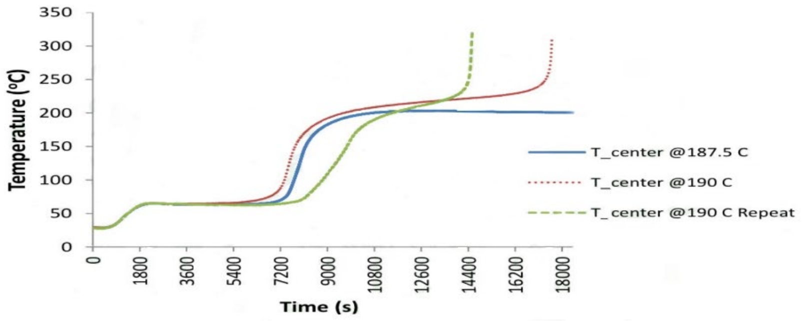


Fig. 12 Experimental results of the ignition temperature of a 10-centimeter container

จาก Fig. 12 พบว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของกากทะลายปาล์มน้ำมันในภาชนะบรรจุรูปทรงลูกบาศก์ ความยาว 10 เซนติเมตร การลุกไหม้ได้เอง T_{ig} เท่ากับ 190 °C (ผลการทดลองซ้ำได้ค่าตรงกัน) อุณหภูมิตู้อบที่ 187.5 °C ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เอง

สรุป

การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากทะลายปาล์มน้ำมัน เพื่อหาคุณสมบัติการลุกไหม้ได้เอง โดยใช้ทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii ในการวิเคราะห์ผลการทดลองชิ้นเชื้อเพลิงทดสอบ ขนาด รูปทรง และอุณหภูมิภายในตู้อบตามที่กำหนด ได้ค่า E / $\bar{R}$ เท่ากับ 10707K และค่า AΔh_c / k เท่ากับ 2.22×10^{14} K/m^2 การประมาณขนาดการจัดเก็บของกองกากทะลายปาล์มน้ำมันที่ปลอดภัยไม่เกิดอัคคีภัยที่มีสาเหตุจากการจุดติดได้เองเองสามารถทำได้โดยใช้ภาพกราฟผลเฉลยของความสัมพันธ์ของรัศมีและครึ่งหนึ่งของความสูงของกองกากทะลายปาล์มน้ำมันรูปทรงกระบอกที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยพื้นที่ใต้เส้นกราฟคือบริเวณที่ปลอดภัยไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมินั้น ๆ สำหรับกองกากทะลายปาล์มน้ำมันในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่ง ที่ได้นำมาเป็นกรณีศึกษา โดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นที่ภาคใต้เท่ากับ 32.5 °C พบว่า ขนาดที่ปลอดภัย คือจุดใด ๆ ในพื้นที่ใต้เส้นกราฟ 32.5 °C เช่น ถ้า r_0 เท่ากับ 20 เมตร l_0 ที่ปลอดภัยจะไม่เกิด 11 เมตร

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความรู้และข้อเสนอแนะ ตลอดจนอนุเคราะห์ให้ใช้ตู้อบและห้องปฏิบัติการทดสอบจนสำเร็จการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา. สถิติอุณหภูมิสูงที่สุดในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทยระหว่าง พ.ศ. 2494 –2561. https://www.tmd.go.th/programs/uploads/tempstat/max_stat_latest.pdf

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. พลศาสตร์อัคคีภัย. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไทยรัฐ. 2552. ไฟไหม้ไซโลถั่วเหลืองคนไทยฝั่งเขมรวอด 20 ล้าน. https://www.thairath.co.th/content/43434, 22 ตุลาคม 2552.

เบญจมาศ ทองศรี. 2558. การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของขี้เลื่อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงษ์ศักดิ์ พงษ์สัมณะ. 2558. การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพ็ญอาภา บุญมาดี. 2559. การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของแกลบข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Frank-Kamenetskii, D.A. 1969. Diffusion and Heat in Chemical Kinetic, 2nd ed. Plenum Press. New York, NY, USA.

Quintiere, J.G. 2006. Fundamentals of Fire Phenomena. John Wiley & Sons Ltd. UK.

Jones, J.C., Chiz, P.S., Koh, R., Matthew, J. 1996. Kinetic parameter of oxidation of bituminous coals from heat-release rate measurements. Fuel 75: 1755–1757.

Jones, J.C., Henderson, K.P., Littlefair, J., Rennie, S. 1998. Kinetic parameters of oxidation of coals by heat-release measurement and their relevance to self-heating tests. Fuel 77: 19–22.

Nathasak, B., Pongsak, P. 2017. Spontaneous Ignition of Bagasse Stockpiles in Thailand. Engineering Journal 21: 38–50.

การประเมินปริมาณน้ำมันในผลปาล์มโดยการตรวจจับภาพร่วมกับเทคนิคดีพเลิร์นนิ่ง

Oil palm content estimation using image detection with deep learning

<u>พีรศุษม์ ไชยศรีมณีพรรณ</u>[a], รยากร นกแก้ว[b], ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[a,*]

<u>Peerasutth Chaisrimaneepan</u>[a], Rayakorn Nokkaew[b], Taweedej Siritanapipat[a,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Center of Excellence of Oil Palm, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: taweedej.s@ku.th

บทคัดย่อ

น้ำมันปาล์มเป็นองค์ประกอบสำคัญของเครื่องอุปโภคและบริโภค ที่มีความผันผวนของราคาและความต้องการสูง ทำให้การเก็บผลผลิตก่อนสุกพอดีทำให้ชาวสวนปาล์มสูญเสียรายได้ เนื่องจากอาศัยมาตรฐานในการแบ่งระดับความสุก โดยดูจากสี ปริมาณน้ำมัน และจำนวนผลร่วง อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติการซื้อขายอาศัยการตรวจสอบด้วยตาโดยผู้เชี่ยวชาญ งานวิจัยนี้ทำการประเมินปริมาณน้ำมันในผลปาล์มพันธุ์สุราษฯ 2 โดยเทคนิคคอนโวลูชั่นที่ 100 epoch ที่ 10, 15 และ 23 layer ตามลำดับ ในการดึงจุดเด่นและการจำแนกภาพด้วยโมเดลที่สร้างขึ้นเอง เพื่อทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์มด้วยเทคนิคการปรับแต่งภาพด้วยโปรแกรม MATLAB ด้วยความแม่นยำสูงสุด 83.1031 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: การตรวจจับภาพ, การประเมินปริมาณน้ำมัน, ดีพเลิร์นนิ่ง

Abstract

Palm oil is an important constituent of consumer goods with price fluctuations and demand as result, the harvesting before ripening causes palm growers lose their income because it relies on classification standard of ripeness by looking at the color, oil content and number of fallen fruitlet. However, trading relies on visual inspection by experts. This research is to estimate oil content in Surat 2 palm’s with convolution technique at 100 epochs at 10, 15 and 23 layers, respectively for image extraction and classification by using our model with image manipulation technique in MATLAB with a maximum accuracy of 83.1031 percent.

Keywords: Deep learning, Image detection, Oil palm content

คำนำ

ปาล์มน้ำมันมีต้นกำเนิดจากภาคตะวันออกของทวีปแอฟริกาเมื่อราว 200 ปีก่อนภายหลังจึงมีการนำเข้ามาปลูกที่เกาะชวาประเทศอินโดนีเซียซึ่งเป็นปาล์มน้ำมันพันธุ์ดูราที่ถือเป็นต้นกำเนิดของพันธุ์ปาล์มในประเทศแถบอาเซียนในปัจจุบัน (องค์กรมหาชน, 2550) การปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงที่ผ่านมา (ปี 2563 ถึง 2564) จากการปรับตัวสูงขึ้นของราคาน้ำมันดีเซลในตลาดโลก เนื่องมาจากการลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิง การลดกำลังการผลิต และภาวะสงคราม ส่งผลให้เกิดการสนับสนุนน้ำมันดีเซลที่มีส่วนผสมของน้ำมันจากพืช เกษตรกรจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจว่าอัตราส่วนของน้ำมันที่สกัดได้ต่อผลผลิตทะลายปาล์ม (oil extraction ratio) คือตัวบ่งชี้ปริมาณน้ำมัน (ปรีดาวรรณ และคณะ, 2558) การพัฒนาของปาล์มเริ่มต้นจนกระทั่งสุกใช้เวลาประมาณ 20 สัปดาห์ โดยเริ่มมีการสังเคราะห์น้ำมันหลังสัปดาห์ที่ 14 และการสะสมน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในสัปดาห์ที่ 15 จนกระทั่งสัปดาห์ที่ 20 (จันทรนิยม, 2562) และ สูงสุดในระหว่างสัปดาห์ที่ 19 ถึง 20 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) โดยสุราษฎ์ธานี 2 เป็นสายพันธ์ที่ได้รับความนิยม ให้ผลผลิตจำนวนมาก ทนต่อสภาพแวดล้อม และปริมาณน้ำมันสูง (ศิริชัย และคณะ, 2540) อย่างไรก็ดีปาล์มจากแหล่งปลูกที่แตกต่างกัน จะมีน้ำหนัก, ขนาด และ สี โดยที่ความสุกของผลปาล์มในทะลายแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน จึงแบ่งการวัดออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ยอดทะลาย กลางทะลาย และ ปลายทะลาย (Mohd Hafiz Mohd Hazir และ คณะ, 2012) นอกจากนี้ สีผิวของทะลายปาล์ม เปลี่ยนไปตามระดับความสุกเนื่องจากปริมาณแคโรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์ (Bensaeed et al., 2014)

การซื้อขายปาล์มอาศัยมาตรฐาน มกษ. 5702-2562 ในการแบ่งระดับความสุก โดยดูจากสีร่วมกับปริมาณน้ำมันที่ต้องสกัดได้ ในทางปฏิบัติการซื้อขายอาศัยการตรวจสอบโดยผู้เชียวชาญซึ่งมักเกิดความผิดพลาด (Fadilah et al., 2012) ดังนั้นจึงมีแนวคิดการใช้วิธีการเรียนรู้เชิงลึกด้วยอัลกอริธึมโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Convolution neural network ในการดึงจุดเด่นและการจำแนกภาพของมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ (Pattansarn and Sriwiboon, 2020) โดยแบ่งข้อมูล (Data set) ออกเป็น 2 ส่วน Train set และ Validation set 30 ต่อ 70 สุกของปาล์ม ซึ่งมีโอกาสสูงที่จะเกิดความผิดพลาด ความไม่เที่ยงตรง และความอยุติธรรม งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการประเมินปริมาณน้ำ มันในผลปาล์มโดยจำกัดที่สายพันธุ์สุราษฐานี 2 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แน่นอน โดยอาศัยการจับภาพ (Image detection) แบ่งผลปาล์มออกเป็น 6 ชนิด คือ ผลจากทะลายนอก (A) และ ผลจากทะลายใน (B) โดยแบ่งย่อยเป็น (บน(1)-กลาง(2)-ล่าง(3) และ 70 ต่อ 30 ตามลำดับ ร่วมกับสถาปัตยกรรมที่สร้างขึ้น, Resnet – 50,Modifed Alexnet และ Modified VGG-16 เพื่อทำนายปริมาณน้ำมันที่อยู่ภายในผลปาล์ม เทคนิคการปรับแต่งภาพ Image Augmentation ในการเพิ่มและแก้ไข Data set ด้วยโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

แนวคิดในการออกแบบและดำเนินการ

แนวคิดของการทดลองในงานวิจัยนี้เริ่มจากการระบุสายพันธ์และตำแหน่งที่ทำการศึกษารวมถึงทำการจัดเก็บภาพเพื่อเตรียมนำผลไปวิเคราะห์ จากนั้นแบ่งวิธีการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ การหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการ Soxhlet Extraction เพื่อหาปริมาณน้ำมัน และ การประมวลผลภาพด้วยปัญญาประดิษฐ์โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลภาพเพื่อทำการประมวลผลจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการ Train, Validate รวมถึงการ Test ด้วยปัญญาประดิษฐ์เพื่อใช้ทำนายปริมาณน้ำมันในผลปาล์ม ดัง Fig. 1

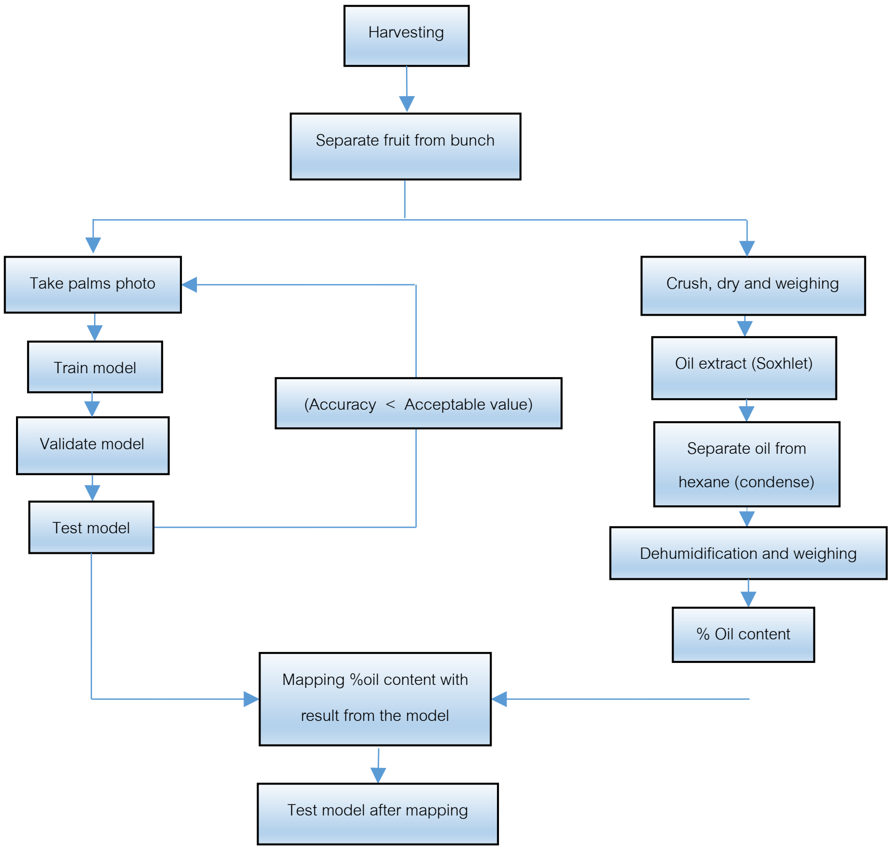


Fig. 1 Flow Chart for Oil Palm Content Estimation

ในการหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันจำเป็นต้องทำการแบ่งตำแหน่งของผลปาล์มเนื่องจากแต่ละส่วนมีระดับความสุกและให้ปริมาณน้ำมันไม่เท่ากันเป็น นอก (A) และ ใน (B) รวมถึง ตำแหน่ง บน(1) กลาง(2) ล่าง(3) ทำให้ได้ผลปาล์มที่ถูกแบ่งดัง Fig. 2

Fig. 2 Palm segmentation after and before grinding

การหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในห้องปฏิบัติการ

หั่นสไลด์เนื้อเปลือกนอกของผลปาล์มอย่างละ 100 กรัม ทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดละเอียดและตวงเนื้อเปลือกนอก อย่างละ 3 กรัม บรรจุลงใน Cellulose Thimble นำ

ใส่ลงใน Column ของ Soxhlet Extractor ดัง Fig. 3 (ซ้ายมือ) พร้อมทำการตวง Hexane 200 ml. บรรจุลงขวดก้นกลม พร้อมติดตั้งชุด Condenser แล้วให้ความร้อนประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยก Hexane ออกด้วยเครื่อง Rotary evaporator พร้อมเปิดใช้งานเครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum Pump), heater และ spinner ของเครื่อง Rotary evaporator เพื่อระเหย Hexane ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และทำการระเหยน้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

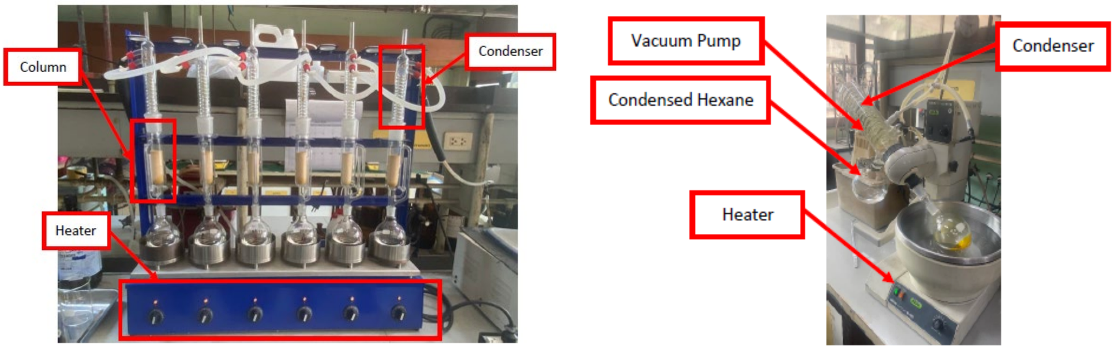


Fig. 3 Soxhlet Extractor and Rotary evaporator

การประมวลผลภาพด้วยปัญญาประดิษฐ์

งานวิจัยนี้อาศัยโครงสร้างสถาปัตยกรรมที่จะใช้ในการประมวลผลภาพด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชั่น (Convolution Neural Network : CNN) ในโปรแกรม MATLAB โดยเริ่มจากการสุ่มภาพขึ้นมา 84 ภาพ พร้อมทั้งการปรับขนาดภาพให้มีขนาดเล็กลงเป็น 64×64×3 เพื่อให้ข้อมูลที่ใช้ในการเทรนเล็ก ใช้เวลานานประมวลผลสั้น พร้อมทั้งการทำและไม่ทำ Image augmentation ก่อนนำไปทำการ Training และ Validation Set ในอัตราส่วน 30 : 70 และ 70 : 30 ด้วย Convolution Layer ตั้งแต่ 10 เพิ่มไปจนถึง 23 ชั้น ตามด้วย Fully connected layer และ Softmax ตามลำดับ เพื่อ Classify และสร้าง Output Layer เพื่อส่งค่าของการประมวลผลหรือการทำนาย ดัง Fig. 4 ที่ 100 รอบการประมวลผล (epoch)

```
imageSize = [64 64 3];
datastore = augmentedImageDatastore(imageSize,imdsTrain,'DataAugmentation',augmenter);

layers = [ ...
    imageInputLayer(imageSize,'Name','input')
    convolution2dLayer(3,8,'Padding','same')
    batchNormalizationLayer
    reluLayer
    maxPooling2dLayer(2,'Stride',2)
    convolution2dLayer(3,16,'Padding','same')
    batchNormalizationLayer
    reluLayer
    maxPooling2dLayer(2,'Stride',2)
    convolution2dLayer(3,32,'Padding','same')
    batchNormalizationLayer
    reluLayer

    fullyConnectedLayer(6)
    softmaxLayer
    classificationLayer ];
```

Fig. 4 Convolution and Fully Connected Layer

การคำนวนเปอร์เซ็นต์น้ำมัน

วิธีการคำนวนหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันจากเปลือกปาล์มอบแห้งบดละเอียดด้วยอ้างอิงวิธีการและสมการในการคำนวนตามมาตรฐาน American Oil Chemists Society (AOCS) official method AC – 3 – 44 ตาม Equation 1 โดย w_1

คือน้ำหนักของเปลือกปาล์มบดละเอียด w_2 คือ น้ำหนักของขวดก้นกลม w_3 น้ำหนักของขวดก้นกลมและน้ำมันภายหลังการสกัด

$$\% \text{ Oil Content} = \left(\frac{w_3 - w_2}{w_1}\right) \times 100 \quad (1)$$

การหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์มจากผลการทำนาย

เพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลปาล์มจากผลของการทำนายด้วย model ที่ได้ทำการสร้างขึ้นทำการดึงข้อมูลความน่าจะเป็นในรูปของ vector ที่ป้อนเข้าสู่ softmax layer ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และ มีผลรวมเท่ากับ 1 มาใช้ในการหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันโดยกำหนดให้ w_i คือ เวกเตอร์ของความแม่นยำที่ได้จากการทำนายแต่ละค่าของ A1, A2, A3, B1, B2 และ B3 และ xi คือ เวกเตอร์ของเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่ได้จากการสกัดและคำนวนหาเปอร์เซ็นต์จากห้องทดลอง

$$\sum_{i=1}^{n} x_i w_i = \%\text{Oil Content from Estimation} \quad (2)$$

ผลและวิจารณ์การทดลอง

ผลการหาเปอร์เซ็นต์น้ำมันในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดลองหาปริมาณน้ำมันจากเปลือกนอกของผลปาล์มที่อยู่บริเวณชั้นนอก (A) และ ชั้นใน (B) โดยทำการแบ่งกลุ่มออกเป็นผลจากบริเวณ บน(1), กลาง(2) และ ล่าง(3) ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ(ครั้ง) มีปริมาณตัวอย่าง 12ชุด โดย A1 มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ย 85.4989 เปอร์เซ็นต์, A2 มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ย 83.6944 เปอร์เซ็นต์ , A3 มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ย 83.2781 เปอร์เซ็นต์ และ B1 มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ย 76.2071 เปอร์เซ็นต์, B2 มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ย 72.2772 เปอร์เซ็นต์, B3 มีปริมาณน้ำมันเฉลี่ย 70.1973 เปอร์เซ็นต์ และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยไม่เกิน 1 (SD < 1) หรือ กล่าวคือข้อมูลหรือปริมาณน้ำ มันที่ได้จากการทดลองนี้ใกล้เคียงกันและมีความน่าเชื่อถือ ดัง Table 1

Table 1 Percentage of oil content and standard deviation

No.	Dry palm kernel (W_1), gram	Round Bottom Bottle (W_2), gram	Oil Palm and Round Bottle (W_3), gram	Oil Palm Weight	% Oil	Average % Oil	SD
A1 no. 1	3.05	165.21	167.84	2.63	86.22951	85.4989	1.033293
A1 no.2	3.02	162.81	165.37	2.56	84.76821		
A2 no. 1	3.01	163.83	166.34	2.51	83.3887	83.6944	0.432251
A2 no. 2	3.00	165.24	167.76	2.52	84.0000		
A3 no. 1	3.02	165.52	168.05	2.53	83.77483	83.2781	0.702424
A3 no. 2	3.02	163.1	165.6	2.5	82.78146		
B1 no.1	3.01	156.47	158.75	2.28	75.74751	76.2071	0.649943
B1 no. 2	3.00	162.88	165.18	2.3	76.66667		
B2 no. 1	3.03	163.43	165.6	2.17	71.61716	72.2772	0.933474

B2 no. 2	3.03	165.54	167.75	2.21	72.93729		
B3 no. 1	3.03	162.28	164.42	2.14	70.62706	70.1973	0.607844
B3 no. 2	3.01	166.1	168.2	2.1	69.76744		

ผลการประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์

จากการทดสอบสถาปัตยกรรมและ Model ที่สร้างขึ้นที่อัตราส่วน (Training : Validation) โดยทดลองที่ 10, 15 และ 23 layers จึงทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง layer รวมถึงอัตราส่วน (Training : Validation) เพิ่มความแม่นยำของการทำนาย ดัง Table 2

Table 2 Model accuracy comparison

No.	Amount's Epoch	Amount's Layer	Training Ratio	Validation Ratio	Accuracy (%)	Loss (%)	Time (s)
1	100	10	30	70	35.90	1.25	1.30 min
2	100	10	70	30	58.30	1.4	1.32 min
3	100	15	70	30	62.66	1.25	1.30 min
4	100	23	70	30	83.10	0.6	1.42 min

การเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำเป็นปริมาณน้ำมัน

จากการ mapping เปอร์เซ็นต์น้ำมันที่ได้จากห้องปฏิบัติการเข้ากับค่าที่ได้จาก softmax ด้วย Equation 2 จะได้ปริมาณน้ำมันราว 83.1031 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงใน Fig. 5

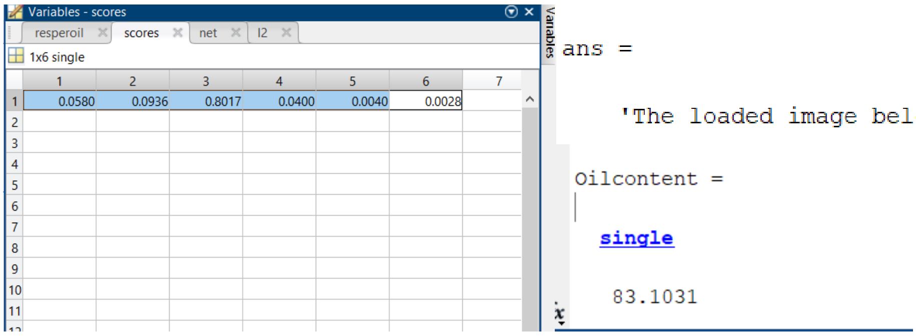


Fig. 5 Forecast oil content from trained model

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตรวจหาปริมาณน้ำมันในผลปาล์มโดยการใช้เทคนิคดีพเลิร์นนิ่ง พบว่าผลปาล์มบริเวณด้านนอกทะลายจะมีปริมาณน้ำมันประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ มากกว่า ผลปาล์มด้านในทะลายที่มีปริมาณน้ำมันประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงผลปาล์มบริเวณปลายของทะลายจะมีปริมาณน้ำมันมากกว่า บริเวณกลาง และโคนทะลายผลของการทดลองการประเมินปริมาณน้ำมันในผลปาล์มโดยการใช้การตรวจจับภาพร่วมกับเทคนิคดีพเลิร์นนิ่ง พบว่า สถาปัตยกรรมที่สร้างขึ้นสามารถใช้แยกความสุกและประเมินปริมาณน้ำมันในผลปาล์มได้ โดยพบว่าสามารถ

ประเมิณปริมาณน้ำมัลในผลปาล์มได้ 83.1031 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์น้ำมันจากผลการทดลองในห้องทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก

1. รศ.ดร.เฉลิมพล ภูมิไชย ที่ได้เอื้อเฟื้อ ทะลายปาล์ม จาก โครงการศูนย์เรียนรู้วิจัย และถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตปาล์มน้ำมันในเขตพื้นที่ปลูกใหม่ ต.หนองหมู อ.วิหารแดง จ.สระบุรี

2. ดร.รยากร นกแก้ว ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการเคมีและอุปกรณ์

3. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อนุเคราะห์ซอฟท์แวร์ MATLAB และ ห้องปฏิบัติการ PID

เอกสารอ้างอิง

ชยพร แอคะรัจน์. 2011. เกี่ยวกับปาล์มน้ำมัน (Oil palm), กรมวิชาการเกษตร. https://www.gotoknow.org/posts/428151, 31 สิงหาคม 2565.

ธีระพงศ์ จันทรนิยม. 2562. คู่มือเกษตรกร การผลิตปาล์มน้ำมันอย่างมีประสิทธิภาพ.ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตปาล์มน้ำมัน. สุราษฎร์ธานี.

ปรีดาวรรณ ไชยศรีชลธาร, ชูศักดิ์ ชวประดิษฐ์, จิรวัสส์ เจียตระกูล, วิชณีย์ ออมทรัพย์สิน. 2558. การศึกษาเทคนิคการวัดเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มในทะลายปาล์มน้ำมันอย่างรวดเร็วโดยใช้ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์น้ำมันกับค่าทางไฟฟ้า. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ภายใต้แผนงานวิจัยมุ่งเป้าตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศโดยเร่งด่วน. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

ศิริชัย มามีวัฒนะ. 2547. การวิจัยคัดพันธุ์แม่และพันธุ์พ่อปาล์มน้ำมันเพื่อใช้ในโครงการปรับปรุงพันธุ์, ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร.

ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎ์ธานี. 2548. ข่าวสารปาล์มน้ำมัน. องค์ความรู้ปาล์มน้ำมัน เพื่อการจัดการสวนปาล์มน้ำมันให้มีประสิทธิภาพ. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน). 2550. ประวัติปาล์มน้ำมัน. https://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/history/, 20 สิงหาคม 2565.

Bensaeed, O.M., Shariff, A.M., Mahmud, A.B., Shafri, H., Alfatni, M. 2014. Oil palm fruit grading using a hyperspectral device and machine learning algorithm. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 20: 012017

Chong, P.S, Jahim, J.Md., Harun, S., Lim, S.S., Mutalib, S.Abd., Hassan, O., Nor, M.T.M. 2013. Enhancement of batch biohydrogen production from prehydrolysate of acid treated oil palm empty fruit bunch. Int. J. Hydrogen Energ. 38: 9592–9599. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.154

Fadilah, N., Mohamad-Saleh, J., Halim, Z.A., Ibrahim, H., Ali, S.S.S. 2012. Intelligent color vision system for ripeness classification of oil palm fresh fruit bunch. Sensors 12: 14179–14195. doi.org/10.3390/s121014179

Hazir, M.H.M., Shariff, A.R.M., Amiruddin, M.D. 2012. Determination of oil palm fresh fruit bunch ripeness–Based on flavonoids and anthocyanin content. Ind. Crop. Prod. 36: 466–475. doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.020

Pattansarn, N., Sriwiboon, N. 2020. Image processing for classification the quality of the Chok – Anan mango by simulating the human vision using deep learning. Journal of Information Science and Technology 10: 24–29.

การศึกษาเชิงตัวเลขระบบระบายอากาศสำหรับอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

Numerical study of tunnel ventilation system for subway

วรัญญู ทองขาว[a,*], **ณัฐศักดิ์ บุญมี**[b]

Varanyu Thongkhao[a,*], Nathasak Boonmee[b]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Fire Protection Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: vthongkhao@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าความเร็ววิกฤตในการควบคุมควันไฟภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินด้วยแบบจำลองเพลิงไหม้ Fire Dynamics Simulator (FDS) อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดขนาด 7 MW ถูกใช้เป็นกองเพลิงในการจำลอง ตำแหน่งกองเพลิง 2 ตำแหน่งที่พิจารณาในการศึกษาคือ ที่หัวขบวนและกลางขบวนรถไฟ การจำลองได้พิจารณาถึงการทำงานของระบบระบายควันไฟภายในอุโมงค์ด้วย จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่ไม่มีการทำงานของระบบระบายควันไฟ ควันสามารถแพร่กระจายและปกคลุมโดยทั่วเกือบทั้งอุโมงค์ แต่เมื่อระบบควบคุมควันไฟทำงาน พัดลมสามารถควบคุมควันให้ไหลไปในทิศทางที่ต้องการได้ การจำลองพบว่าความเร็ววิกฤตในการควบคุมควันไฟมีค่าเท่ากับ 1.68 m/s และ 1.78 m/s และเมื่อกองเพลิงอยู่ที่หัวขบวน และอยู่กลางขบวนรถไฟตามลำดับ ความเร็ววิกฤตที่ได้จากการจำลองนี้มีค่าแตกต่างเล็กน้อย (ไม่เกิน 7%) จากค่าที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน NFPA 502 ผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมควันไฟสำหรับอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินได้

คำสำคัญ: ความเร็ววิกฤต, ควบคุมควันไฟ, อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

Abstract

This research performed numerical simulations to estimate the critical velocities of smoke control system for a subway tunnel via a fire simulation model called Fire Dynamics Simulation (FDS). A maximum heat release of 7 MW was employed. Two fire locations, at the frontend and middle of trains, and mechanical smoke control were considered in the simulations, The study found that when a smoke control system was not operated a smoke would spread throughout the entire tunnel. However, if the smoke control system was operated, the smoke could be in control of desired directions. The result shown the critical velocities for smoke control system when the fire was at the frontend and middle of the trains were 1.68 m/s and 1.78 m/s respectively. These critical velocities were slightly different (within 7%) from the values calculated based on NFPA502. The results from this study can be used to evaluate the effectiveness of a smoke control system for subway tunnel.

Keywords: Critical velocity, Smoke control, Subway tunnel

คำนำ

งานการศึกษางานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรมแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Fire Dynamics Simulator-FDS) สำหรับในกรณีเกิดเหตุเฉิกเฉิน ในกรณีเกิดเหตุเพลิงไหม้ในอุโมงค์และไม่สามารถจะขับเคลื่นรถไฟฟ้าต่อไปยังสถานีได้ ซึ่งรถไฟฟ้าใต้ดินจะมีระบบควบคุมการระบายอากาศภายในอุโมงค์ เรียกว่า TVS (Tunnel Ventilation System) ดังนั้นงานศึกษางานวิจัยนี้จึงได้ใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มาใช้จำลองการสถานการณ์การเกิดเหตุเพลิงไหม้รถไฟฟ้าใต้ดินสายหนึ่งที่เกิดเหตุเพลิงไหม้ทั้ง 3 เหตุการณ์ คือการเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวน และตรงกลางขบวนรถไฟฟ้าโดยทั้ง 2 กรณีนี้จะมีระบบระบายอากาศทางกล สำหรับกรณีที่ 3 เกิดเหตุเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถไฟฟ้าแต่จะระบบระบายอากาศทางกลจะไม่ทำงาน สำหรับกรณีที่ 1 และ 2 จะมีการเพิ่มความเร็วของอากาศที่เป่าเข้าไปในอุโมงค์ 6 ขั้นตอนเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความเร็ววิกฤต Smoke Black Layering ให้หยุดเคลื่อนที่ อุณหภูมิของควันไฟ ความเข็มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ และทัศนวิสัยในการมองเห็น ซึ่งลมที่เป่าเข้าไปในอุโมงค์จะไปต้าน Smoke Black Layering ซึ่งเรียกว่า ความเร็ววิกฤษว่าเป็นไปตามมาตราฐานการออกแบบ NFPA 130 NFPA 502 และ SES เป็นเกณฑ์

ได้มีนักวิจัยหลายคณะได้ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดเพลิงไหม้สำหรับระบบรถไฟฟ้าใต้ดินด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ Li et al. (2014) ได้ศึกษาการไหลของควันในอุโมงค์ในขณะเกิดเพลิงไหม้สำหรับรถไฟฟ้าใต้ดินโดยจำลองการใช้คณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ ในเคลื่อนที่ของควันไฟจากกองเพลิงจาก 3 ตำแหน่ง คือหัวขบวน ตรงกึ่งกลางขบวนรถไฟฟ้า และตรงท้ายขบวนรถไฟตามลำดับ นอกจากตำแหน่งของกองเพลิงแล้วยังได้กำหนดเวลาของการเริ่มต้นในการทำงานของพัดลมระบายอากาศที่ต่างกันออกไปมาร่วมพิจารณาด้วย โดยที่เริ่มทำงานในขณะเกิดเพลิงไหม้จะกำหนดเวลาให้พัดลมระบายควันไฟ จะเริ่มต้นในทำงาน ที่ 60, 120, 240, และ 360 วินาที ตามลำดับ Li el at. (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความเร็ววิกฤต และ Critical Froude Number ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.5 [3] สำหรับการควบคุมควันไฟในอุโมงค์กับการระบายอากาศตามแนวความยาวของอุโมงค์ ซึ่งค่าที่ 4.5 เป็นค่าที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในงานวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในช่วงหนึ่งทศวรรษที่ผ่านมา ซึ่งค่า Critical Froude Number 4.5 นี้ได้ถูกพัฒนาโดย Thomas และDanziger และ Kennedy มีความเห็นว่า Critical Froude Number ของ Lee et al. อยู่ระหว่างค่า 4.5 กับ 6.7 Peng et al. (2020) ทำการศึกษาความเร็วของการระบายอากาศที่มีการจำกัดขอบเขตสำหรับในอุโมงค์ ขณะเกิดเพลิงไหม้จากการจำลองอุโมงค์จริง ความสำคัญของการระบายอากาศในอุโมงค์คือ การควบคุมควันไฟขณะเกิดเพลิงไหม้ และการเปลี่ยนแปลงของขนาดความยาวของ Smoke Black Layering ทางเหนือลม พบว่าขนาดความยาว Smoke Black Layering ลดลงเมื่อความเร็วในการระบายอากาศในอุโมงค์ถูกเพิ่มขึ้น และที่เวลาระยะ Smoke Black Layering มีค่าเท่ากับศูนย์ ที่จุดนี้จะเป็นจุดความเร็ววิกฤต ปกติทิศทางการเคลื่อนที่ของ Smoke Black Layering จะมีทิศทางสวนกับทิศทางกระแสอากาศที่ถูกเป่าเข้าไปยังในอุโมงค์ Jiang et al. (2018) ศึกษาความเร็ววิกฤตในอุโมงค์ ในกรณีมีลำไฟและมีลำควันหนาแน่น การทดสอบจะประกอบไปด้วย 3 ปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาคือโดยใช้ทางทฤษฎี การจำลองด้วยระเบียบเชิงตัวเลข และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถแก้ไขปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลจากการทดสอบพบว่าการแพร่กระจ่ายของฟลักซ์ความร้อนมีผลต่อพนังของอุโมงค์เฉพาะเป็นที่เป็นขอบเขตของความเร็ววิกฤตเท่านั้น เช่นเดียวกันกับการแพร่กระจ่ายของฟลักซ์ของการแพร่รังสี และในขณะเดียวกันผลของลำไฟที่กำลังเกิดขึ้นจากไฟขนาดเล็กลำควันจะอาศัยแรงลอยตัวลอยตัวขึ้นจากพื้นในกรณีเช่นนี้ทำให้ความเร็ววิกฤตจะเพิ่มขึ้นด้วยขนาดของการปล่อยพลังงานความร้อนยกกำลังหนึ่งส่วนสาม และพลวัตของความเร็ววิกฤตจะถูกอิทธิพลจากขนาดของกองเพลิงที่มีขนาดใหญ่ที่ต่างๆกันไป เช่นขนาดของกองเพลิงมีขนาดใหญ่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของความสูงของอุโมงค์ ลำควันจากแหล่งเกิดเพลิงไหม้จะอาศัยแรงลอยตัวซึ่งจะอยู่ที่ทางทิศของใต้ลม และสิ่งเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อความเร็ววิกฤต และความเร็ววิกฤตจะเป็นอิสระจากการปล่อยพลังงาน

ความร้อน นอกจากนี้แล้วการจำลองด้วยระเบียบวิธีตัวเลขยังศึกษา Smoke Black Layering ทางด้านหน้าในแนวนอนตามแนวความยาวของอุโมงค์ โดยกำหนดขนาดของกริดที่ใกล้กับกองเพลิงตามวิธีการของ McGrattan at el. ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ เส้นผ่านศูนย์กลางไฟลักษณะเฉพาะ (Characteristic Fire Diameter ,D*) ตาม Equation 1 และขนาดของกริด Δx จะพิจารณาจาก $\frac{D^*}{\Delta x}$ ให้อยู่ระหว่าง $4 \le \frac{D^*}{\Delta x} \le 16$

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\alpha T_\alpha c_p} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

$\dot{Q}$ = อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนรวม (kW) ρ_α = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

T_∞ = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K) C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (KJ /kg K)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) Δ_x = ขนาดของกริด (Grid Sizes)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์สำหรับการสร้างแบบจำลองจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบ Work Station, Dual CPU: Xenon, E5-2680V3 x 2- 24-Cores/48T 3.2 GHz ความจุของ Hard Disk ขนาด 2 TB และหน่วยประมวลผลความเร็ว RAM 32 GB DDR4 , GPU:GTX1650 3GB และเครื่องพิมพ์แบบเลเซอร์ และสำหรับโปรแกรมที่นำมาช่วยดำเนินงานก็จะประกอบไปด้วยโปรแกรม Building Information Modeling (BIM) โปรแกรม PyroSim และ Microsoft Office 2013 ตามลำดับ วิธีการศึกษาตั้งสมมติฐานจากการเพิ่มความเร็วของอากาศที่เป่าเข้าไปยังอุโมงค์ด้วยการใช้เครื่องปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของพัดลมระบายอากาศสำหรับอุโมงค์ (Tunnel Ventilation Fans) จึงมีผลทำให้อากาศมีความเร็วและมีปริมาตรเพิ่มขึ้นในขณะที่กำลังไฟมีอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนที่ 7 MW ทั้ง 3 กรณีสำหรับไฟไหม้หัวขบวนและกลางขบวนรถไฟฟ้า

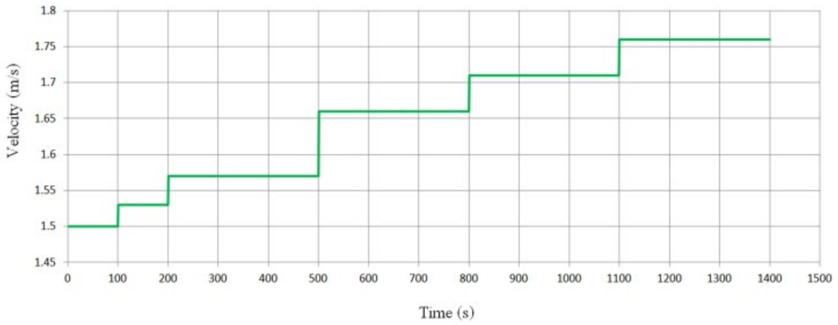


Fig. 1 Depict the fresh air velocity (m/s) for 6 steps and time (s)

การกำหนดค่าขอบเขต (Boundary Conditions) จะประกอบด้วย 1. แหล่งเชื้อเพลิง (Fire Source) แหล่งเชื้อเพลิงสำหรับการจำลองการเกิดเพลิงไหม้นี้ พื้นผิวของไฟจะพิจารณาเป็นหน่วยของอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนต่อพื้นที่ 500 Kw/m^2 โดยที่พื้นการเผาไหม้จะมีขนาด 14m×1m = 14 m^2 ดังนั้น ขนาดของกองเพลิงจะมีขนาดเท่ากับ

$14 m^2 \times 500 kW/m^2 = 7MW$ 2. ปัจจัยทางด้านทัศนวิสัยในการมองเห็น (Visibility Factor) 3. ความเร็วของอากาที่เป่าเข้าไปในอุโมงค์ (Air Velocity) 4. การพิจรณาทางลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์ (Geometric Consideration) เส้นทางอพยพควันไฟจะต้องสูงจากระดับทางเดินไม่น้อย 2.5 m 5.อุณหภูมิเริ่มต้นภายในอุโมงค์ (Ambient Temperature) กำหนดให้เท่ากับ 35 °C

อุโมงค์ที่พิจารณาจะอยู่ระหว่างปล่องระบายอากาศกับสถานีซึ่งมีระยะห่างการประมาณ 603 m เป็นตำแหน่งที่ใช้พิจารณาและจำลองสถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้ทั้ง 3 สถานการณ์ที่เกิดขึ้นดังแสดงใน Figs. 2 and 3

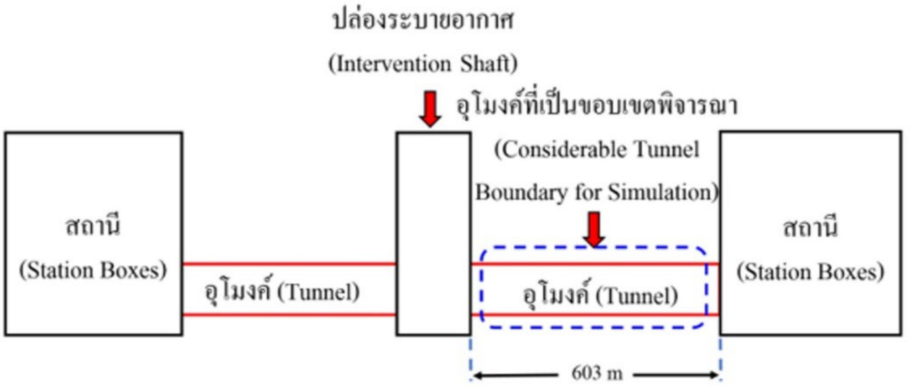


Fig. 2 Shown the tunnel location between station boxes and Intervention shaft

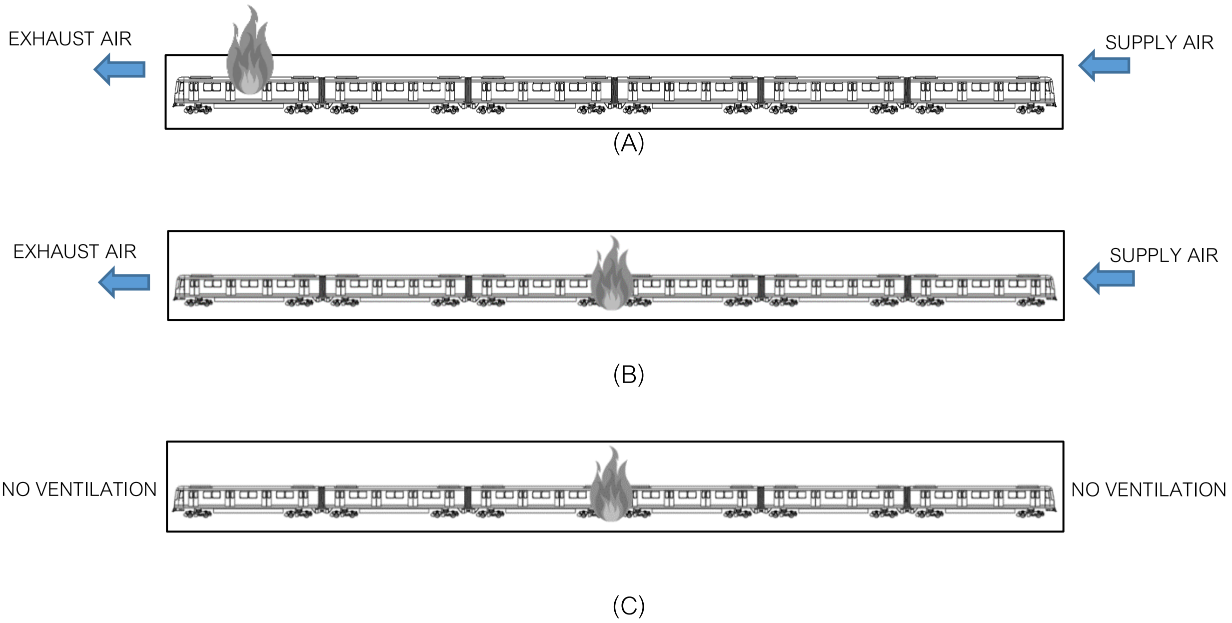


Fig. 3 Shown the position of fire sources: (A) for the fire source 7MW at Front of fire train with mechanical ventilation system; (B) for the fire source 7MW at the middle of fire train with mechanical ventilation system; and (C) for the fire source 7MW at the middle of fire train without mechanical ventilation system

ผลและการวิจารณ์การจำลอง

สำหรับในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถไฟฟ้าและ HRR เท่ากับ 7 MW และมีระบบระบายอากาศทางกลของอุโมงค์จะเห็นว่าที่ความเร็วของอากาศที่ 1.48 m/s ที่เวลา 200 วินาที อุณหภูมิและระดับความเข็มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าสูงไปจนกระทั่งที่เวลา 500 วินาที และที่ความเร็วอยู่ที่ 1.54 m/s อุณหภูมิและระดับความเข็มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์จะเริ่มลดลงและต่ำที่สุด ที่เวลา 880 วินาที ความเร็วลมอยู่ที่ 1.68 วินาที ซึ่งค่าความเร็วลมนี้เป็นค่าความเร็ววิกฤษ มีผลทำให้อุณหภูมิลดลงมาถึง 33 °C และระดับความเข็มเข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงถึง 0 ppm และระยะทัศนวิสัยในการมองเห็นจะสามารถมองเห็นได้ถึง 30 m

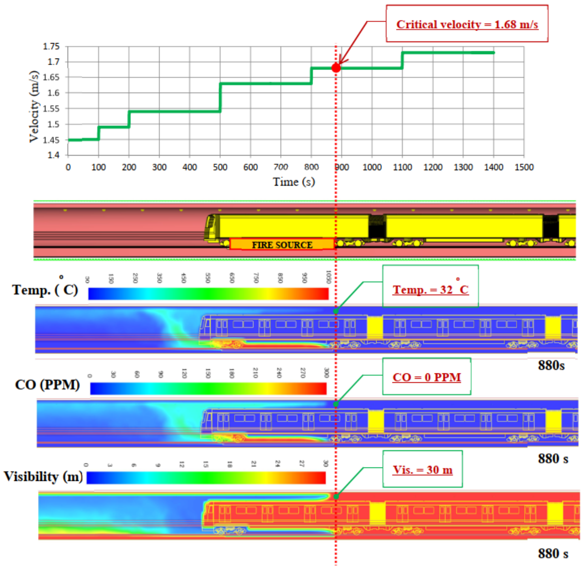
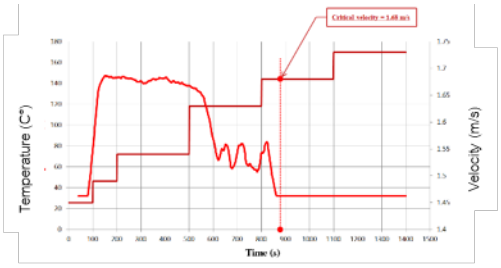
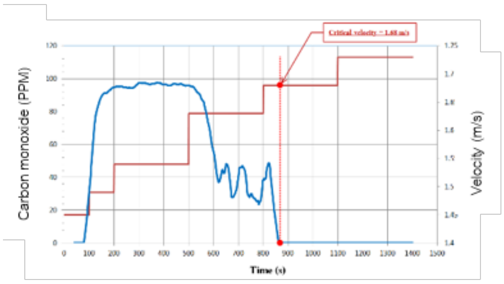


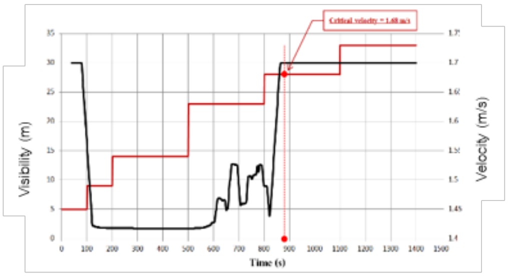
Fig. 4 Depict fresh air velocity, temperature, co concentration, visibility, and critical velocity when fire occurs at middle of the train with mechanical ventilation system



Shown the temperature, velocity and time



Shown Co (ppm), air velocity, and critical velocity



Shown visibility, air velocity, and critical velocity

Fig. 5 Illustration for temperature profiles, Co concentration, visibility, critical velocity when fire occurs at middle of the train with mechanical ventilation system

สำหรับในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ตรงกลางของขบวนรถไฟฟ้าและ HRR เท่ากับ 7 MW และมีระบบระบายอากาศทางกลของอุโมงค์ พบว่าที่เวลา 200 วินาทีและความเร็วอากาศที่ 1.53 m/s จนถึง 800 วินาที และที่ความเร็วอากาศที่ 1.71 m/s แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความเข็มเข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จะยังคงสูงอยู่ในช่วง 130 °C ถึง 118 °C แต่หลังจากเวลาที่ 810 วินาทีไปแล้ว อุณหภูมิและระดับความเข็มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเวลาที่ 800 วินาที ได้เพิ่มความเร็วของอากาศจาก 1.56 m/s ไปเป็น 1.66 m/s ที่เวลา 800 วินาที และเมื่อถึงเวลาที่ 1000 วินาที อุณหภูมิจะอยู่ที่ 45 °C และที่เวลา 1100 วินาที จะเพิ่มเร็วของลมที่เป่าเข้าไปในอุโมงค์ไปเป็น 1.76 m/s ซึ่งค่านี้คือค่าความเร็ววิกฤษจะมีค่าที่ 1.76 m/s ผลทำให้อุณหภูมิเริ่มคงที่ 32 °C จนถึงเวลา 1200 วินาที จนถึง 1400 วินาที

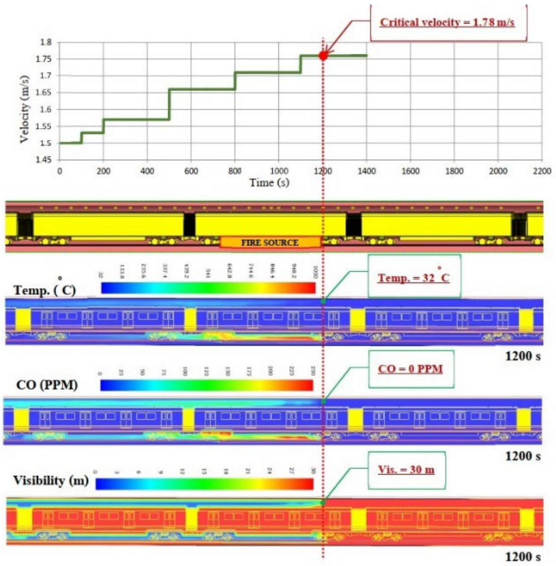
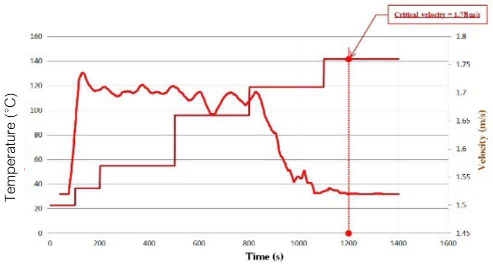
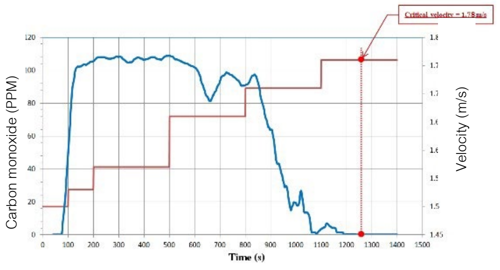


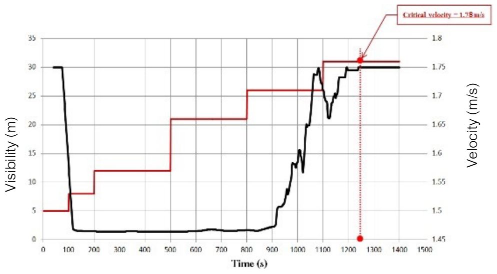
Fig. 6 Depict fresh air velocity, temperature, co concentration, visibility, and critical velocity when fire occurs at middle of the train with mechanical ventilation system



Shown the temperature, velocity and time



Shown Co (ppm), air velocity, and critical velocity



Shown visibility, air velocity, and critical velocity

Fig. 7 Illustration for temperature profiles, Co concentration, visibility, critical velocity when fire occurs at middle of the train with mechanical ventilation system

สำหรับในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ตรงกลางของขบวนรถไฟฟ้าและที่กำลังไฟจะยังคงใช้ 7 MW และระบบระบายอากาศทางกลไม่ทำงาน จะพบว่าตั้งแต่เวลาที่ ประมาณ 30 วินาที อุณหภูมิ และ ความเข็มเข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 50 °C ไปที่ 255 °C และเวลาที่ 30 วินาที ถึง 300 วินาที ตามลำดับ จากนั้นอุณหภูมิก็คงที่ ที่ 255 °C ตลอดจนถึงเวลาที่ 1400 วินาที่ ในส่วนของค่าของทัศนวิสัยก็จะผกผันกับค่าอุณหภูมิกับค่าและความเข็มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์

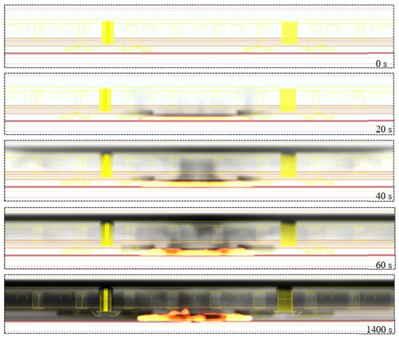
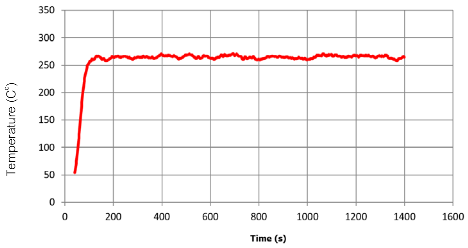
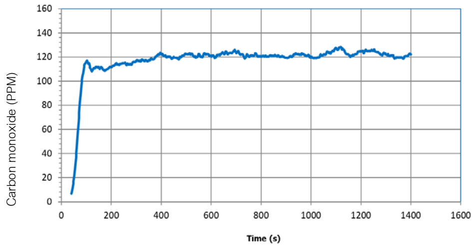


Fig. 8 Depict the environment condition in tunnel when fire occurs at middle of the train without mechanical ventilation system

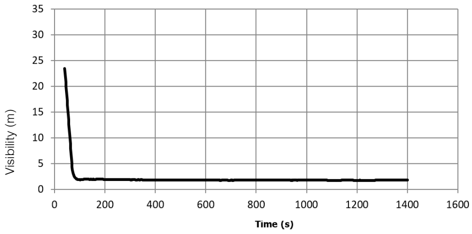


Shown temperature and time



Shown CO (ppm) and time

กับเวลา



Shown visibility and time

กับเวลา

Fig. 9 Depict temperature profile, CO concentration (ppm) and in visibility when fire occurs at middle of the train without mechanical ventilation system

สรุปผล

กรณีที่ 1 เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถไฟฟ้า เมื่อ HRR 7MW และมีระบบระบายอากาศและควันไฟทางกล พัดลมระบายอากาศสำหรับอุโมงค์จะเริ่มทำงานได้ดีจากเวลาที่ 810 วินาที พร้อมทั้งที่ความเร็วของอากาศที่จ่ายเข้าไปในอุโมงค์ 1.68 m/sec ซึ่งเป็นค่าความเร็ววิกฤษ ซึ่งสามารถจัดการควบคุมอุณหภูมิและทิศทางการไหลของควันไฟที่เกิดจากกลุ่มควันไหลใต้เพดานของอุโมงค์ (Ceiling Jet) จากเชื้อเพลิงที่มีอัตราการปล่อยพลังงานขนาด (Heat Release Rate) 7 MW รวมทั้งระดับความเข็มข้นของควันไฟ ระยะการมองเห็น และ Smoke Black Layering ของควันไฟได้ตามวัตถุประสงค์ในกรณีขณะเกิดเหตุเพลิงไหม้ กรณีที่ 2 เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กึ่งกลางขบวนรถไฟฟ้าเมื่อ HRR เท่ากับ 7MW และมีระบบระบายอากาศทางกลสำหรับอุโมงค์จะเริ่มทำงานได้ดีและมีสมรรถนะจากเวลาที่ 1200 วินาที และที่ความเร็วของอากาศที่เป่าเข้าไปในอุโมงค์เท่ากับ 1.76 m/sec ซึ่งเป็นค่าความเร็ววิกฤษ และค่านี้จะสัมพันธ์กับ Smoke Black Layering ซึ่งเป็นค่าความเร็วอากาศสามารถควบคุมอุณหภูมิและทิศทางการไหลของควันไฟที่เกิดจากกลุ่มควันไหลใต้เพดานของอุโมงค์ (Ceiling Jet) รวมทั้งระดับความเข็มข้นของควันพิษ และระยะการมองเห็นเป็นไปตามมาตรฐาน กรณีที่ 3 เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถไฟฟ้าที่ HRR เท่ากับ 7MW และไม่มีระบบระบายอากาศและควันไฟทางกล จะทำให้ค่าของอุณหภูมิระดับคาร์บอนมอนอกไซด์สูงมาก รวมทั้งระยะทัศนวิสัยในการมองเห็นต่ำมากจนไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้อพยพจะมองเห็นได้ เมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับการจำลองเพลิงไหม้ที่มีระบบระบายอากาศทางกล จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นการตอกย้ำความเข้าใจได้ว่าหากไม่มีระบบระบายอากาศทางกล จะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้สายโดยสารและผู้ปฏิบัติงานเดินรถที่พยายามอพยพอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการศึกษางานวิจัยนี้ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี ที่ปรึกษาหลักงานวิจัยนี้ที่คอยช่วยให้คำปรึกษาและคำชี้แนะแนวทางสำหรับการแก้ปัญหาและปรับปรุงเนื้อหาต่างๆ ทั้งในด้านเชิงวิชาการ เทคนิคและแนวความคิดรวบยอด รวมทั้งการแก้ไขข้อผิดพลาดในระหว่างการดำเนินการศึกษาค้นคว้าอิสระจนทำให้งานวิจัยนี้แล้ว

เสร็จตามวัตถุประสงค์ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พี่น้อง และเพื่อนร่วมงานที่เป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ สุดท้ายนี้สำหรับคุณค่าและคุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานการค้นคว้าอิสระฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาเบื้องต้นและผู้เกี่ยวข้องคุณครู อาจารย์ และทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. พลศาสตร์อัคคีภัย (Fire Dynamics), พิมพ์ครั้งที่ 2, วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย, ภาควิชาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2559. เอกสารการสอน Fire Simulation with Pyrosim 2010/2012. วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย, ภาควิชาเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Jun, D., Li, M., Zhen-ping, W., Zhen, X., Wei-feng, W. 2013. Simulation study on critical velocity of longitudinal ventilation tunnel fire. Procedia Engineer. 52: 67–71. doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.107

Jiang, L., Creyssels, M., Mos, A., Salozzoni, P. 2018. Critical velocity in ventilated tunnels in the case of fire plumes and densiometric plumes. 101: 53–62. doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.09.001

Kashef, A. 2012. Fire and Smoke Control in Transport Tunnels

Li, Y.-f., Li, Bian, J., Li, J.-m. 2014. Research on smoke control flow in a tunnel fire of subway system. Procedia Engineer. 71: 390–396. doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.056

Li, Y.Z., Ingason, H. 2018. Discussion on critical velocity and critical froude number for smoke control in tunnels with longitudinal ventilation. Fire Safety J. 99: 22–26. doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.06.002

Meng, N., Hu, X., Tian, M. 2020. Effect of blockage on critical ventilation in longitudinally ventilated tunnel fire. Tunn. Undergr. Sp. Tech. 106: 103580. doi.org/10.1016/j.tust.2020.103580

Meng, N., Yang, W., Lin, X., Li., X., Li., X., Liu, B., Jin, X. 2018. Experimental study on back layering length of thermal smoke flow in a longitudinally ventilated tunnel with blockage at upstream of fire source. Tunn. Undergr. Sp. Tech. 82: 315–324. doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.034

NFPA 101. 2015. Life Safety Code. National Fire Protection Association.

NFPA 130, 2020. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System.

NFPA 502. 2014. Standard for Road and Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highway.

Pang, M., Zhang, S., Yang, H., He, K., Cong, W., Cheng, X., Yuen, R., Zhang, H. 2020. Experimental study on confinement velocity in tunnel fires with longitudinal ventilation. J. Wind. Eng. Ind. Aerod. 201: 104157. doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104157

Zhang, S., Yao, Y., Zhu, K., Li, K., Zhang, R., Lu, S., Zhang, H. 2016. Prediction of smoke back-layering length under different longitudinal ventilations in the subway tunnel with metro train. Tunn. Undergr. Sp. Tech. 53: 13–21. doi.org/10.1016/j.tust.2015.12.013

การพัฒนาระบบตรวจสอบและเก็บข้อมูลสภาวะตามเวลาจริงของโรงเพาะฟักปูม้า

Development of real-time condition monitoring and data collection system of blue swimming crab hatchery

วิทยา ฉัตรรัตนกุลชัย, พิสัย แย้มประสวน*, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย

Wittaya Chatrattanakulchai, Pisai Yaemprasuan*, Withit Chatrattanakulchai

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pisaiyk@gmail.com

บทคัดย่อ

ปูม้า (Blue swimming crab) เป็นสัตว์น้ำที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจเนื่องจากเนื้อมีรสชาติดีเป็นที่นิยมบริโภค มีตลาดรองรับทั้งในและต่างประเทศ แต่จากข้อมูลของกรมประมงพบว่า ผลผลิตปูม้าในน่านน้ำไทยมีจำนวนลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในปีพ.ศ. 2541 มีปริมาณการจับปูม้า 46,678 ตัน ต่อมาได้ลดลงอย่างต่อเนื่องจนเป็น 23,890 ตันในปีพ.ศ. 2557 หรือลดลงประมาณเท่าตัว จากการลดลงของปริมาณปูม้าในน่านน้ำไทยโดยธรรมชาติ ทำให้มีความจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณการเพาะเลี้ยงปูม้า ในปัจจุบันการเพาะและอนุบาลลูกปูม้ามี 2 รูปแบบคือ การเพาะในโรงเพาะฟัก และการเพาะในบ่อดิน อย่างไรก็ดีอัตราการรอดตายของปูม้าที่เลี้ยงมีอยู่เพียง 15–30%

คำสำคัญ: ปูม้า, ระบบตรวจสอบและเก็บข้อมูลสภาวะตามเวลาจริง

Abstract

Blue swimming crab is an aquatic animal with economic potential due to its good-tasting meat and highly demanded. There are potential markets both domestic and international markets. But according to the data from the Department of Fisheries found that the number of blue swimming crabs in Thailand has continuously decreased. In 1998, the number of blue swimming crabs caught was 46,678 tons. In 2014 the number of blue swimming crabs in Thailand has continuously dropped to 23,890 tons. Therefore, it is necessary to increase the number of blue swimming crabs population. At present, there are 2 types of blue swimming crab breeding and nursery, which are farming in a hatchery. However, the survival rate of raised blue crabs is only 15-30%.

Keywords: Blue swimming crabs, Real-time condition monitoring and data collection system

คำนำ

ปูม้า (Blue swimming crab) เป็นสัตว์น้ำที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจเนื่องจากเนื้อมีรสชาติดีเป็นที่นิยมบริโภค มีตลาดรองรับทั้งในและต่างประเทศ แต่จากข้อมูลของกรมประมงพบว่า ผลผลิตปูม้าในน่านน้ำไทยมีจำนวนลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2541 มีปริมาณการจับปูม้า 46,678 ตัน ต่อมาได้ลดลงอย่างต่อเนื่องจนเป็น 23,890 ตันในปีพ.ศ. 2557 หรือลดลงประมาณเท่าตัว (กองวิจัยและพัฒนาประมงทะเล กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560)

จากการลดลงของปริมาณปูม้าในน่านน้ำไทยโดยธรรมชาติ ทำให้มีความจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณการเพาะเลี้ยงปูม้า ในปัจจุบันการเพาะและอนุบาลลูกปูม้ามี 2 รูปแบบคือ การเพาะในโรงเพาะฟัก และการเพาะในบ่อดิน อย่างไรก็ดี อัตราการรอดตายของปูม้าที่เลี้ยงมีอยู่เพียง 15–30% (วุฒิชัย และคณะ, 2555) เนื่องจากสาเหตุใหญ่ 3 ประการคือ การกินกันเองของปูม้าเนื่องจากปูม้าเป็นสัตว์ที่ก้าวร้าว การตายจากการลอกคราบไม่ออกของปูม้าเนื่องจากการขาดสารอาหารที่จำเป็นในการลอกคราบ คุณภาพน้ำในการเลี้ยงโดยเฉพาะความเป็นด่างในน้ำที่ต่ำมาก เนื่องจากปูจะดึงธาตุอาหารไปใช้ในการลอกคราบเป็นจำนวนมาก โดยเทคโนโลยีด้านการลี้ยงปูม้าของไทยได้มีการศึกษาและพัฒนารูปแบบรวมถึงวิธีการเลี้ยงมาอย่างต่อเนื่อง (กอบศักดิ์ และคณะ, 2547; อาภรณ์ และสำรวย, 2548; วารินทร์ และคณะ, 2548)

อัตราการรอดตายของปูม้าเลี้ยงที่ต่ำ สามารถปรับปรุงได้ด้วยการนำเอาเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ มาใช้ในการตรวจสอบและเก็บข้อมูลสภาวะคุณภาพน้ำในการเลี้ยง คณะผู้วิจัยซึ่งเป็นผู้ชำนาญงานด้านวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ร่วมกับศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง เขต 2 สมุทรสาคร จึงได้เสนองานวิจัยนี้ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ของดังนี้

- พัฒนาระบบเซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงปูม้าในโรงเพาะฟัก โดยจะทำการวัดปริมาณต่างๆ ที่จำเป็นกับการเลี้ยง
- ออกแบบระบบคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเก็บข้อมูลบันทึกประวัติ และทำการติดต่อกับผู้ใช้ในการรายงานคุณภาพน้ำอย่างตามเวลาจริง
- ออกแบบระบบสื่อสารทางไกลโดยอำนวยความสะดวกให้นักวิจัยของศูนย์ฯสามารถตรวจสอบและเฝ้าระวังคุณภาพน้ำของโรงเพาะฟักจากห้องทำงานของศูนย์วิจัย
- ทำงานใกล้ชิดกับนักวิจัยของศูนย์ฯ เพื่อให้ทราบถึงโอกาสในการนำเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมศาสตร์อื่นๆ เข้ามาช่วยในการเลี้ยงปูม้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. โรงเพาะฟักปูม้าใน Fig. 1 Blue Crab Hatchery

Fig. 1 Blue Crab Hatchery

2. Controller สำหรับการเชื่อมต่อ Wireless Router ใน Fig. 2 Testing MQTT and WIFI connection

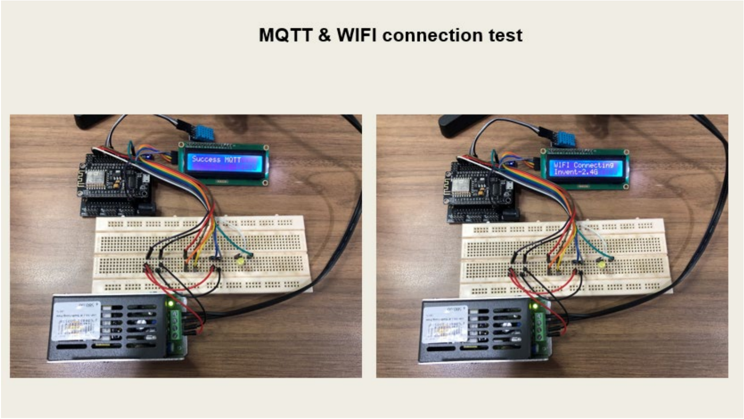


Fig. 2 Testing MQTT and WIFI connection

3. Smart Sensors โดยประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์การวัดค่า ออกซิเจน, อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH), แมกนีเซียม, แมกนีเซียม, แคลเซียม, แอมโมเนียรวม (TANN)

Fig. 3 Smart Sensors for measuring parameters of the environment in blue swimming crab hatchery

ระบบตรวจสอบและเก็บข้อมูลสภาวะตามเวลาจริงของโรงเพาะฟักปูม้า

ระบบที่พัฒนาในงานวิจัยนี้โดยคณะผู้วิจัยคือระบบเซ็นเซอร์ที่มีการวัดค่า ออกซิเจน อุณหภมิ ค่า PH แมกนีเซียม แคลเซียม แอมโมเนีย ระบบเซ็นเซอร์จะถูกติดตั้งอยู่ที่บ่อการเพาะเลี้ยงปูม้า ตามรูปแผนผังของระบบใน Fig. 4

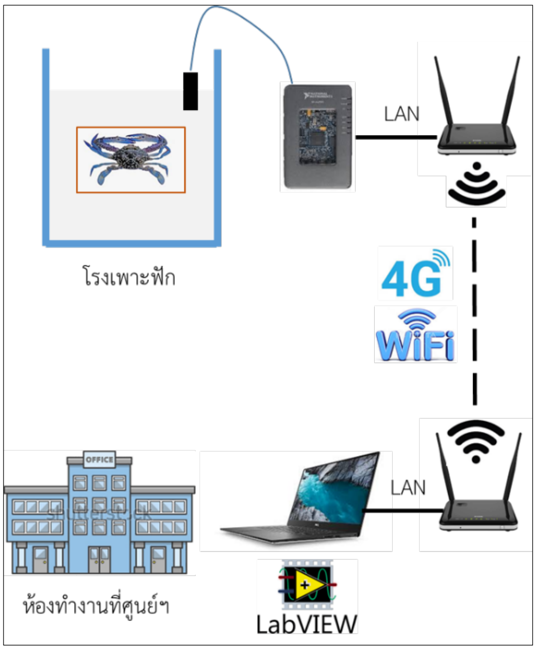


Fig. 4 Diagram of system for monitoring and collecting

การติดตั้งระบบชุดควบคุมสำหรับทำหน้าที่ส่งค่าพารามิเตอร์ที่เซ็นเซอร์รับค่าได้ โดยการส่งค่าตัวเลขพารามิเตอร์ผ่านสัญญาณ WI FI ที่ถูกติดตั้งอยู่ที่โรงเพาะเลี้ยงปูม้า โดยการส่งค่าพารามิเตอร์นั้นจะทำการส่งค่าแบบในอัตราความถี่ทุกๆ นาที ที่อุปกรณ์เซ็นเซอร์สามารถทำการเก็บค่าได้

Fig. 5 install a sensor control device at a blue swimming crab hatchery

การติดตั้งชุดเซ็นเซอร์จะเป็นลักษณะที่อุปกรณ์เซ็นเซอร์ถูกแช่อยู่ในน้ำที่เป็นสิ่งแวดล้อมสำหรับการเพาะเลี้ยงปูม้า ซึ่งอุปกรณ์เซ็นเซอร์จะวัดค่าจะส่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เข้าไปที่อุปกรณ์ควบคุมเซ็นเซอร์ เพื่อส่งข้อมูลขึ้นระบบ Cloud

สำหรับการให้นักวิจัยดูค่าของพารามิเตอร์น้ำในบ่อเพาะปูม้าได้จากระยะไกล รวมถึงการตรวจสอบสภาวะของสิ่งแวดล้อมได้ตามความถี่ทุกๆ นาที ที่เซ็นเซอร์มีการส่งค่าเข้าระบบ Cloud และแสดงผลตาม User Interface Fig. 8

Fig. 6 Installation of sensors in blue swimming crab

การส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบซึ่งคณะนี้คณะวิจัยกำหนดให้ความถี่ในการส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์อยู่ที่อัตราการส่ง 1 ชุดข้อมูลต่อนาที

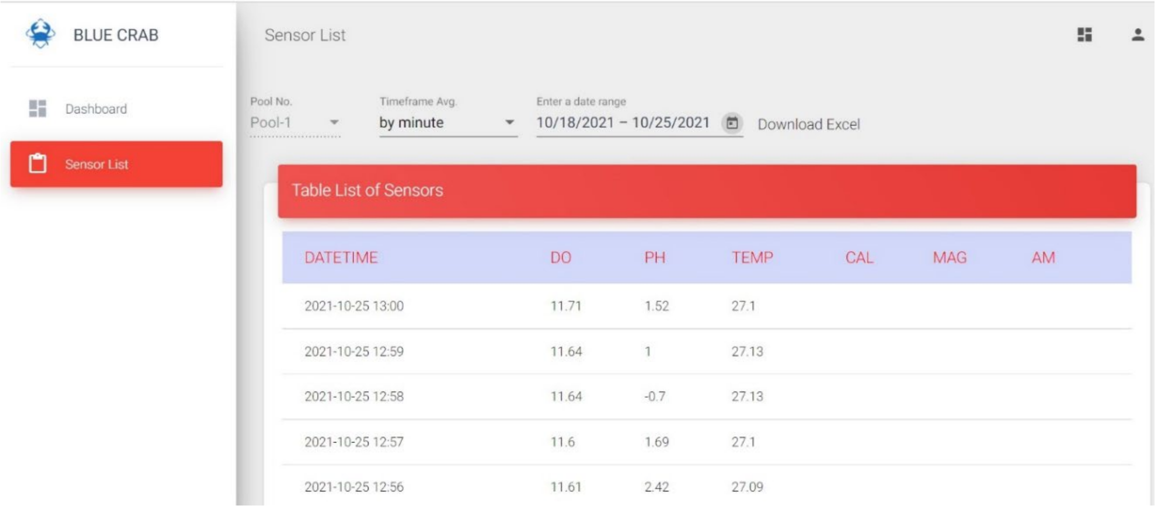


Fig. 7 Data collection

การแสดงผลของค่าพารามิเตอร์ที่เซ็นเซอร์สามารถทำการเก็บค่าได้ ซึ่งจะแสดงผลเป็น Interface ดังรูป เพื่อให้เจ้าหน้าที่ทำหน้าที่ดูแลสามารถเข้ามาตรวจสอบสภาพแวดล้อมของการเพาะปูม้าให้เป็นไปตามที่การวิจัยส่วนของการเพราะเลี้ยงปูม้ากำหนดไว้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถเรียกดูย้อนหลัง พร้อมทั้งสามารถแสดงออกมาในรูปแบบของรายงานได้

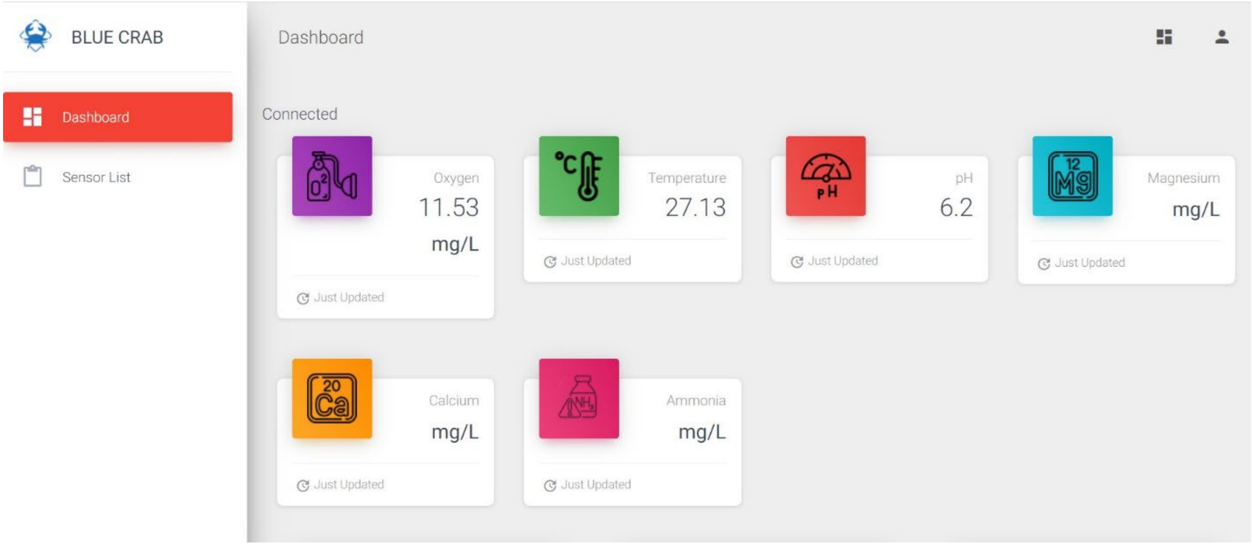


Fig. 8 User interface and dashboard

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบสภาวะที่ของโรงเพาะฟักปูม้า เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์แต่ล่ะค่าของสิ่งแวดล้อมของโรงเพาะฟักปูม้าอยู่ในค่าที่ปกติ ซึ่งจะทำให้มีผลกับการเจริญเติบโตและอัตราการรอดชีวิตของปูม้า ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมมาจาก การอนุบาลลูกปูม้า (Portunus pelagicusLinnaeus, 1758) ปิยาลัย และมนทกานติ (2554) ที่ศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ของน้ำที่เหมาะสมของการเพาะเลี้ยงปูม้า ตาม Table 1 ซึ่งหลังจากได้ทำการติดตั้ง smart sensors และได้ทำการส่งค่าพารามิเตอร์ได้แก่ค่า ออกซิเจน, อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรด, แมกนีเซียม, แคลเซียม, แอมโมเนียม แล้วในการแสดงผลหน้า Dashboard ได้ผลตาม Table 2

Table 1 Appropriate water quality for blue swimming crab nursery

Water Quality	Optimized Value
Salinity	28-30 ppt
Temperature	28-30 °C
pH	7.8 – 8.3
Alkalinity	150 mg/l
Dissolved Oxygen (DO)	5-7 mg/l
Total Ammonia (TAN)	Less than 0.4 mg/l
Nitrite	Less than 1 mg/l

Table 2 Water quality measured at the Coastal Aquaculture Center

Water Quality	Value
Oxygen (DO)	5-10 mg/l
Temperature	27.0-27.5 °C
pH	6.2-6.5
magnesium	100 - 150 mg/l
calcium	100 -150 mg/l
Ammonia (TAN)	0.2 mg/l

สรุป

หลังจากที่คณะวิจัยทำการติดตั้งอุปกรณ์ smart sensors และทำการส่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อแสดงผลนั้น ในส่วนของการส่งผลของค่าพารามิเตอร์นั้นไม่มีการติดปัญหาใดๆ แต่มีเซ็นเซอร์บางส่วนที่ยังมีการแสดงผลคาดเคลื่อนอยู่ คือ แอมโมเนีย แมกนีเซียม และแคลเซียล ซึ่งเป็นผลมาจากการทดสอบในสภาวะจริงในการส่งค่าพารามิเตอร์ทุกสิบนาที อาจจะทำให้เซ็นเซอร์ที่ใช้การทำการวัดค่านั้นเกิดความไม่เสถียรขึ้น ซึ่งคณะวิจัยมีความเห็นว่าในการออกแบบระบบการวัดค่าโดยรวมของโรงเพาะฟักปูม้านั้นควรทำในระบบหรือสภาวะแวดล้อมที่เป็นระบบปิดที่มีการดูแลเท่านั้น ซึ่งจะทำให้การควบคุมความเสถียรของค่าพารามิเตอร์ที่วัดจากเซ็นเซอร์ได้ ค่าของพารามิเตอร์ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ไม่มีรายการที่ตรงกับตารางที่ 1 สำหรับใช้เป็นการอ้างอิงไม่ต้องกับการวิจัยนี้เนื่องจากข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ด้วยข้อจำกัดของงบประมาณและเวลาในการทำวิจัย ซึ่งคณะวิจัยได้ทำการปรึกษากับนักวิชาการของศูนย์เพาะเลี้ยงปูม้าซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดโดยเซ็นเซอร์นั้นนักวิชาการของศูนย์เพาะเลี้ยงปูม้าให้ความเห็นว่าเพียงพอที่จะสามารถระบุคุณภาพของสิ่งแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงปูม้าได้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบตรวจสอบและเก็บข้อมูลสภาวะตามเวลาจริงของโรงเพาะฟักปูม้าสามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง เขต 2 สมุทรสาคร และท่านผู้อำนวยการมนทกานติ ท้ามติ้น และคณะ ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อแนะนำ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมทั้งได้ความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่ให้คำปรึกษาในด้านการออกแบบระบบเซ็นเซอร์และการส่งข้อมูล และขอขอบคุณบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวไว้ที่ให้การสนับสนุนจนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

กองวิจัยและพัฒนาประมงทะเล กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2560. การเพิ่มผลผลิตปูม้า เมื่อปล่อยสู่ธรรมชาติ. กรมประมง. กรุงเทพฯ.

กอบศักดิ์ เกตุเหมือน, ก่อนเกียรติ กูลแก้ว, สุภาวดี จิตต์หมั่น. 2547. การเลี้ยงปูม้า *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) ในบ่อดิน. ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งสงขลา, สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 38: 14.

มนทกานติ ท้ามติ้น. 2557. ผลของวิตามินซีต่อการเจริญเติบโต อัตรารอดตายและการลอกคราบ ของปูม้า Portunus pelagicus, Linnaeus 1758 (รายงานการวิจัย). สำนักงานวิจัยแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

มนทกานติ ท้ามติ้น, สุพิศ ทองรอด, สิริพร ลือชัย ชัยกุล. 2551. ระดับโปรตีนที่เหมาะสมในอาหารต่อการเจริญเติบโตของลูกปูม้า (*Portunus pelagicus* Linnaeus, 1758) ถึงระยะ 10 กรัม. รายงานวิชาการฉบับที่ 15. สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

มนทกานติ ท้ามติ้น, วรรณเพ็ญ เกตุกล่ำ, สุภัทรา อุไรวรรณ์, ธนัญช์ สังกรธนกิจ, ภูวนัย ชัยศรี. 2551. ศึกษาลักษณะทางการสืบพันธุ์ของปูม้าพันธุ์บ้านรุ่นที่ 1 ที่เลี้ยงในบ่อคอนกรีต (รายงานการวิจัย). กรมประมง. กรุงเทพฯ.

วารินทร์ ธนาสมหวัง, ชัยยุทธ พุทธิจุน, วัฒนา ฉิมแก้ว, สุพิศ ทองรอด. 2548. การเลี้ยงปูม้าในบ่อดิน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการผลิตพันธุ์และการเลี้ยงปูม้า (*Portunus pelagicus* Linnaeus, 1758) เชิงพาณิชย์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) กรุงเทพฯ, หน้า 83–91.

วุฒิชัย อ่อนเอี่ยม, วาสนา อากรรัตน์, เทพบุตร เวชกามา. 2555. การประเมินอัตราการกินอาหาร และการรอดตายของปูม้า (Portunus pelagicus) ที่เลี้ยงในบ่อดิน วารสารเกษตร 28: 83–91.

อาภรณ์ เทพพานิช, สิริวรรณ หนูเซ่ง, นิธิวัฒน์ วงศ์วิวัฒน์, สำรวย ชุมวรฐายี. 2551. การเลี้ยงปูม้า (*Portunus pelagicus* Linnaeus, 1758) ด้วยอาหาร 3 ชนิด ในบ่อดิน. สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 44: 15.

การพัฒนาเครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์อัตโนมัติ

Development of automatic parcel sorter

พชร จุ้ยพลอย*, **กฤษณ์ พัวไพโรจน์**, **วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย**

Pachara Juyploy*, Krit Puapairoj, Withit Chatlatanagulchaii

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pachara.j@ku.th

บทคัดย่อ

เครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์อัตโนมัติจะช่วยลดแรงงานคน ลดความผิดพลาดและเพิ่มความเร็วในการส่งไปรษณีย์ และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการคัดแยกสินค้าได้หลากหลายประเภท มีการนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นจากการเติบโตของตลาด e-commerce อย่างไรก็ดีเครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์ยังไม่มีผู้พัฒนาได้ในประเทศไทย ยังต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ความท้าทายของโจทย์วิจัยอยู่ที่ระบบ Machine Vision ในการอ่านรหัสไปรษณีย์และบาร์โค้ดบนกล่องพัสดุในขณะที่พัสดุที่มีความหลากหลายเคลื่อนที่บนสายพานอย่างรวดเร็ว และอยู่ที่หัวคัดแยกพัสดุซึ่งจนถึงปัจจุบันมีผู้เสนอการออกแบบหลายรูปแบบแต่ยังไม่มีรูปแบบไหนที่สมบูรณ์ เครื่องคัดแยกพัสดุที่พัฒนาในโครงการนี้ให้ผลการวิจัยเป็นที่น่าพอใจ โดยมีต้นทุนต่อหัวคัดแยกอยู่ที่ประมาณ 150,000 บาท คิดเป็น 10% ของเครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ ความเร็วของการคัดแยกอยู่ที่ประมาณกล่องละ 1 วินาทีหรือชั่วโมงละ 3,600 กล่อง โดยมีความถูกต้องในการคัดแยก 100% มีจำนวนกล่องที่ระบบกล้องไม่สามารถอ่านข้อมูลบนกล่องได้ไม่ถึง 1% ความเร็วของการคัดแยกถูกจำกัดอยู่ที่ความเร็วของสายพานในส่วนที่ 2 ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มความเร็วขึ้นได้อีกถึงประมาณ 3–4 เท่า

คำสำคัญ: เครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์, ระบบคัดแยกบรรจุภัณฑ์ขนาดเล็ก

Abstract

Automatic parcel sorting machines help reduce labor, reduce errors, and speed up postage. Moreover, it can also be applied to the sorting of various types of products. It is being used more and more due to the growth of the e-commerce market. However, the parcel sorting machine is not yet developed in Thailand. It must also still be imported from abroad. The challenge of the research lies in machine vision's ability to read postal codes and barcodes on parcel boxes as a variety of parcels move rapidly on conveyor belts. The challenge is also at the design of the parcel sorting head, which until now many designs have been proposed, but none of them are perfect. The parcel sorter developed in this project has yielded satisfactory research results. The cost per head is about 150,000 baht, or 10% of the machines imported from abroad. Sorting speed is approximately 1 second per box or 3,600 boxes per hour with 100% sorting accuracy. The number of boxes that the camera system cannot read on the boxes is less than 1%. The sorting speed is limited to the belt speed in section 2. Overall sorting speed can be increased by about 3–4 times.

Keywords: Parcel sorter, Small package sorting system

คำนำ

เครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์อัตโนมัติจะช่วยลดแรงงานคน ลดความผิดพลาดและเพิ่มความเร็วในการส่งไปรษณีย์ และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการคัดแยกสินค้าได้หลากหลายประเภท มีการนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นจากการเติบโตของตลาด e-commerce อย่างไรก็ดีเครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์ยังไม่มีผู้พัฒนาได้ในประเทศไทย ยังต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ความท้าทายของโจทย์วิจัยอยู่ที่ระบบ Machine Vision ในการอ่านรหัสไปรษณีย์และบาร์โค้ดบนกล่องพัสดุในขณะที่พัสดุที่มีความหลากหลายเคลื่อนที่บนสายพานอย่างรวดเร็ว และอยู่ที่หัวคัดแยกพัสดุ

อุปกรณ์และวิธีการ

หัวคัดแยกรูปแบบต่างๆ

หัวคัดแยกมีเทคโนโลยีหลากหลายประเภทดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเรียงเทคโนโลยีหัวคัดแยกตั้งแต่ความเร็วสูงสุดไปจนถึงความเร็วต่ำสุดจาก Fig. 1A ไปจนถึง Fig. 1H Fig. 1A แสดงหัวคัดแยกแบบ Bomb Bay ซึ่งฐานด้านล่างของวัสดุจะเปิดออกทำให้วัสดุตกลงไปยังภาชนะคัดแยก Fig. 1B มีสายพานเล็กหรือที่เรียกว่า Cross Belt เคลื่อนที่เพื่อส่งวัสดุไปทางซ้ายหรือขวาของสายพานหลักเพื่อให้ตกลงไปสู่ภาชนะคัดแยก Fig. 1C Roller ที่อยู่ทั่วไปบนสายพานจะถูกหมุนไปทางซ้ายหรือขวาของสายพานหลักโดยสายพานช่วยที่อยู่ด้านล่าง Fig. 1D ถาดจะทำการเอียงเพื่อเทวัสดุลงไปในภาชนะคัดแยกที่ต้องการ Fig. 1E หัวคัดแยกมีลักษณะคล้ายรูปรองเท้า ซึ่งจะทำการเลื่อนซ้ายหรือขวาเป็นแพทเทิร์นเพื่อกันให้วัสดุที่ไหลมาตามสายพานหลักตกลงไปในภาชนะแยกที่ต้องการ Fig. 1F ใช้ล้อที่หมุนได้ซ้ายและขวาโดยล้อมีความฝืดทำให้วัสดุที่ไหลมาตามสายพานถูกล้อหมุนให้ตกไปด้านซ้ายหรือขวาไปยังภาชนะคัดแยกที่ต้องการ Fig. 1G สายพานหลักจะวางตัวในแนวยาวเพื่อทำให้วัสดุเคลื่อนที่มา สายพานที่เป็นโรลเลอร์จะหลบอยู่ใต้สายพานหลัก เมื่อวัสดุเคลื่อนที่มาถึงสายพานโรลเลอร์จะยกตัวขึ้นไปและหมุนในทิศทางตั้งฉากกับสายพานหลัก ทำให้วัสดุที่ต้องการคัดแยกตกไปด้านซ้ายหรือขวาตามต้องการ Fig. 1H แขนกลจะกั้นและกวาดให้วัตถุที่ไหลมาตามสายพานหลักตกลงไปยังภาชนะคัดแยกที่ต้องการ

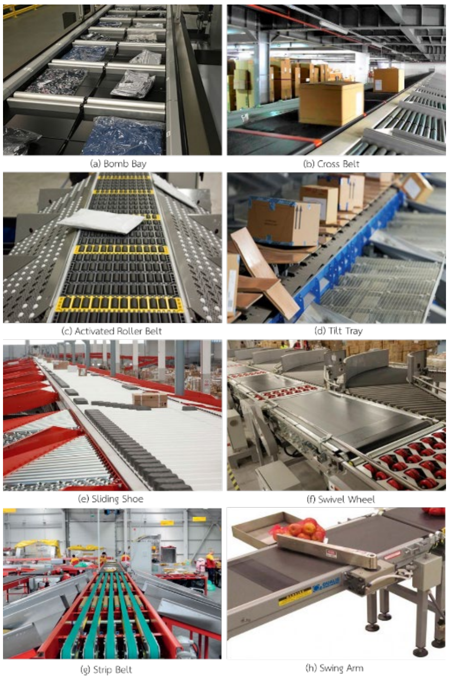


Fig. 1 Various automatic parcel sorter technologies

แสดงการเปรียบเทียบระบบคัดแยกแบบต่างๆตามอัตราการขนถ่ายวัสดุ หัวคัดแยกที่เหมาะกับความเร็วในการขนถ่ายระหว่าง 4,800 ถึง 12,000 ชิ้นต่อชั่วโมงได้แก่ Sliding Shoe, Tilt Tray, Cross Belt, และ Bomb Bay หัวคัดแยกอีกประเภทที่ค่อนข้างใหม่และกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจคือแบบ Activated Roller Belt หรือ ARB ซึ่งมีอัตราการขนถ่ายวัสดุได้สูงใกล้เคียงกับแบบ Cross Belt

ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ ได้มาจากการลงพื้นที่พูดคุยกับผู้ใช้ คือบริษัทไปรษณีย์ไทยที่มีความต้องการเครื่องคัดแยกวัสดุที่มีขนาดเหมาะสมกับศูนย์คัดแยกไปรษณีย์ย่อย ที่มีพื้นที่จำกัด และยังมีความต้องการในการปรับความยืดหยุ่นในการทำงานของเครื่องคัดแยกให้เหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆจึงเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องคัดแยกให้มีลักษณะเป็นโมดูลมีขนาดความยาวไม่เกิน 2 เมตร ความกว้างไม่เกิน 1 เมตรและรองรับกับขนาดของพัสดุไปรษณีย์แบบกล่อง และมีอัตราการคัดแยกไม่เกิน 8,000 ชิ้นต่อวัน

ความเร็วของ Modular Belt สามารถคำนวณได้ดัง Equation 1

$$\left(V_{\text{Conveyor}}\right) = \frac{S}{3600} * 2G = 1.25 \text{ m/s} \quad (1)$$

ความกว้างของ Auxiliary Belt เป็นดัง Equation 2

$$G > \frac{B}{1.5} \quad (2)$$

สำหรับ $G = 0.45 \text{ m}$ เลือกความกว้าง $B = 0.5 \text{ m}$

ความเร็วของ Auxiliary Belt สามารถคำนวณได้ดัง Equation 3 คือเวลาของการคัดแยก และ Equation 4 ความเร็วของ Auxiliary Belt

$$(t_{\text{Sorter}}) = \frac{(B/2)}{V_{\text{Conveyor}}} = 0.2 \text{ s} \tag{3}$$

$$(V_{\text{Sorter}}) = \frac{(W/2)}{t_{\text{Sorter}}} = 1.25 \text{ m/s} \tag{4}$$

ระยะของการวาง Auxiliary Belt (P) เป็นดัง Equation 5

$$P > B \tag{5}$$

สำหรับ $B = 0.5 \text{ m}$ เลือก $P = 0.6 \text{ m}$

ความยาวของ Modular Belt ทั้งหมด (L) สามารถคำนวณได้จาก Equation 6

$$P = \frac{L - (B * S_{\text{Number}})}{S_{\text{Number}} - 1} \tag{6}$$

$L = 4.9 \text{ m}$

ข้อมูล Linear-Sorter เป็นดัง Table 1

Table 2 Design Information Linear-Sorter

	Item	Design	Unit
1	Conveyor belt width	650	mm.
2	Conveyor Length	1500	mm.
3	Number of Sorting Channels	1 model / 2	channel
4	Sorting Speed	2,000-6,000	unit per hour
5	Package Weight	0.1 - 25	kg
6	Package Size		
	6.1 minimum size	140*200 *60	width* length* height mm.
	6.2 max size	450 * 550* 400	width* length* height mm.

เครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์อัตโนมัติ ประกอบไปด้วยส่วนการทำงานทั้ง 3 ส่วน ส่วนที่ 1 คือส่วนของสายพานที่รับพัสดุเข้ามาในระบบสายพานในส่วนนี้ทำหน้าที่จัดระยะของวัสดุก่อนเข้าไปในสายพานส่วนที่ 2 เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดของการตรวจสอบส่วนต่อมาคือส่วนของสายพานส่วนที่ 2 สายพานส่วนนี้ติดตั้งกล้อง Line scan เพื่อตรวจสอบบาร์โค้ดหรือรหัสไปรษณีย์บนวัสดุ ส่วนต่อมาคือส่วนที่ 3 เป็นส่วนของสายพานคัดแยกทั้ง 3 ส่วนทำงานรวมกันโดยมีคอมพิวเตอร์หลักในสายพานส่วนที่ 2 ทำหน้าที่ควบคุมระบบหลักทั้งหมดผ่านเน็ตเวิร์คไร้สาย ส่วนต่อมาเป็นส่วนของไดอะแกรมการควบคุมรวมของเครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์อัตโนมัติถูกควบคุมลำดับการทำงานจากคอมพิวเตอร์หลักที่

ติดตั้งอยู่ในสายพานส่วนที่ 2 คอมพิวเตอร์หลักทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลจากระบบแมชชีนวิชั่นที่ใช้ในการตรวจสอบภาพเพื่อตรวจสอบขอมูลบนบาร์โค้ดหรือในรหัสไปรษณีย์จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากบาร์โค้ดหรือรหัสไปรษณีย์ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาจัดอันดับเพื่อระบุช่องทางออกของกล่องพัสดุบนสายพานแต่ละตัวในสายพานส่วนที่ 3 คอมพิวเตอร์หลักส่งข้อมูลของกล่องพัสดุที่จะถูกคัดแยกไปยังโมดูลสายพานคัดแยกแต่ละตัวผ่านระบบเน็ตเวิร์คไรสายไปยังโมดูลสายพานแต่ละตัว สายพานแต่ละตัวจะได้รับข้อมูลกล่องพัสดุที่จะคัดแยกบนสายพานหรือปล่อยผ่านไปยังสายพานคัดแยกตัวต่อไปนอกจากนี้คอมพิวเตอร์หลักยังทำการควบคุมสายพานส่วนที่หนึ่งสำหรับการเปิดปิดการทำงานหรือปรับระยะห่างของกล่องพัสดุผ่านระบบเน็ตเวิร์คไรสายเช่นกับสายพานส่วนอื่นๆ ดังแสดงใน Fig. 2

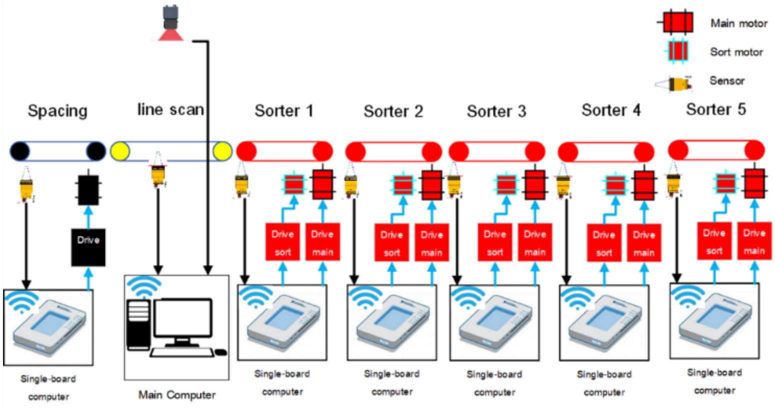


Fig. 2 Installation diagram of control system on the automatic parcel sorting machine

จาก Fig. 1 จะเห็นได้ว่าเคลื่อนคัดแยกแต่ละโมดูลสามารถสื่อสารกันด้วยระบบไร้สายทำให้สามารถปรับเปลี่ยนจำนวนหัวคัดแยกได้สะดวกมากขึ้นโดยลดการเดินสายไฟให้น้อยที่สุดทำให้มีความยืดหยุ่นในการทำงานและมีความสะดวกต่อการติดตั้งหรือรื้อถอนการทำงาน เพราะเนื่องจากศูนย์ไปรษณีย์ย่อยแต่ละที่ต้องใช้พื้นที่ในการดำเนินกิจกรรมอื่นๆ ร่วมกัน ทำให้มีความจำเป็น ในการปรับเปลี่ยนพื้นที่การใช้งานอยู่ตลอดเวลารวมถึงพื้นที่ตั้งเครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์

สายพานส่วนที่ 1

ประกอบไปด้วยสายพานลำเลียงแบบ PVC (Belt Conveyor) ขับด้วย Servo Motor ที่ควบคุมความเร็วและการทำงานจาก Driver AC Servo Motor เซ็นเซอร์ในสายพานส่วนที่หนึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบกล่องพัสดุที่เข้ามาในสายพานเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจเจอวัสดุจะส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ถูกเชื่อมต่อกับ Driver จะสั่งให้ Driver ควบคุมจังหวะการทำงานของ Servo Motor ที่ติดตั้งสำหรับขับสายพานเมื่อควบคุมการทำงานของ Servo Motor ได้ก็สามารถจะควบคุมการเคลื่อนที่ของกล่องพัสดุบนสายพานได้โดยสายพานในส่วนที่ 1 ทำหน้าที่ควบคุมให้วัสดุมีระยะห่างที่เหมาะสมก่อนที่กล่องพัสดุจะเข้าไปในสายพานส่วนที่ 2 ดังแสดงใน Fig. 3 แสดงไดอะแกรมและรูปสายพานลำเลียงแบบ PVC (Belt Conveyor) การควบคุมระยะห่างของกล่องพัสดุมีความสำคัญเนื่องด้วยในการตรวจสอบบาร์โค้ดหรือรหัสไปรษณีย์บนสายพานส่วนที่ 2 สามารถทำได้เพียงครั้งละ 1 กล่องถ้ากล่องพัสดุเข้ามาในบริเวณการตรวจสอบมากกว่าหนึ่ง 1 กล่องอาจทำให้การตรวจสอบเกิดความผิดพลาดหรือลดความถูกต้องลง นอกจากนี้การควบคุม

ระยะห่างของกล่องพัสดุยังช่วยลดการผิดพลาดในส่วนของการคัดแยกกล่องพัสดุในสายพานส่วนที่ 3 เนื่องด้วยการออกอุปกรณ์หรือเครื่องคัดแยกจำเป็นต้องมีระยะห่างของกล่องพัสดุในกรณีที่กล่องพัสดุทั้งสองไม่ได้ไปในช่องทางออกเดียวกัน

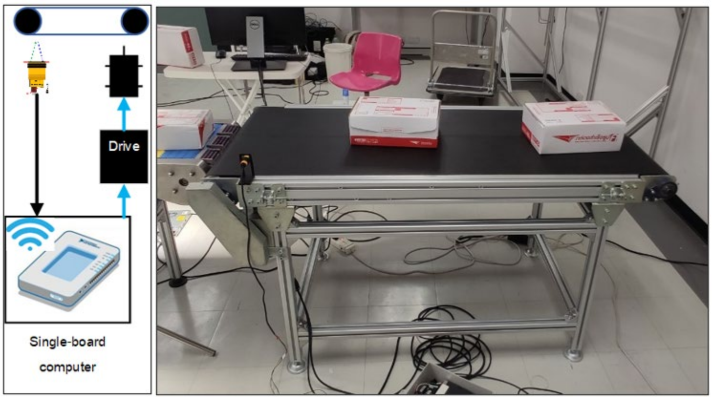


Fig. 3 Diagram and PVC (Belt Conveyor) Part 1

สายพานส่วนที่ 2

ประกอบไปด้วยตัวสายพานเป็นแบบสายพานโมดูลาร์ (Modular Belt) ขับด้วย Motor ที่ควบคุมความเร็วด้วย Driver AC ดังแสดงใน Fig. 4 เซ็นเซอร์บนสายพานส่วนที่ 2 ทำหน้าที่ตรวจสอบกล่องพัสดุที่เข้ามาในสายพานเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจเจอวัสดุจะส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์ที่ถูกเชื่อมต่อกับกล้อง Line scan จะสั่งให้กล้อง Line scan ทำหน้าที่จับภาพ (camera snap) เพื่อควบคุมจังหวะของการจับภาพกล่องพัสดุบนสายพานให้ได้ภาพที่ครบถ้วนและมีความถูกต้องเหมาะสำหรับการประมวลผลในระบบแมชชีนวิชั่นที่ใช้ในการอ่านข้อมูลบาร์โค้ดและรหัสไปรษณีย์ โดยยังมีระบบ Panel light สำหรับให้แสงสว่างช่วงให้ความสว่างที่เพียงพอต่อการตรวจสอบดัง Fig. 4

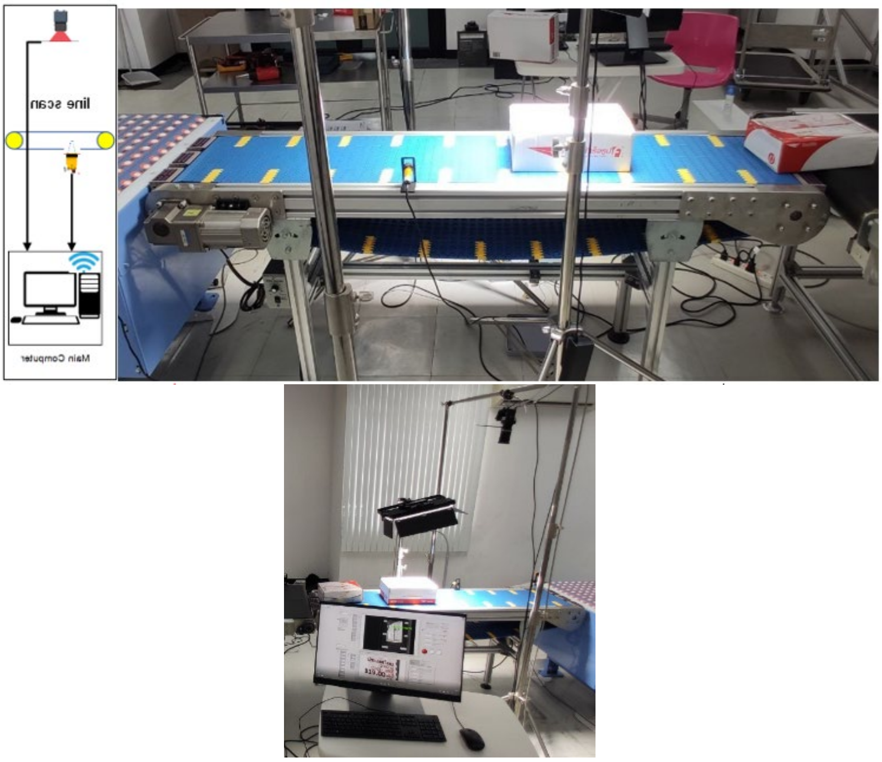


Fig. 4 Diagram, main control, line scan camera and panel light in modular belt part 2

สายพานส่วนที่ 3

ประกอบไปด้วยตัวสายพานเป็นสายพานลำเลียงแบบสายพานแบบ Activated Roller Belt (ARB) โดยการทำงานของสายพานจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนแรกคือสายพานหลัก (Main belt) จะทำการขนย้ายกล่องไปตามแนวยาวขับด้วย AC Motor ที่ควบคุมความเร็วด้วย Driver AC ส่วนที่สองคือสายพานแบบขวาง (Cross belt) ติดตั้งอยู่ด้านใต้สายพานหลักทำหน้าที่ขับลูกบอลหรือลูกกลิ้งของสายพานหลักทำให้ พัสดุเคลื่อนที่ไปทางด้านขวางกับสายพานหลักโดยเคลื่นที่ไปทางช่องทางออกด้านซ้ายหรือขวาเพื่อให้กล่องสามารถเคลื่อนที่ไปลงถังทางด้านข้างได้ตามต้องการ ดัง Fig.5 สายพานแบบขวาง ขับด้วย Servo Motor ที่ควบคุมความเร็วและการทำงานด้วย Driver AC Servo Motor เซ็นเซอร์ในสายพานส่วนที่ 3 ทำหน้าที่ตรวจสอบกล่องพัสดุที่เข้ามาในสายพานเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจเจอวัสดุจะส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ถูกเชื่อมต่อกับ Driver AC Servo Motor และสั่งให้ Driver AC Servo Motor ควบคุมจังหวะการทำงานของ Servo Motor เมื่อควบคุมการทำงานของสายพานแบบขวางสำหรับขับลูกบอลหรือลูกกลิ้งทำให้กล่องพัสดุเคลื่อนที่ออกจากสายพานหลักตามช่องทางที่ต้องการ โดยเงื่อนไขการทำงานของสายพานแบบขวางในการคัดแยกกล่องพัสดุไปในช่องทางออกซ้ายหรือขาวหรือปล่อยผ่านกล่องพัสดุไปยังสายพานส่วนต่อไปนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้รับจากระบบแมชชีนวิชั่นของคอมพิวเตอร์ในสายพานส่วนที่ 2 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของโมดูลสายพานแบบ Activated Roller Belt (ARB) แสดงใน Fig. 6 โมดูสายพานถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กโดยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กจะรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์หลัก ผ่านระบบเน็ตเวิร์คไรสายและข้อมูลจากเซ็นเซอร์ จากนั้นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กประมวลผลข้อมูลที่ได้แล้วส่งการควบคุมไปที่ Driver AC Servo Motor สำหรับควบคุมสายพานแบบขวางเพื่อที่จะทำการคัดแยกวัสดุหรือไม่คัดแยกวัสดุที่ผ่านเข้ามาในสายพาน

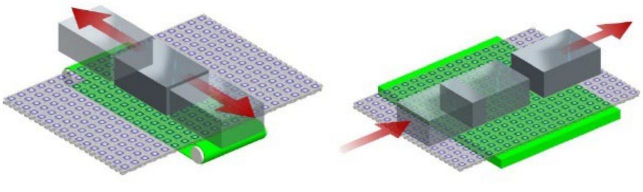


Fig. 5 Mechanism of Activated Roller Belt (ARB) Part 3

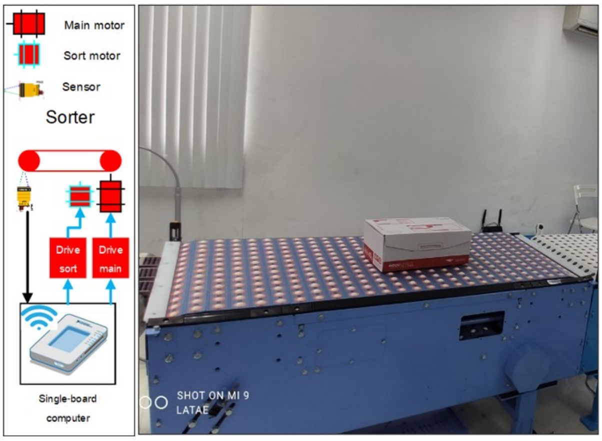


Fig. 6 Diagram and Activated roller belt (ARB) part 3

หลักการออกแบบสายส่วนที่ 3 ทีมวิจัยออกแบบให้เป็นระบบโมดูลแยกกันอิสระชัดเจนของสายพานแต่ละตัวในสายพานส่วนที่ 3 สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์หลักผ่านระบบเน็ตเวิร์คไร้สาย ทำให้ลดขั้นตอนของการเชื่อมต่อสายไฟหรือสายข้อมูลระหว่างโมดูลหรือระหว่างคอมพิวเตอร์หลักเพื่อที่จะสามารถต่อขยายหรือลดจำนวนการส่วนคัดแยกให้เหมาะสมกับหน่วยงานที่ใช้หรือจำนวณกล่องพัสดุที่ต้องทำการคัดแยก สายพานแต่ละตัวในส่วนที่ 3 จะมีคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและระบบเซ็นเซอร์รวมถึงระบบ Driver ติดตั้งสำเร็จอยู่ในตัวเองเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปต่อขยายโมดูดัง Fig.7 แสดงการต่อกันระหว่างโมดูลพานลำเลียงแบบสายพานแบบ Activated Roller Belt หลายโมดูล

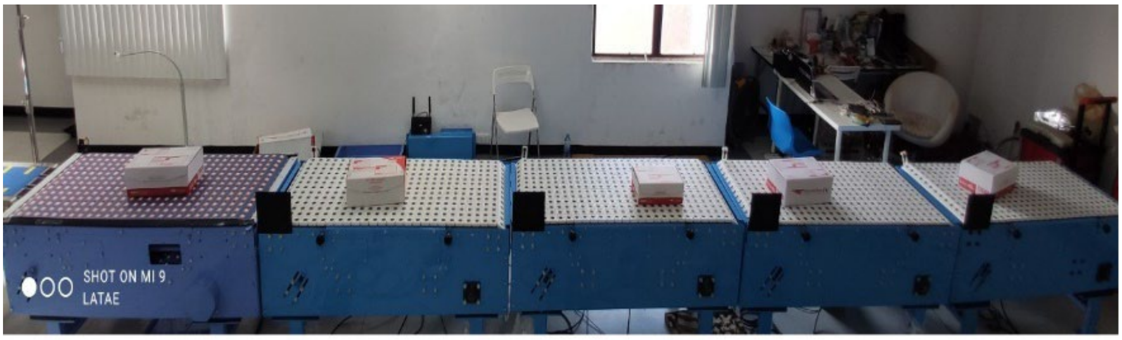


Fig. 7 Activated roller belt (ARB) system

ระบบ Machine Vision

ทีมวิจัยใช้การอ่านบาร์โค้ดและรหัสไปรษณีย์บนแสตมป์ของกล่องด้วย algorithm ด้าน Machine Vision โดยจะทำการตรวจหาตัวอักษร R ในภาพก่อน และทำการกำหนดเกณฑ์อ้างอิงที่กึ่งกลางของตัวอักษร หลังจากนั้นจะทำการกำหนดบริเวณที่เป็นรหัสไปรษณีย์และเป็นตัวอักษรของบาร์โค้ด ก่อนที่จะทำการอ่านตัวอักษรโดยใช้ algorithm ด้าน optical character recognition (OCR) หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการกำหนดหมายเลขของถัง (bin) ที่จะบรรจุกล่องที่อ่านได้นี้

Fig. 8 Characteristics of reading barcodes and postal codes

Algorithm ทั้งหมดถูกเขียนไว้ด้วยโปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่มีลักษณะการเขียนเป็นแบบ graphical หรือที่เรียกว่า G programming รวมถึงฮาร์ดแวร์และกล้อง Line scan รวมถึงหน้าจอแสดงผลและควบคุม (GUI) ทั้งหมดจะถูกเขียนและเชื่อมต่อกับ LabVIEW

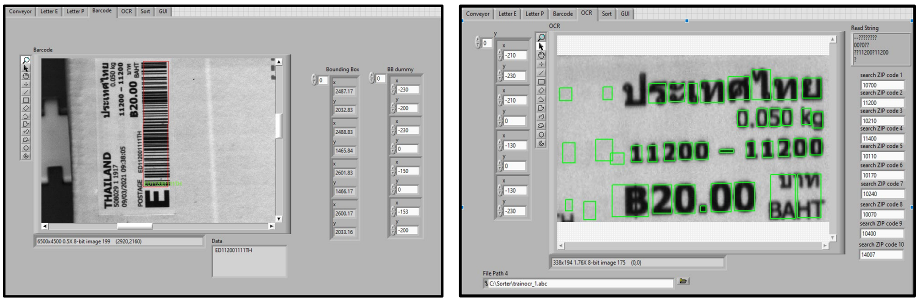


Fig. 9 Barcode and OCR verification system on LabVIEW program

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ทีมวิจัยได้ทำการทดสอบความเร็วในแต่ละส่วนของเครื่องคัดแยกได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าความเร็วของแต่ละส่วนนั้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยในการทดสอบจัดวางกล้องวัสดุให้ระยะห่างกัน 0.7 เมตร ความเร็วที่เร็วที่สุดจะอยู่ที่สายพานส่วนที่หนึ่งซึ่งสามารถทำความเร็วได้ 1.5 เมตรต่อวินาที และความเร็วต่ำสุดอยู่ที่สายพานส่วนที่ 2 ทำความเร็วได้โดยประมาณ 0.7 เมตรต่อวินาทีดังนั้นทำให้ข้อจำกัดของสายพานคัดแยก มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 0.7 เมตรต่อวินาทีและจากระยะการวางกล่องวัสดุทำให้ความเร็วในการคัดแยกสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1 กล่องต่อวินาที ในส่วนต่อมาความแม่นยำผู้วิจัยได้ใช้กล่องวัสดุทีติดบาร์โค้ดและรหัสไปรษณีย์ที่จัดสร้างขึ้น ในการทดสอบการอ่าน หรือการตรวจสอบด้วยระบบ Machine Vision ผลปรากฏว่าความผิดพลาดโดยประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยส่วนใหญ่เกิดจากการชนของกล่องวัสดุกับขอบหรือส่วนต่างๆ ของระบบคัดแยก

Table 2 speed and sorting rate

device	speed	Main belt	Cross belt	sorting rate
belt part 1	1.5 m/s	-	-	2 box/second
belt part 2	0.7 m/s	-	-	1 box/second
belt part 3	1 m/s	ที่ 30 Hz (max 60H)	2000 (เต็ม 5000)	1.4 box/second
camera speed	1 m/s	-	-	-

สรุป

จากการทดสอบความเร็วของการคัดแยกอยู่ที่ประมาณกล่องละ 1 วินาทีหรือชั่วโมงละ 3,600 กล่อง โดยมีความถูกต้องในการคัดแยก 100% มีจำนวนกล่องที่ระบบกล้องไม่สามารถอ่านข้อมูลบนกล่องได้ไม่ถึง 1% ความเร็วของการคัดแยกถูกจำกัดอยู่ที่ความเร็วของสายพานในส่วนที่ 2 ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มความเร็วขึ้นได้อีกถึงประมาณ 3–4 เท่า ซึ่งคณะวิจัยมีความเห็นว่า หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพอัตราคัดแยกควรแก้ไขความเร็วของสายพานส่วนที่ 2 ให้มีความเร็วมากขึ้นรวมถึงควรมีการทดสอบในมิติต่างๆ อาทิเช่นความทนทานของระบบการนำไปทดสอบกับสิ่งแวดล้อมจริงที่ศูนย์คัดแยกต่างๆ

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การวิจัยและพัฒนาเครื่องคัดแยกพัสดุไปรษณีย์อัตโนมัติสามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก*สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)*รวมทั้งได้ความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่ให้คำปรึกษาในด้านการออกแบบระบบเซ็นเซอร์และการส่งข้อมูล และขอขอบคุณบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวไว้ที่ให้การสนับสนุนจนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

พันคำ ศรีอุทัย และคณะ. 2562. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการโมดูลคัดแยกของระบบคัดแยกพัสดุอัตโนมัติด้วยระบบสายพานลำเลียง สถาบัน ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. หน้า 1-38.

Kay, M.G. 2012. Material Handling Equipment. Fitts Dept. of Industrial and Systems Engineering North Carolina State University.

National Instruments Corporation. 2018. LabVIEW Machine Vision and Image Processing Course. https://www.ni.com/en-th/shop/services/education-services/customer-education-courses/labview-machine-vision-and-image-processing-course-overview.html

การออกแบบและจัดสร้างต้นแบบเครื่อง Dry fractionation

Design and prototype of palm oil dry fractionation

<u>วสุ ทาแก้ว</u>[a], ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[a,*], รยากร นกแก้ว[b]

<u>Vasu Thakaew</u>[a], Taweedej Sirithanapipat[a,*], Rayakorn Nokkaew[b]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Center of Excellence-Oil Palm Kasetsart University, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: taweedej.s@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบจำลองกระบวนการ Dry fractionation เพื่อให้นักวิจัยหรือเกษตรกรที่ต้องการศึกษาหรือทดสอบ ปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึกของน้ำมันปาล์มได้แก่ 1. อุณหภูมิ 2. เวลา 3. ความเร็วรอบในการกวน 4. อัตราการเพิ่มลดอุณหภูมิ นอกจากนั้นเครื่องต้นแบบยังได้ทำการพัฒนาปรับปรุงให้ตัวเครื่องสามารถบันทึกวิดีโอ และเก็บค่าของปัจจัยต่างๆ ที่ผลต่อการตกผลึกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อยอดโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) หรือการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ร่วมกับการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ผู้วิจัยใช้การควบคุมแบบ ON-OFF Control with Hysteresis เพื่อควบคุมปัจจัยที่ผลต่อการตกผลึกน้ำมันปาล์ม โดยเครื่องต้นแบบสามารถทำอุณหภูมิได้ของน้ำมันได้ที่ 90 °C–18 °C อัตราการการทำร้อน 5 °C/min อัตราการทำความเย็น 0.6 °C/min, 0.77 °C /min, 0.83 °C/min ที่ อุณหภูมิขาเข้า (T_{in}) ที่ 28 °C , 24 °C, 20 °C ความเร็วรอบกวนสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0–70 rpm

คำสำคัญ: Dry fractionation, ON -OFF Control with Hysteresis, การตกผลึกของน้ำมันปาล์ม

Abstract

This research aims to provide a prototype of the dry fractionation process for researchers or farmers who examine the factors that affecting the crystallization of palm oil such as 1. Temperature 2. Time 3. Stirring speed 4. rate of temperature change. The prototype has video recording function and collect factors that affect to crystallization for further analysis using machine learning or computer vision (Computer Vision) with deep learning (Deep learning). The researchers used ON control. -OFF Control with Hysteresis to control factors affecting palm oil crystallization. The prototype can have an oil temperature of 90 °C–18 °C, a heating rate of 5 °C / min, a cooling rate of 0.6 °C / min, 0.77 °C / min, and 0.83 °C / min at inlet temperature (Tin). At 28 °C, 24 °C, and 20 °C, the stirring speed can be adjusted from 0 to 70 rpm.

Keywords: Dry fractionation, ON -OFF Control with Hysteresis, Palm oil crystallization

คำนำ

น้ำมันปาล์ม (Palm oil) สามารถสกัดจากผลปาล์มโดยมีกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากเมล็ดจะถูกนำมาสกัดโดยการหีบ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหีบ ก็จะนำน้ำมันไปทำการกลั่นบริสุทธ์เพื่อให้น้ำมันภายในเมล็ดปาล์มดิบเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธ์ กระบวนการกลั่นสามารถแบ่งได้เป็น การแยกทางกายภาพ (Physical or Steam Refining) และ วิธีการทางเคมี (Chemical Refining) โดยโรงสกัดน้ำมันชุมชน โรงงานขนาดเล็กหรือโรงงานที่มีอัตราการสกัดน้ำมันน้อยกว่า 30 ตันต่อชั่วโมง จะนิยมใช้วิธีการสกัดน้ำมันทางกายภาพ เพราะมีต้นทุนต่อหน่วยที่ราคาต่ำกว่า ไม่มีการใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยา และเกิดสารพิษขึ้นในกระบวนการรวมถึงไม่มีน้ำเสีย การสกัดด้วยวิธีทางกายภาพ หลังจากที่นำน้ำมันดิบผ่านกระบวนการกลั่น ก็จะนำน้ำมันเข้าสู่กระบวนการแยกส่วน (Fractionation) ที่มีจุดหลอมเหลวแตกต่างกัน โดยอาศัยการตกผลึก และทำการแยกส่วนไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ต่างๆ เหล่านี้ออกจากกัน เพื่อปรับปรุงทางกายภาพของคุณภาพน้ำมัน เนื่องจากมีสิ่งเจือปนมากับกระบวนการสกัดน้ำมัน ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันจะใช้ประโยชน์ที่ไตรกลีเซอร์ไรด์มีจุดหลอมเหลวแตกต่างกัน จึงสามารถทำให้น้ำมันมีจุดหลอมเหลมที่แตกต่างกันทำให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ 1. สเตียริน (Stearin) โดยสเตียรินมีสถานะเป็นของแข็งและมีจุดหลอมเหลวสูง 2. โอเลอิน (Olein) มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าสเตียรินและมีมูลค่าสูงกว่า Stearin ซึ่งนิยมนำมาใช้ทำเป็นน้ำมันสำหรับการบริโภคหรือใช้ประกอบอาหารในครัวเรือน

กระบวนการแยกส่วนได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังนี้ 1. Wet fractionation 2. Lanza fractionation 3. Dry Fractionation โดยวิธี Dry Fractionation เป็นหนึ่งในวิธีการแยกลำดับส่วนโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย จึงทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องการปนเปื้อนของสารเคมี สามารถกระทำโดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนจึงไม่ทำให้ต้นทุนสูง เหมาะสมสำหรับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มชุมชนหรือขนาดเล็ก ภายในกระบวนการมีการใช้ความร้อนที่ไม่สูงหรือน้อยที่สุดในทุกกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มรีไฟน์ นอกจากนั้นการใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงยังช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ โดยกระบวนการ Dry Fractionation ให้ความร้อนประมาณ 75 °C–90 °C เพื่อทำให้น้ำมันมีสถานะเป็นของเหลวและมีการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการตกผลึกโดยให้ความเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 25–30 °C เพื่อให้น้ำมันตกตะกอนอย่างช้า ๆ และนำไปผ่านเครื่องกรองสุดท้ายจะได้น้ำมันโอเลอินประมาณ 60% และสเตียรินประมาณ 40% โดยน้ำหนัก (Comeliua, 1973; Thanet Wasuwan, 2538; ศิริกานต์, 2558)

ในศตวรรษที่ 21 มีการใช้กระบวนการ Dry Fractionation เพราะเป็นกระบวนการที่ใช้เงินลงทุนที่ต่ำ และไม่มีการเติมสารรวมถึงต้นทุนในการกำจัดมลพิษหรือของเสียที่เกิดจากกระบวนการ แต่เนื่องจากวิธีการ Dry Fractionation ไม่สามารถคาดเดาผลผลิตของน้ำมันโอเลอินหรือสเตียรินได้ รวมถึงต้องใช้เวลานานและแรงงานคนจำนวนมาก (Timms, 2005) เพราะแต่ละโรงงานมีการใช้น้ำมันปาล์มดิบที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นผลปาล์มที่ปลูกจากที่เดียวกันก็มีความแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาลปลูกเนื่องจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เช่น อากาศ, แร่ธาตุในดิน, อุณหภูมิ จึงทำให้ปาล์มที่นำมาสกัดเป็นน้ำมันนั้นมีความแตกต่างกัน จึงทำให้การที่จะหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมทำได้ยาก และเนื่องจากเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมผู้ควบคุม ต้องเป็นคนใส่ค่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมเองเท่านั้นจึงทำให้เป็นการยากที่จะคาดเดาอุณหภูมิที่ดีที่สุดได้ จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการจำลองกระบวนการตกผลึกของน้ำมันปาล์ม ในปี ค.ศ. 1981 ได้มีการสร้างเครื่องจำลองขึ้นมาโดยสามารถปรับอุณหภูมิต่ำที่สุดได้ 30 °C (Iida et al., 1981) ในงานวิจัยนี้ทำให้สรุปได้ว่าตัวเครื่องยังไม่สามารถทำการเพิ่มอุณหภูมิภายในตัวเครื่องที่ออกแบบ ในปี ค.ศ. 2012 ในงานวิจัย Method for Dry Fractionation of Palm Oil นักวิจัยได้ทำการสร้างเครื่องจำลอง โดยทำการเพิ่มกระบวนการกวนโดยตัวเครื่องสามารถทำอุณหภูมิในช่วงการทำความร้อนได้ที่ 50 °C–70 °C ช่วงอุณหภูมิสำหรับการตกผลึกทำได้ 25 °C–20 °C และมีรอบการกวนที่ 30 rpm (孙健 et al., 2012) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2538 ในงานวิจัยการศึกษาการแยกสเตียรินและโอเลอินในน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างเครื่องมือสำหรับการจำลองกระบวนการตกผลึก โดยตัวเครื่อง

ทำความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C และกระบวนการทำความเย็นอยู่ในช่วง 25 °C–15 °C มีอัตราการทำความเย็น 0.2 °C – 0.5 °C / min ความเร็วรอบในการกวนของใบกวน 10–90 rpm ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย การศึกษาการแยกสเตียรินและโอเลอินในน้ำมันปาล์มรีไฟน์ เพื่อออกแบบพัฒนา และจัดสร้างตัวเครื่องให้เป็นระบบปิดและตัวเครื่องสามารถจำลองกระบวนการ Dry Fractionation ผู้วิจัยมุ่งหวังเพื่อให้ผู้คนในท้องถิ่น เกษตรกร นักวิจัย รวมถึงผู้ที่สนใจสามารถเข้าถึงและใช้งานเครื่องกระบวนการ Dry Fractionation จำลองได้มากขึ้น โดยที่มีราคาไม่สูงเกินไปนักและสามารถใช้งานได้สะดวก นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้ออกแบบให้ตัวเครื่องจำลองสามารถเก็บบันทึกข้อมูลปัจจัยต่างๆ ที่มีผลในกระบวนการ Dry Fractionation เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หรือพัฒนาต่อยอดโดยใช้วิธีการ Machine learning นอกจากนั้นตัวเครื่องจำลองสามารถบันทึกวิดีโอ เพื่อวิดีโอไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Image processing ร่วมกับ Deep learning

อุปกรณ์และวิธีการ

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเครื่องต้นแบบโดยมุ่งหวังให้ตัวเครื่องมีขนาดอยู่ที่ 65×120×160 cm^3 โดยที่ Fig. 1 เป็นการแสดงภาพ Drawing ของตัวเครื่องต้นแบบ และมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้ 1. เครื่องต้นแบบมีช่วงอุณหภูมิของกระบวนการทำความร้อนที่ 40 °C–90 °C 2. เครื่องต้นแบบมีช่วงอุณหภูมิของกระบวนการทำความเย็นอยู่ในช่วง 25 °C–20 °C 3. สามารถปรับความเร็วรอบของใบกวนสารที่ 0–70 rpm 4. ตัวเครื่องสามารถเก็บค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการ Dry fractionation และบันทึกวิดีโอลงใน SD card โดยผู้วิจัยทำการออกแบบและถอดราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการจัดสร้างเครื่องต้นแบบได้ดัง Table 1

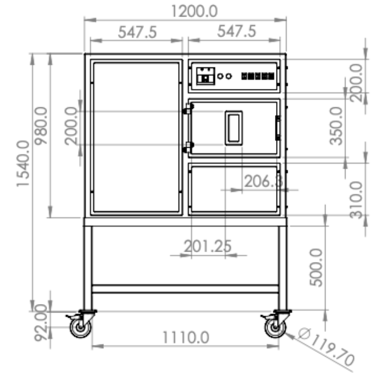


Fig. 1 Drawing of prototype dry fractionation machine

Table 1 Equipment

No.	Equipment	Amount	Price(bath)
1	Heat plate 430 watt	1	450
2	Portable air 8000 BTU	1	7,990
3	Stirrer & Coupling (10x10mm)	1	1,250
4	DC motor 12 V 70 rpm	1	1,150
5	Arduino mega	1	790
6	Power supply	1	1,400

7	Machine structure	1	40,000
8	Camera 720 p	1	990
9	Controller	2	20,000
10	IR temperature + lens	1	2,500
11	IR transmitter & IR receiver	1	500
12	Lighting	2	900
13	Electronic parts (Switch, breaker, alarm)	-	4000
		Sum	81,920

กระบวนการ Dry fractionation มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมประกอบไปด้วย 1. อุณหภูมิ 2. เวลา 3. ความเร็วรอบในการกวน 4. อัตราการเพิ่มลดอุณหภูมิ โดยการทดลองใช้น้ำมันปาล์ม 400 กรัม จากตารางที่ 1 อุปกรณ์ที่คุมอุณหภูมิและเวลาได้แก่ Heat plate และ Air condition โดยกระบวนการทำความร้อนใช้การควบคุมแบบ ON -OFF Control with Hysteresis ในการส่ง-สัญญาณเพื่อเปิดปิดการทำงานของแผ่นความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยรวมถึงสามารถกำหนด Heat rate เพื่อควบคุมเวลาในกระบวนการทำความร้อน ในส่วนกระบวนการทำความเย็นใช้การควบคุมแบบ ON -OFF Control with Hysteresis ร่วมกับ cooling rate ในการสั่งสัญญาญในการควบคุม Air condition ผ่าน IR transmitter ปัจจัยสุดท้ายในใช้สัญญาณ PWM ในการสั่งการทำงานมอเตอร์ควบคุมใบกวน Diagram การจำลอง Dry fractionation ของเครื่องต้นแบบแสดงดัง Fig. 2

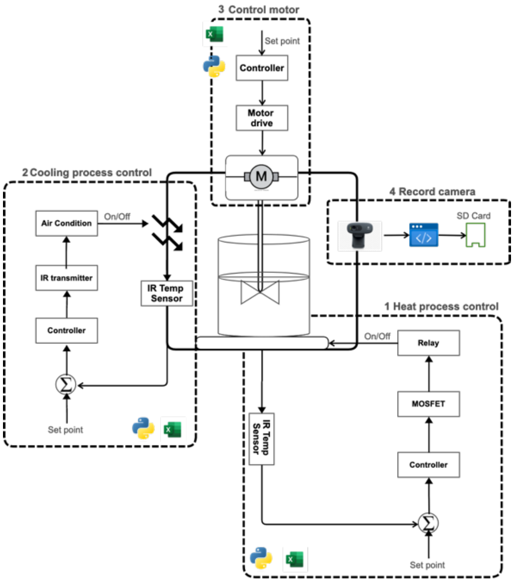


Fig. 2 Diagram process for dry fractionation prototype

จาก Fig. 2 สามารถแบ่งกระบวนการทำงานของกระบวนการ Dry fractionation ได้เป็น กระบวนการที่ 1 กระบวนการทำความร้อนโดยใช้การควบคุมแบบ ON - OFF Control with Hysteresis เป็นการควบคุมแบบ close loop โดยมีสมการดัง Equation 1

$$H(s)=\frac{K}{T\cdot s+1}\cdot e^{-\tau\cdot s} \quad (1)$$

เมื่อ

K คือ Gain

T คือ Time constant

τ คือ Dead time

โดยสัญญาณที่ส่งเข้า ตัวควบคุม (Controller) คือ error ที่เกิดจาก Sensor IR thermal และสัญญาณ Out- put เพื่อนำไปสั่งงานวงจร MOSFET เพื่อทำการจ่ายไฟ 12 V ให้กับ Heat plate เพื่อเริ่มกระบวนการทำความร้อนโดยจากการทดลองทำการส่งสัญญาณ On เป็นระยะเวลา 1 นาทีและส่งสัญญาณ Off เป็นระยะเวลา 2 นาที ดัง Fig. 3 จากนั้นทำการบันทึกค่าโดยใช้โปรแกรม Python รับค่า IR thermal จาก Arduino

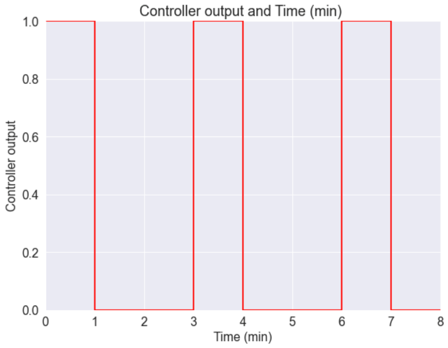


Fig. 3 Controller output and Time (Min)

กระบวนการที่ 2 กระบวนการทำความเย็น เนื่องจากทางผู้วิจัยใช้ Air condition ที่ขายตามท้องตลาดจึงทำการใช้ Sensor IR transmitter ในการจำลองการส่งสัญญาณคล้ายกับสัญญาณรีโมท เพื่อทำการตั้งอุณหภูมิของ Air condition โดยทำการคัดลอกสัญญาณจากรีโมทที่ทางผู้จัดจำหน่ายให้มาพร้อมตัวเครื่อง Air condition โดยใช้ Sensor IR receiver ในการจดจำสัญญาณลง microcontroller เพื่อให้ IR transmitter ทำการส่งสัญญาณที่ทำการจำลองเพื่อควบคุม Air condition และทำการรับค่าอุณหภูมิของน้ำมันและอุณหภูมิของห้องทำความเย็นจาก sensor IR thermal โดยให้ microcontroller ส่งผ่านโปรแกรม Arduino และให้ python ทำการเก็บค่าบันทึกผลและบันทึกไฟล์ เพื่อทำการหา อัตราทำความเย็นเฉลี่ยของ Air condition ที่อุณหภูมิ 28° C, 24° C, 20° C ตามลำดับจากนั้นทำการหาอัตราทำความเย็นจากความชันของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเทียบกับ Absolute ของเวลาเวลาในหน่วยนาที ตาม Equation 2

$$Cooling\ rate = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \qquad (2)$$

เมื่อ

Y = อุณหภูมิของน้ำมัน

X = เวลา (Min)

กระบวนการที่ 3 กระบวนการควบคุมความเร็วของใบกวน โดยใช้ motor drive ทำการรับสัญญาณ input จาก microcontroller เพื่อสั่งงานมอเตอร์กระแสตรง 12 V 70 rpm โดยสัญญาณ input เป็นสัญญาณ PWM ช่วงตั้งแต่ 0–5 V เพื่อทำการสั่งงานมอเตอร์ผ่าน Motor drive โดยใช้การคำนวณด้วยวิธีการ Interpolate เพื่อทำการสั่งความเร็วรอบของมอเตอร์โดยที่ Microcontroller สั่งสัญญาณ 5 V ไปที่ Motor drive มอเตอร์จะทำการหมุนด้วยความเร็ว 70 rpm ในทางกลับกันถ้าสั่งสัญญาณ 0V ไปที่ Motor drive จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุน

กระบวนการที่ 4 บันทึกวิดีโอ เพื่อให้ผู้ที่สนใจหรือนักวิจัยสามารถนำไปพัฒนา โดยใช้เทคนิค Image processing ร่วมกับการเรียนรู้เชิงลึก และสามารถนำผลไปวิเคราะห์ต่อยอดเพื่อพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพในการสกัดน้ำมันปาล์มในอนาคต โดยการบันทึกวิดีโอจะใช้กล้อง Logitech C270 webcam HD ที่มีความละเอียด 720p และแสดงภาพหรือบันทึกภาพที่ 30 ภาพต่อวินาที (30 fps) ดัง Fig. 4 ใช้ร่วมกับ Jetson nano ดังรูปที่ 5 โดยใช้ python ร่วมกับ Open CV ในการบันทึกวิดีโอลง SD card ของ jetson nano

Fig. 4 Logitech C270 webcam

Fig. 5 Jetson nano

ผลและวิจารณ์การทดลอง

เครื่องต้นแบบจำลองกระบวนการ Dry Fractionation จากการออกแบบ Drawing 2D นำมาพัฒนาเป็นแบบ 3D ดังFig. 6 นอกจากนั้นแบบ 3D ยังสามารถนำมาจัดสร้างและเก็บผลการทดสอบในแต่ละกระบวนการได้ดัง Fig. 7

Fig. 6 Isometric view prototype dry fractionation machine

Fig. 7 Prototype dry fractionation machine

กระบวนการที่ 1 กระบวนการทำความร้อนโดยใช้ heat plate โดยทำการควบคุมโดยใช้ ON - OFF Control with Hysteresis โดยทำการส่งสัญญาณ On 1 นาที และปิด 2 นาทีและทำการหยุดที่ อุณหภูมิที่ 65 °C ที่เวลา 6 นาที เพื่อให้ได้อุณหภูมิสุดท้ายที่ 70 °C มีอัตราการทำความร้อน 5 °C/Min ดัง Fig. 8 ทดสอบโดยใช้น้ำมันปาล์ม 400 กรัม

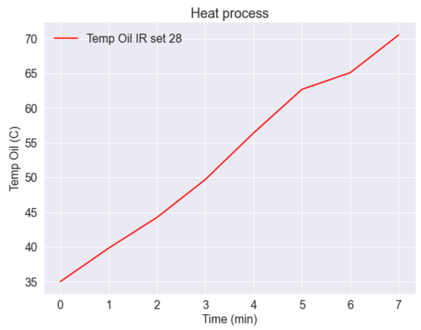


Fig. 8 Temperature profile from Heat process

กระบวนการที่ 2 กระบวนการทำความเย็นโดยทำการควบคุม Air condition ผ่านตัวส่งสัญญาณ IR transmitter เพื่อทดสอบว่าตัวเครื่องต้นแบบสารถทำอุณหภูมิได้ตามที่กำหนดในโดยอ้างอิงค์จากงานวิจัย การศึกษาการแยกสเตียริน และโอเลอินในน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยตัวเครื่องมีอัตราการทำความเย็นที่ 0.6 °C / min, 0.77 °C / min, 0.83 °C / min สามารถทำอุณหภูมิสุดท้ายได้ที่ 30.31 °C, 23.45 °C, 18.87 °C และมีอุณหภูมิสุดท้ายที่ตัวห้อง 26.17 °C, 19.47 °C, 15.81 °C ที่อุณหภูมิขาเข้า (T_{in}) ที่ 28 °C, 24 °C, 20 °C ตามลำดับ ดัง Fig. 9 ทดสอบโดยใช้น้ำมันปาล์ม 400 กรัม

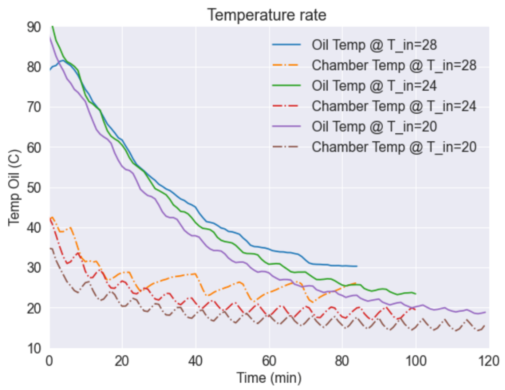


Fig. 9 Temperature rate

กระบวนการที่ 3 กระบวนการควบคุมความเร็วของใบกวนสามารถทำได้ตามวัตถุประสงค์โดยมอเตอร์สามารถทำความเร็วรอบได้ที่ 0–70 rpm กระบวนการที่

4 การบันทึกวิดีโอ เครื่องต้นแบบสามารถบันทึกวิดีโอได้จนจบกระบวนการทั้งในส่วน Heat process และ Cooling process โดยทำการทดสอบเก็บวิดีโอในสภาพแวดล้อมการทำงานจริงของเครื่องต้นแบบดัง Fig. 10 และ Fig. 11 ตามลำดับ

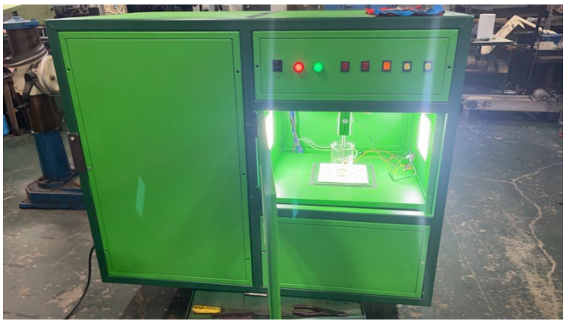


Fig. 10 Record video in Heat process

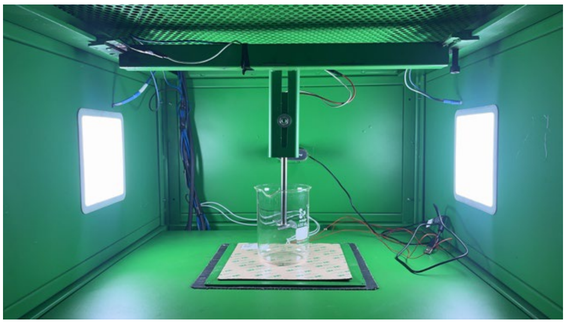


Fig. 11 Record video in Cooling process

สรุป

งานวิจัยนี้สามารถออกแบบเครื่องต้นแบบจำลองกระบวน Dry fractionation ได้และมีช่วงอุณหภูมิการทำความร้อนที่ 40–90 °C โดยมีอัตราการทำความร้อนที่ 5 °C/ มีช่วงอุณหภูมิในกระบวนการทำความเย็นที่ 25–18.87 °C มีอัตราทำความเย็นที่ 0.6 °C/min, 0.77 °C/min, 0.83 °C/min ที่อุณหภูมิขาเข้า 28 °C, 24 °C, 20 °C ตามลำดับ สามารถควบคุมความเร็วรอบของใบกวนสารได้ที่ 0–70 rpm นอกจากนั้นตัวเครื่องยังสามารถบันทึกและเก็บข้อมูลจาก sensor ได้ทั้ง 2 ทุกกระบวนการ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ใช้สถานที่ในการทดลองและเก็บข้อมูล รวมถึง ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ ที่ให้คำปรึกษาและกรุณาช่วยเหลือจัดหาอุปกรณ์และสถานที่ห้องปฏิบัติการ PID Laboratory ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ธเนศ วัยสุวรรณ. 2538. การศึกษาการแยกสเตียรินและโอเลอินในน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยวิธีการตกผลึก. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.

รวีวรรณ คล้ายแต่. 2548. ศึกษาการผลิตน้ำมันปาล์ม: กรณีศึกษา บริษัท ปาล์มน้ำมันธรรมชาติจำกัด คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่

ศิริกานต์ สัตถสิชยพิชญ์. 2558 เทคโนโลยี การกลั่นน้ำมันปาล์มบริโภค. MTEC หน่วยเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีการแปรรูปน้ำมันปาล์ม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

Berger, K.G. 1977. Some theoretical and practical aspects of fractionation of palm oil. Oil Palm News 22: 10–18.

Comeliua, J.A. 1973. Palm oil fractionation-An introductory note. Oil Palm News 15: 16–17.

Editorial Staff. 2020. ON-OFF Controller Principle. https://instrumentationtools.com/onoff-control-principle/, 19 ธันวาคม 2565.

Kellens, M., Gibon, V., Hendrix, M., Greyt, W.D. 2007. Palm oil fractionation. 109: 336–349. doi.org/10.1002/ejlt.200600309

Nugr Budi. 2018. On-off control system. https://x-engineer.org/on-off-control-system/, 17 ธันวาคม 2565.

孙健,雷文忠,张宏杰, et al. 2012. Method for dry fractionation of palm oil. Tianjin Longwei Grain & Oil Industrial Co Ltd.

การศึกษาชนิดของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิดแท่งต่อการวัดค่าทางไฟฟ้าเชิงเปรียบเทียบระหว่างแอโนดชนิดแผ่นเรียบและแผ่นขัด

Studies on rod photosynthetic microbial strains on electrical measurements comparing smooth and rough surface anodes

ณัฐพงษ์ พรมพิทักษ์*, **ชมาพร เจียรบุตร**

Nattapong Prompitak*, Chamaporn Chianrabutra

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Nattapong.promp@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงชนิดของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิดแท่งที่มีผลต่อการวัดค่าได้ของค่าทางไฟฟ้าโดยใช้จุลินทรีย์ทั้งสิ้น 5 ชนิดได้แก่ KU-EGAT 1/3, KU-EGAT 1/6, KU-EGAT 22/7 ,Rhodopseudomonas palustris และ Rhodobacter Sphaeroides โดยพบว่าที่การทดลองโดยใช้แผ่นแสตนเลตแบบเรียบนั้นจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิด KU-EGAT 22/7 นั้นสามารถให้ค่าความต่างศักย์ได้มากที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 0.9 โวลต์ และเมื่อนำไปวัดกำลังทางไฟฟ้าพบว่า KU-EGAT 1/6 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดอยู่ที่ 0.049 μW และจากการทดลองโดยใช้แผ่นแสตนเลตแบบขัดพบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิด KU-EGAT 22/7 นั้นสามารถให้ค่าความต่างศักย์ได้มากที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 1.0 โวลต์ และเมื่อนำไปวัดกำลังทางไฟฟ้าพบว่า Rhodopseudomonas palustris ให้ค่ากำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดอยู่ที่ 0.524 μW

คำสำคัญ: กำลังไฟฟ้าจากจุลินทรีย์, ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า, จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง

Abstract

This survey investigated the group requiring measurable photometric values of all available electrical values of 5 plus KU-EGAT 1/3, KU-EGAT 1/6, KU-EGAT 22/7, Rhodopseudomonas palustris and Rhodobacter. Sphaeroides, found with a flat stellate plate, is hazardous with light type KU-EGAT 22/7 was able to give the highest potential difference found about 1.0 V measure the electrical power found KU- The EGAT 1/6 gives a maximum power factor of 0.049 μW and from the sample with the polished stat plate a light source of the type KU-EGAT 22/7 can be valued. The potential difference was at most about 1.0 and was used to measure the electrical power found. Rhodopseudomonas palustris gave the highest power factor of 0.524 μW.

Keywords: KU-EGAT, Microbial fuel cell, Power of microbial fuel cell

คำนำ

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนเป็นสิ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะเนื่องด้วยพลังงานหลักอันได้แก่น้ำมันและก๊าซธรรมชาติเริ่มมีราคาสูงขึ้น โดยพลังงานทดแทนก็สามารถแบ่งออกได้เป็นพลังงานทางเลือกและพลังงานหมุนเวียน ในงานวิจัยนี้เราจะสนใจในพลังงานงานหมุนเวียนอันได้แก่พลังงานจากเชื้อเพลิงจุลชีพที่ได้จากจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง ซึ่งจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงนั้นเราสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายทั้งนำมาผลิตไฮโดรเจน ทำเกษตรกรรม และที่กำลังนิยมคือการนำมาใช้งานด้านการบำบัดน้ำเสีย จากการศึกษาในขั้นต้นพบว่านอกจากคุณสมบัติในด้านต่างๆ ที่กล่าวไปแล้วนั้นจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสามารถสร้างความต่างศักย์ทางไฟฟ้าออกมาได้อีกด้วยจึงเป็นพลังงานอีกชนิดนึงที่น่าสนใจในการศึกษาเพื่อพัฒนาและต่อยอดให้สามารถนำไปใช้ในวงกว้างได้ในอนาคต ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาถึงคุณสมบัติของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่างชนิดกันที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนกัน มีคุณสมบัติในการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ต่างกันหรือไม่โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ประกอบไปด้วย 5 ชนิดคือ KU-EGAT 1/3 ,1/6 ,22/7, Rhodopseudomonas palustris และ Rhodobacter Sphaeroides เนื่องจากสามารถเพาะเลี้ยงได้สะดวกภายในพื้นที่วิจัยเนื่องจากเป็นจุลินทรีย์ที่ค้นพบและอยู่ภายใต้สิทธิบัตรของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3 ชนิดและเป็นจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงมาตรฐานอีก 2ชนิด อีกทั้งยังมีผู้ให้คำแนะนำอย่างต่อเนื่องในการดูแลและควบคุมคุณภาพของจุลินทรีย์ โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือใช้แผ่นแอโนดเป็นแผ่นสแตนเลตสตีลผิวเรียบและผิวขัดในการศึกษาวิจัย โดยในการวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาว่าจุลินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดดังกล่าวที่มีลักษณะเป็นแท่งเหมือนกันนั้นจะสามารถให้ค่าทางไฟฟ้าได้เหมือนกันหรือแตกต่างกันหรือไม่เมื่อถูกควบคุมให้อยู่ ณ ที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน อีกทั้งยังต้องการศึกษาว่าเมื่อมีลักษณะที่แตกต่างกันของแผ่นขั้วแอโนดที่จุลินทรีย์ต้องยึดเกาะจะทำให้เกิดความแตกต่างกันหรือไม่ที่ผิวเรียบและผิวขัด ซึ่งค่าที่ต้องการศึกษาคือต่างความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่แปลผลกับชนิดของจุลินทรีย์และผิวของขั้วแอโนดกับกำลังไฟฟ้าแปลผลกับชนิดของจุลินทรีย์และผิวของขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะสามารถนำงานวิจัยนี้ไปต่อยอดหาลักษณะการขัดของพื้นผิวที่ส่งผลให้สามารถวัดได้ค่าทางไฟฟ้าได้มากขึ้นได้ในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

1.แผ่นสแตนเลตสตีลขนาด 1.5*3 CM : ใช้สำหรับเป็นแผ่นขั้วแอโนดในการทดลอง

2.ตัวหนีบแผ่นชนิดนำไฟฟ้า: เพื่อประคองแผ่นขั้วแอโนดให้ตั้งตรงและวัดค่าได้โดยสะดวก

3.เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า

4.ผ้าสกี: ใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนโดยผ้าสกีจะมีด้านที่กันน้ำและด้านที่แลกเปลี่ยนอากาศได้ทำให้ของเหลวอยู่ในขวดทดลอง

5.ผ้าตาข่ายคาร์บอน: ใช้เป็นขั้วแคโทดที่สัมผัสอากาศ

6.ขวดทดลอง ชนิด Single Chamber

7.ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

8.มัลติมิเตอร์

9.อะซีโทน

10.กาวยาง

การเตรียมการทดลอง

1.ตัดแผ่นแสตนเลตสตีลให้ได้ตามขนาด 1.5*3 CM จำนวน 10 แผ่นตาม Fig.1 แล้วนำแผ่นที่ตัดไว้จำนวน 5 แผ่น นำมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ เตรียมไว้ ตาม Fig. 2

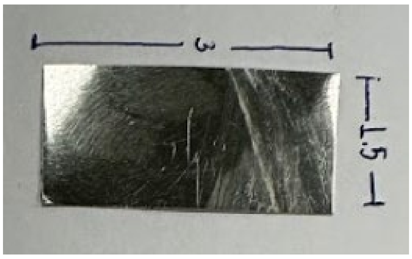


Fig.1 microbial shape

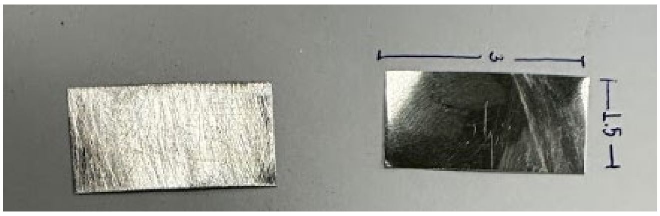


Fig.2 microbial shape

2. จากนั้นจึงนำไปล้างคราบสกปรกออกด้วยอะซีโทน แล้วนำไปอบให้แห้ง ตาม Fig. 3 เตรียม ขวดทดลอง ด้วยการนำแผ่นผ้าสกีปิดบริเวณปากช่องทางแลกเปลี่ยนอากาศบริเวณข้างขวดแล้วนำผ้าตาข่ายคาร์บอนปิดซ้อนไปอีกทีในบริเวณเดียวกันหลังจากนั้นนำไปอบฆ่าเชื้อในตู้ UV ดัง Fig. 4

Fig.3 microbial shape

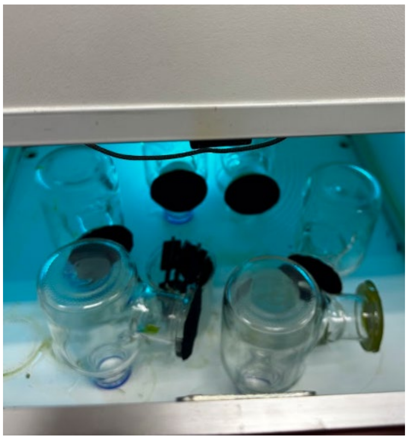


Fig.4 microbial shape

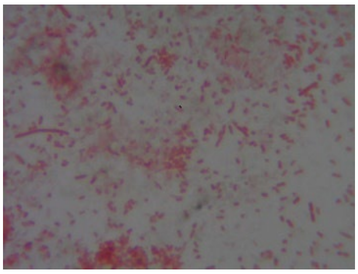
3. หลังจากนั้นจึงเติมจุลินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดลงไปหลังจากนั้นจึงนำตัวหนีบหนีบแผ่นแสตนเลตสตีลแล้วจุ่มลงไปเมื่อเสร็จแล้วจึงต่อสายเข้าเครื่องวัดค่าความต่างศักย์แล้วนำผลที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบผล

เมื่อวัดค่าความต่างศักย์เรียบร้อยแล้วหลังจากนั้นจึงนำ ขวดทดลองไปต่อเข้ากับตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้แล้วบันทึกค่าจากเครื่องมัลติมิเตอร์เพื่อนำไปคำนวนออกมาเป็นกำลังทางไฟฟ้าตาม Equation 1

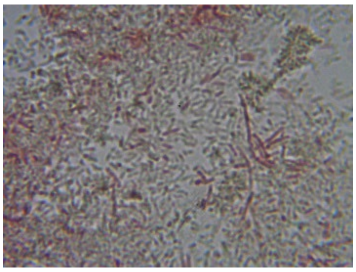
$$P= \frac{V^2}{R} \qquad (1)$$

ผลและวิจารณ์การทดลอง

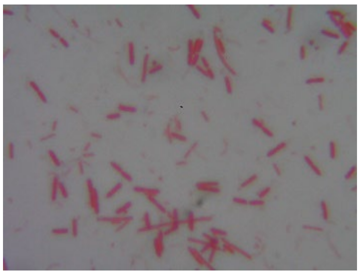
งานวิจัยนี้ต้องการหาคำตอบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่างชนิดกันแต่รูปร่างเหมือนกันดัง Fig. 5 เมื่ออยู่ในสภาวะเดียวกันซึ่งประกอบไปด้วย 1.ความเข้มข้นเดียวกันในที่นี้คือไม่มีการผสมเจือจางใดๆ 2.อยู่ภายใต้อุณภูมิเดียวกันและอยู่ภายใต้การให้แสงในช่วงเวลาเดียวกัน จะสามารถให้ค่าทางไฟฟ้าได้เท่ากันหรือไม่โดยออกแบบการทดลองให้แผ่นขั้วแอโนดมีทั้งแผ่นแบบเรียบและแผ่นแบบขัด ซึ่งจากการทดลองพบว่าจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 5 ชนิดสามรถวัดค่าความต่างศักย์ได้ใกล้เคียงกันโดยเมื่อพิจารณาจาก Graph.1 พบว่าที่แอโนดชนิดผิวขัดนั้นจะสามารถวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้สูงสุดที่ประมาณ 1.0 โวลต์ ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิด KU-EGAT 22/7 และเมื่อพิจารณาจากจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆพบว่า KU-EGAT 1/3 และ Rhodopseudomonas palustris ให้ค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาความสเถียรของการวัดค่าทางไฟฟ้าพบว่า KU-EGAT 22/7 ,1/3 และ Rhodopseudomonas palustris มีความสเถียรมากที่สุดและเมื่อพิจารณาที่แอโนดผิวเรียบเราจะพบว่าแนวโน้มของการวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับแอโนดแบบผิวขัด โดยสามารถวัดค่าได้มากที่สุดที่ประมาณ 0.9 โวลต์



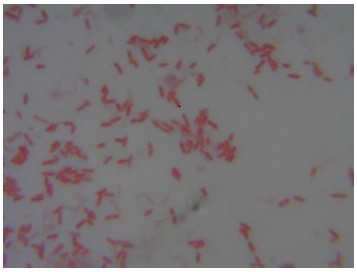
KU-EGAT 1/3



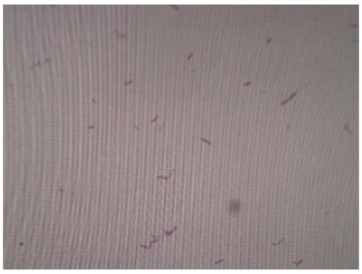
KU-EGAT 1/6



KU-EGAT 22/7



Rhodobacter Sphaeroides



Rhodopseudomonas palustris

Fig. 5 Microbial shape at 25*100X magnification

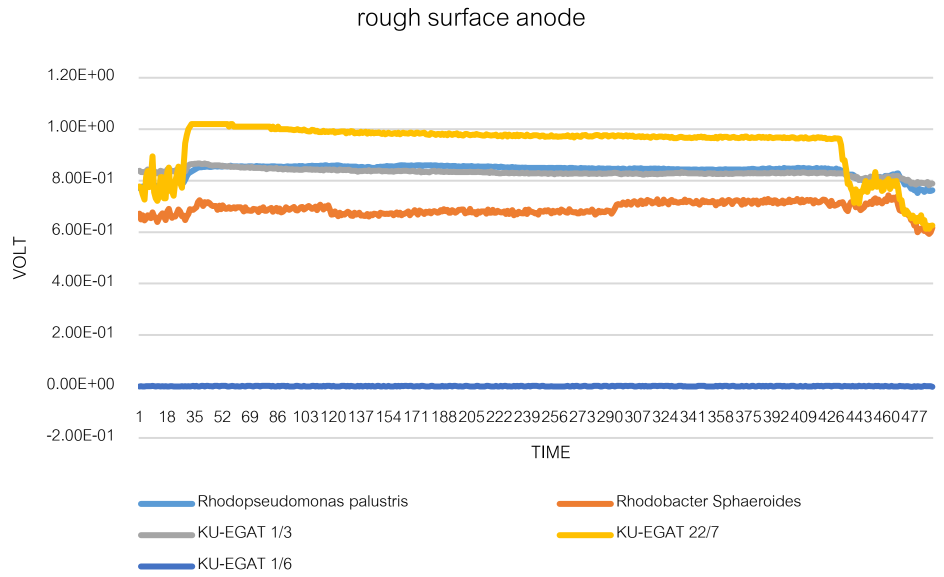


Fig. 6 Rough surface anode

ซึ่งจาก Fig. 6 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกที่เริ่มวัดค่าจุลินทรีย์จะยังคงเกิดการแกว่งไปมาของค่าที่วัดได้จนผ่านเข้าสู่สภาวะสเถียรคือช่วงที่กราฟเริ่มนิ่งซึ่งใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่ง ซึ่งเมื่อวัดค่าไปจนถึงจุดที่จุลินทรีย์เริ่มมีการขยายและตายลงก็จะเข้าสู่สภาวะปั่นป่วนอีกครั้งในช่วงท้ายของกราฟ ซึ่งตรงกับ ธนัตถ์ชัย และสรภพ (2562) ที่ได้ข้อสรุปว่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์มากขึ้นเป็นผลมาจากการที่จำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น และจะลดลงเมื่อมีการสูญเสียจุลินทรีย์บางส่วนไป

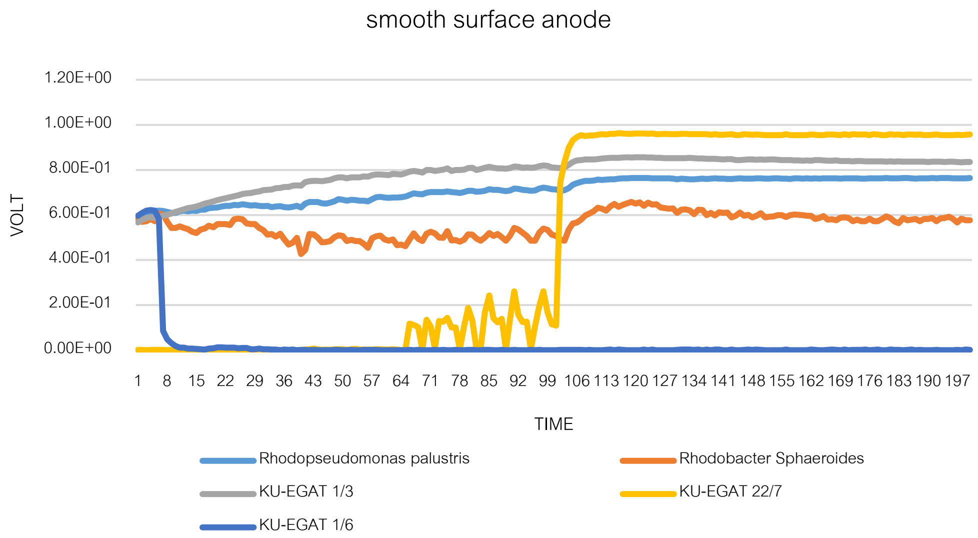


Fig. 7 Smooth surface anode

ซึ่งจาก Fig. 7 ก็ยังคงแสดงให้เห็นว่า ณ จุดเริ่มต้นของการทดลองค่าจุลินทรีย์จะยังคงเกิดการแกว่งไปมาของค่าที่วัดได้จนผ่านเข้าสู่สภาวะสเถียรโดยในการทดลองนี้จุลินทรีย์ใช้เวลานานกว่าในการเข้าสู่สภาวะเนื่องจากเป็นแผ่นชนิดเรียบอาจมีผลต่อการเกาะของจุลินทรีย์ แต่เมื่อเริ่มเข้าสภาวะเสถียรได้กลับพบว่าค่าที่ได้นั้นห่างกันเพียงเล็กน้อย

และเมื่อวัดค่ากำลังทางไฟฟ้าพบว่าที่แผ่นแอโนดชนิดผิวเรียบจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิด KU-EGAT 1/6 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.049 µW ,KU-EGAT 1/6 ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.045 µW, Rhodobacter Sphaeroides ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.021 µW, Rhodopseudomonas palustris ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.003 µW และ KU-EGAT 22/7 ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.00009 µW ตามลำดับดังแสดงค่าใน Fig. 8

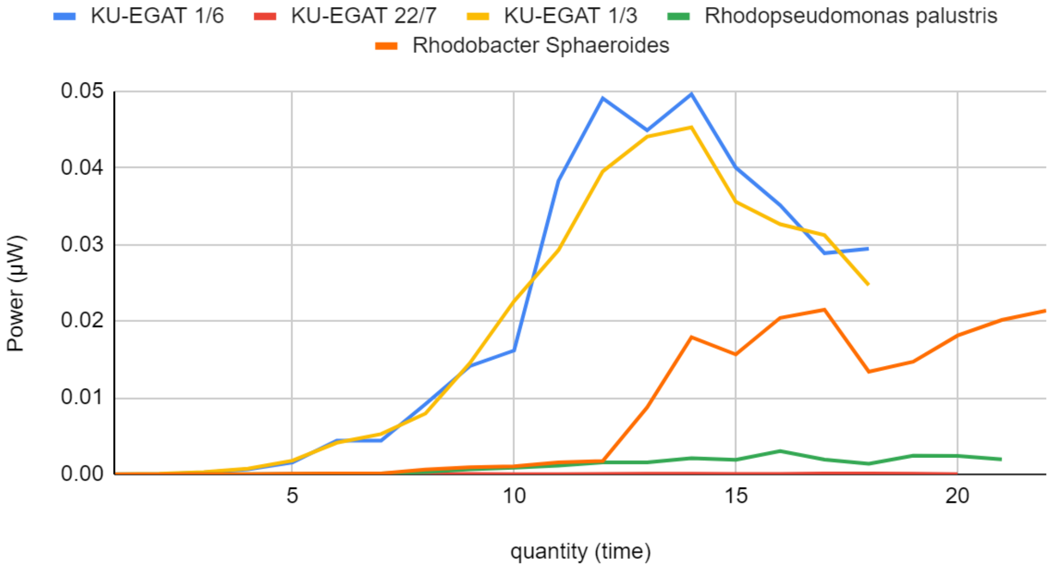


Fig. 8 Power in smooth surface anode

และเมื่อพิจารณาแผ่นแอโนดชนิดผิวขัดจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิด Rhodopseudomonas palustris ให้ค่ากำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.52 µW , Rhodobacter Sphaeroides ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.253 µW, KU-EGAT 1/6 ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.1 µW, KU-EGAT 1/3 ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.052 µW และ KU-EGAT 22/7 ให้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่มากที่สุดที่ประมาณ 0.0035 µW ตามลำดับดังแสดงค่าใน Fig. 9

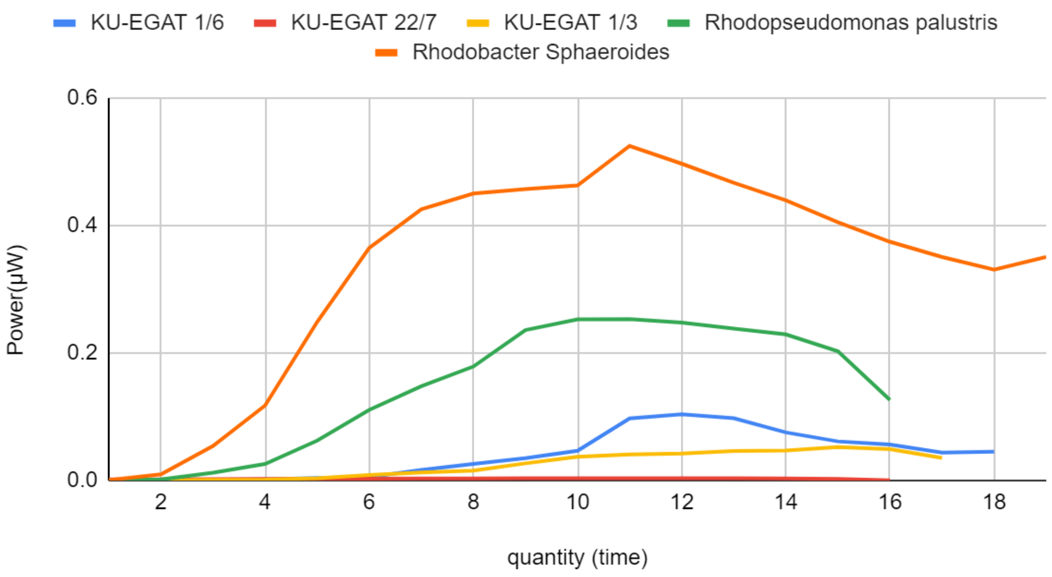


Fig. 9 Power in rough surface anode

เมื่อพิจารณาความหยาบพบว่าลักษณะของการขัดไม่มีรูปร่างที่ชัดเจนจาก Fig. 10 ซึ่งอาจจะเป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้ค่าออกมาเป็นแบบนี้ในอนาคตอาจจะมีการศึกษารูปแบบของพื้นผิวที่มีรูปร่างชัดเจนเพื่อเปรียบเปรียบการวัดค่าได้ทางไฟฟ้า

Fig. 10 Roughness texture

ดังนั้นจากการทดลองนี้พบว่าในช่วงที่ยังไม่เข้าสภาวะเสถียรนั้นมีการยังไม่นิ่งของตะกอนที่อาจจะเกิดจากตัวจุลินทรีย์ที่ตายไปหรือการปรับสมดุลของตัวจุลินทรีย์เองเมื่อมีการเปลี่ยนถ่ายภาชนะซึ่งอาจจะทำให้ค่าแกว่งได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งด้วยและแม้ค่าความต่างศักย์จะมีแนวโน้มเหมือนกันที่ KU-EGAT 22/7 > KU-EGAT 1/3 > Rhodopseudomonas palustris > Rhodobacter Sphaeroides > KU-EGAT 1/6 แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังทางไฟฟ้าพบว่ามีข้อแตกต่างกันดังอธิบายข้างต้นซึ่งในอานาคตอาจจะนำความแตกต่างนี้ไปปรับปรุงและพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันได้ และ ในอนาคตอาจจะจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปร่างลักษณะของจุลินทรีย์ชนิดที่มีรูปร่างแตกต่างกันเพื่อเทียบผลของการเกาะยึดแผ่นขั้วแอโนดที่มีผลต่อการวัดค่าได้ทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการพัฒนาให้สามารถใช้ประโยชน์ที่เกิดจากไฟฟ้าจากจุลินทรีย์ที่ผลิตได้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

สรุป

จากการทดลองพบว่าการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่มีรูปร่างเป็นแท่งแต่ต่างชนิดกันเมื่อเปรียบเทียบกันโดยใช้แผ่นแอโนดแบบเรียบและแบบขัดในการวัดค่าความต่างศักย์พบว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยแบบผิวขัดจะให้ค่าที่ดีกว่าในระยะตั้งแต่แรกเริ่มอันอาจจะเป็นผลจากการที่จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสามารถเกาะที่ผิดของแอโนดได้ง่ายกว่าการที่ใช้แอโนดเป็นแผ่นแบบผิวเรียบแต่เมื่อทิ้งไว้สักระยะหนึ่งพบว่าเมื่อค่าเข้าสู่สภาวะสเถียรจะทำให้ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสามารถแปลผลได้ว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่มีลักษณะเป็นแท่งนั้นอาจจะมีการยึดเกาะกับแผ่นแอโนดแบบขัดได้ใกล้เคียงกับแบบผิวเรียบ แต่เมื่อนำไปวัดค่ากำลังทางไฟฟ้าพบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง KU-EGAT 22/7 ที่ให้ค่าความต่างศักย์ได้เยอะที่สุดกลับวัดค่ากำลังทางไฟฟ้าได้น้อยที่สุดนั่นแสดงว่าการที่จุลินทรีย์ให้ค่าความต่างศักย์ได้มากจะไม่จำเป็นที่ต้องวัดได้ค่ากำลังทางไฟฟ้าได้มากที่สุดเช่นเดียวกัน อีกทั้งลักษณะของการขัดผิวแผ่นขั้วแอโนดก็ส่งผลต่อการวัดค่าได้เช่นเดียวกันเพราะจะส่งผลต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องการศึกษาชนิดของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงชนิดแท่งต่อการวัดค่าทางไฟฟ้า สามารถดำเนินจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุน จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมาพร เจียรบุตร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการวิจัยในอนคต

เอกสารอ้างอิง

ณัฐพงศ์ มณีอินทร์, วัชรพงษ์ พึ่งพา, เสฏฐวุฒิ เรื่องแสง. 2563. การศึกษาชนิดและขนาดวัสดุที่ใช้สำหรับขั้วแอโนดในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ธนัตถ์ชัย ขุนชนะ, สรภพ จิรวัชรา. 2562. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของจุลินทรีย์กับการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

พฤทธิ์ ช. ภูมิสุวรรณ, พศวัต ลีลาเกียรติวงศ์. 2563. การออกแบบเครื่องมือวัดค่าความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษศาสตร์. กรุงเทพฯ.

การออกแบบและวิเคราะห์ล้อแบบลูปบนชุดล้อลงจอดของอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง

Design and analysis of loop wheel for fixed Wing UAV

โชติพัชร กสิกรรม, ธภัทร นาชัยเวียง, วิศว์ ศรีพวาทกุล*

Chotiphat Kasikram, Thaphat Nachaiwiang, Vis Sripawadkul*

ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: vis.s@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการออกแบบล้อกันสั่นสะเทือนสำหรับอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (Fixed Wing UAV) โดยทำการออกแบบล้อที่มีความสามารถในการเยื้องศูนย์ (Loop Wheel) เพื่อลดภาระกรรมที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างในขณะที่ลงจอด โดยศึกษาตัวแปรในการออกแบบแหนบที่นำมาติดตั้งบนล้อ คือ ความยาวแกนเอก และ ความหนาของสปริงแหนบ แล้วจึงทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับจากการใช้ล้อแบบลูปและล้อแบบดั้งเดิมของเครื่องต้นแบบจากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มความยาวแกนเอกของแหนบจะทำให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มความหนาของแหนบจะทำให้ค่าความเค้นลดลง เมื่อวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับพลังงานขณะลงจอดของล้อ พบว่าล้อแบบลูปมีประสิทธิภาพในดูดซับพลังงานในขณะลงจอดได้ดีกว่าล้อแบบดั้งเดิม 34.21% และสามารถลดค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ถึง 99.11%

คำสำคัญ: พลังงานภายใน, ล้อแบบลูป, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research studies the design of loop wheels for Fixed Wing UAVs by designing wheels with eccentricity capability. To reduce the load on the airframe during landing of the unmanned aerial vehicle, by studying the variable in the design of the leaf spring installed on the wheels, i.e., the major axis length of leaf spring and the thickness of leaf spring. Then, by using eccentric wheels, the energy results on the airframe are compared with the conventional wheel. According to the analysis, when the major axis length of the leaf spring increases, the stress increases while increasing the thickness of the leaf spring will cause the stress to decrease. Moreover, in terms of landing efficiency, it is found that the energy absorption efficiency of eccentric wheels is 34.21% higher than the conventional wheels and the maximum stress is reduced by 99.11%.

Keywords: Finite element method, Internal energy, Loop wheel

คำนำ

อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง เป็นอากาศยานไร้คนขับที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยม เนื่องจากมีประสิทธิภาพทางการบินที่ดี และสามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานาน และกำลังมีการพัฒนาประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไปอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงที่มีฐานล้อ จะใช้รูปแบบฐานล้อชนิด Tricycle เพราะมีเสถียรภาพที่ดีทั้งในขณะที่บินและการเคลื่อนที่บนพื้น โดยในปัจจุบันการใช้งานอากาศยานไร้คนขับต้องการความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นจากการลงจอดที่น้องลง เนื่องจากเป็นสถานการณีที่มีการกระแทกของเครื่องและพื้น เนื่องจากฐานล้อแบบ Tricycle มีเพียงส่วนของ Strut ที่ทำหน้าที่รับแรงที่เกิดขึ้น ทางผู้จัดทำโครงงานวิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญและแนวคิดในการพัฒนาส่วนของล้อให้มีความสามารถในการรับแรงที่เกิดขณะลงจอดได้ โดยใช้หลักการของสปริงทำให้ล้อมีความสามารถในการเยื้องจุดศูนย์กลางของแกนล้อ หรือล้อแบบลูป ทำให้ล้อมีความสามารถในการลดภาระกรรมที่ส่งไปถึงโครงสร้างอากาศยานได้มากขึ้นลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายกับโครงสร้างและระบบการควบคุมอากาศยานไร้คนขับ รวมถึงเป็นการยืดอายุการใช้งานของตัวอากาศยานไร้คนขับอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบและวิเคราะห์ในโครงงานนี้ จัดทำในรูปแบบการทำแบบจำลองโดยการวิเคราะห์โมเดลสามมิติด้วยวีธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการสร้างโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรม CATIA V5 และทำการทำแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกการวิเคราะห์ในโหมด Static Structural เพื่อคัดเลือกล้อแบบลูปที่มีค่าตัวแปรทางโครงสร้างผ่านเกณฑ์ของ FAR 23 และมีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยมีตัวแปรต้นคือความยาวแกนเอกและความหนาของสปริงแหนบในวงล้อ และในส่วนที่สองการวิเคราะห์ในโหมด Explicit Dynamic เพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนฐานล้อและพลังงานภายในที่เกิดขึ้นบนชุดล้อขณะลงจอด ระหว่างฐานล้อที่ติดตั้งกับล้อแบบดั้งเดิมและล้อแบบลูป

วัสดุ

สำหรับการตั้งค่าเงื่อนไขของการวิเคราะห์โมเดลล้อแบบลูป จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ดุมล้อ ขอบล้อ สปริงแบบแหนบ และฐานล้อ สำหรับวัสดุในส่วนของ ขอบล้อ ดุมล้อ และฐานล้อ เนื่องจากต้นแบบของอากาศยานไร้คนขับ INTA SIVA แสดงดัง Fig. 1 และล้อต้นแบบที่เลือกนำมาสร้างโมเดลล้อ ไม่มีการระบุรายละเอียดของการใช้วัสดุที่ใช้ผลิตอย่างชัดเจน และรูปร่างของล้อต้นแบบก็ไม่มีการแบ่งเป็นชิ้นส่วนที่แยกกัน จึงต้องทำการค้นคว้าข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในการผลิตล้อของอากาศยานประเภท General Aviation ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของข้อกำหนด FAR23 เช่นเดียวกันมาเป็นตัวอ้างอิง ซึ่งวัสดุที่ได้มาจากการค้นหาข้อมูล คือ Aluminum Alloy (AeroToolbox, 2022) และ สำหรับการเลือกวัสดุที่ใช้กับชิ้นส่วนสปริงแหนบ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีการยุบและยืดตัวเนื่องจากภาระกรรมของเครื่องขณะทำการลงจอด ทำการเลือกวัสดุ Aluminum 7075 -T6 เนื่องจากมีค่า Yield Strength สูงกว่าวัสดุใน Serie อื่น ๆ ของวัสดุ Aluminum และส่วนที่ไม่ได้ใช้สำหรับการวิเคราะห์แต่มีไว้สำหรับการตั้งค่าควบคุมสำหรับการวิเคราะห์คือ ยางล้อ ใช้วัสดุ Rubber และ พื้นสัมผัส ใช้วัสดุ Concrete แสดงดัง Table 1.

Fig. 1 Unmanned aerial vehicle INTA SIVA

Table 1 Material properties

Material	Components	Density (Kg/m^3)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Tensile Strength (MPa)
Aluminum Alloy	Wheel Rim, Axle, Wheel Hub, Strut	2800	71000	0.33	280
Aluminum 7075-T6	Leaf Spring	2770	72000	0.33	503
Rubber	Tire	1043	11.9	0.49	-
Concrete	Floor	2300	3000	0.18	-

การหาขนาดของล้อหลัก

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถคำนวณโดย Equation 1 (Jha, 2009) ดังต่อไปนี้

$$D_{Tire}=A(W_m)^B \tag{1}$$

โดย Wm คือ น้ำหนักของอากาศยาน และสัมประสิทธิ์ A = 1.51 , B = 0.349 สำหรับ UAV

ขนาดของความกว้างหน้าล้อใช้การคำนวณใน Equation 2 โดยสำหรับ UAV ทั่วไปมีค่า A = 0.715 , B = 0.312

$$W_{Tire}=A(W_m)^B \tag{2}$$

จากข้อมูลจำเพาะของเครื่อง UAV INTA SIVA มี MTOW เท่ากับ 300 kg หรือ 661.387 lbs โดยกำหนดให้ชุดล้อหลักรับน้ำหนัก 85% เท่ากับ 281.089 lbs ต่อล้อ 1 ข้าง ทำการคำนวณผ่าน Equation 1 และ 2 ตามลำดับ และบวกเพิ่มขนาดอีก 30% เพื่อให้ขนาดล้อลองรับพื้นที่ขรุขระ หลังจากนั้นทำการเทียบขนาดของล้อในตลาดของ Goodyear Aircraft Tire Data และเลือกขนาดที่ใกล้เคียงกับการคำนวณมากที่สุดมาใช้ ดังนั้นขนาดของล้อมีค่าเท่ากับ 14.5 × 5.5 – 6 inch

การยืนยันผลการทดลอง

ทำการ Validation ในโหมด Explicit Dynamic จากงานที่ศึกษานี้ ทำเพื่อเป็นการยืนยันผลการคำนวณของโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากงานวิจัยที่ศึกษาว่ามีการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งศึกษาจากงานวิจัยที่เป็นการคำนวณค่า Contact Force ที่เกิดขึ้นจากสูตรของแรงที่เกิดจากการตกระทบของลูกบอลยาง เพื่อเปรียบเทียบผลด้วยการทดสอบปล่อยลูกบอลยางจากที่สูงในสถานการณ์จริง

โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ของ Contact Force สำหรับลูกบอลยางในงานวิจัยที่ศึกษา คือ ผลรวมของแรงที่เกิดจากการพื้นผิวของลูกบอลยาง (F_B) และแรงที่เกิดจากแก๊สในลูกบอลยาง (F_G) ซึ่งมีสมการเป็นไปตาม Equation 4 และ 5 ตามลำดับ

$$F_B = \frac{4Eh^2}{\sqrt{3(1-v^2)}R}\delta(t) \qquad (4)$$

และ

$$F_G = \rho_a \pi R\left(1+\frac{\rho_g}{\rho_a}\right)\left(\left(1-\left(3-\frac{\delta(t)}{R}\right)\left(\frac{2\delta(t)}{R}\right)^2\right)^{\gamma}-1\right)\left(2-\frac{\delta(t)}{R}\right)\delta(t) \qquad (5)$$

ซึ่งเมื่อนำ Equation 4 และ 5 มาทำการคำนวณ จะสามารถทำให้คำนวณค่า Contact Force ที่เกิดขึ้นได้เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้จากการตกกระทบของลูกบอลจากเซนเซอร์และการทำแบบจำลองในโหมด Explicit Dynamic แสดงดัง Fig. 5

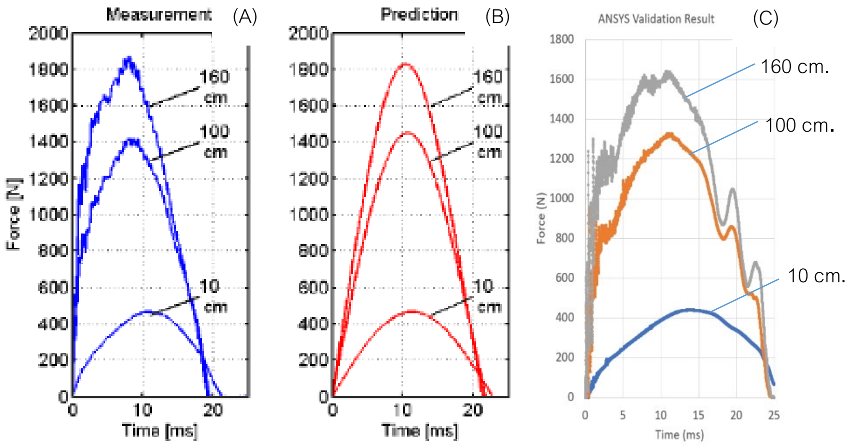


Fig. 2 Contact force archives by (A) sensor measurement; (B) prediction from equation; (C) ANSYS analysis for validation

จากค่าความคลาดเคลื่อนของการทำ Validation ตามงานวิจัยที่ทำการทดสอบกับอุปกรณ์จริง มีค่าเท่ากับ 9.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น เกิดจากการที่ไม่ได้ใส่เงื่อนไขขอบเขตของแก๊สในลูกบอลยาง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณของโปรแกรม ANSYS ในโหมด Explicit Dynamic มีค่าความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทำแบบจำลองในส่วนแรกมีตัวแปรต้นคือ ความยาวแกนเอกที่เปลี่ยนแปลงไป 5 ความยาว คือ 70.61, 77.72, 84.84, 91.69, 98.81 ดังแสดงใน Fig. 3 และความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป 5 ความหนา คือ 2, 2.5, 3, 3.5 ,4 mm ของแหนบสปริงที่อยู่ในวงล้อ เพื่อคัดเลือกล้อแบบลูปที่มีค่า FOS เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบอากาศยานที่คำนึงถึงน้ำหนักของโครงสร้างตาม FAR Part 23 ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 1.5 (FAA, 2022) เมื่อพิจารณารับภาระกรรมแบบพลวัตและมีค่าการเสียรูปตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5% ของความยาวแกนโทของแหนบสปริง แล้วจึงพิจารณาเลือกล้อที่มีน้ำหนักเบาที่สุด โดยในวงล้อกำหนดให้มีจำนวนของแหนบสปริงอยู่ที่ 3 ชิ้นซึ่งสอดคล้องกับกับงานวิจัยของ Shinde (2017) และจากการดูแนวโน้มของค่าตัวแปรที่ได้จึงสามารถลดจำนวนการทำแบบจำลองลงได้ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ANSYS ดังแสดงใน Table 2 และ Fig. 4

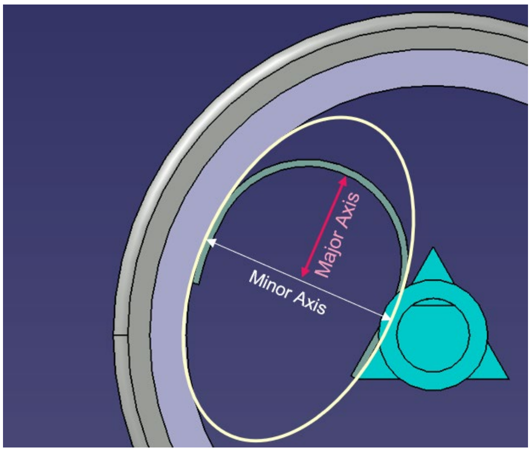


Fig. 3 Major axis length of leaf spring in loop wheel

Table 2 Static Structural Result by Experiment Case

No.	Major Axis Length (mm.)	Thickness (mm.)	Maximum Total Deformation (mm.)		Maximum Equivalent Stress (MPa)		Factor of Safety		Weight (Kg.)	Total Elapsed Run Time (sec)
			Static Load	Dynamic Load	Static Load	Dynamic Load	Static Load	Dynamic Load		
1	70.61	2	1.34	4.02	136.62	409.86	3.68	1.227	3.77	5376
		2.5	0.85	2.55	87.14	261.41	5.77	1.92	3.86	5445
2	77.72	2	1.54	4.62	140.68	422.04	3.58	1.19	3.80	5421
		2.5	0.96	2.87	94.59	283.79	5.32	1.77	3.89	5470
3	84.84	2	1.52	4.54	144.61	433.83	3.48	1.16	3.8	5311
		2.5	1.11	3.33	99.23	297.69	5.07	1.69	3.92	5474
4	91.69	2	2.02	6.05	154.92	464.76	3.25	1.08	3.83	5412
		2.5	1.23	3.68	100.64	301.92	5.00	1.66	3.92	5456
5	98.81	2	2.17	6.52	158.74	476.22	3.17	1.06	3.83	5401
		2.5	1.33	4.00	101.86	305.58	4.94	1.65	3.95	5497

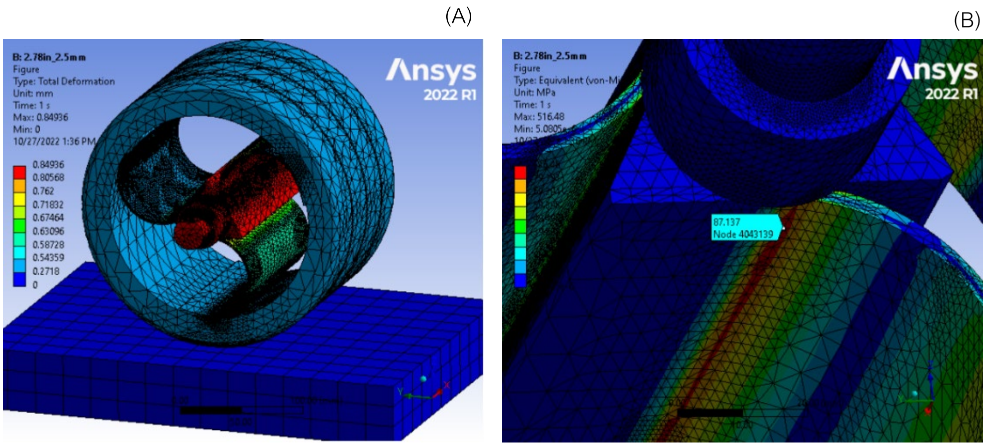


Fig. 4 (A) Total deformation of loop wheel for Leaf spring major axis 70.61 mm. and Thickness 2.5 mm; (B) Maximum Equivalent Stress of loop wheel for Leaf spring major axis 70.61 mm. and Thickness 2.5 mm

ในส่วนที่สองทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนฐานล้อและพลังงานภายในที่เกิดขึ้นบนชุดล้อขณะลงจอด ระหว่างฐานล้อที่ติดตั้งกับล้อแบบดั้งเดิมและล้อแบบลูปซึ่งได้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ANSYS แสดงดัง Fig. 5 และ Fig. 6

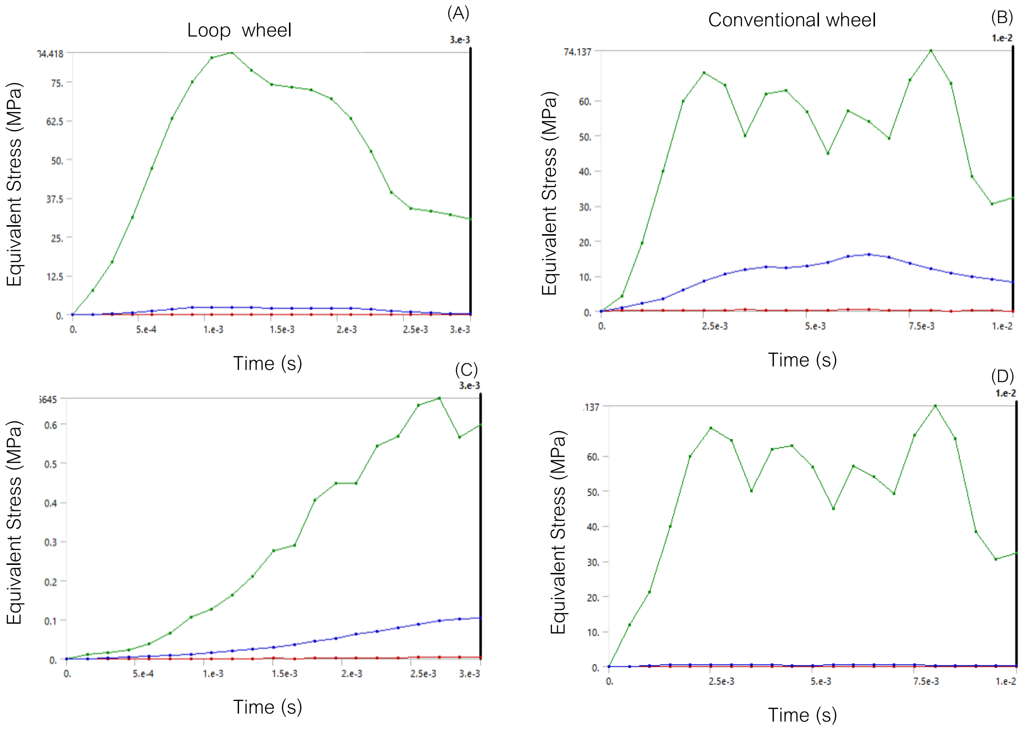


Fig. 5 Stress relates with time on (A) loop wheel with strut; (B) conventional wheel with strut; (C) strut using loop wheel; (D) strut using conventional wheel

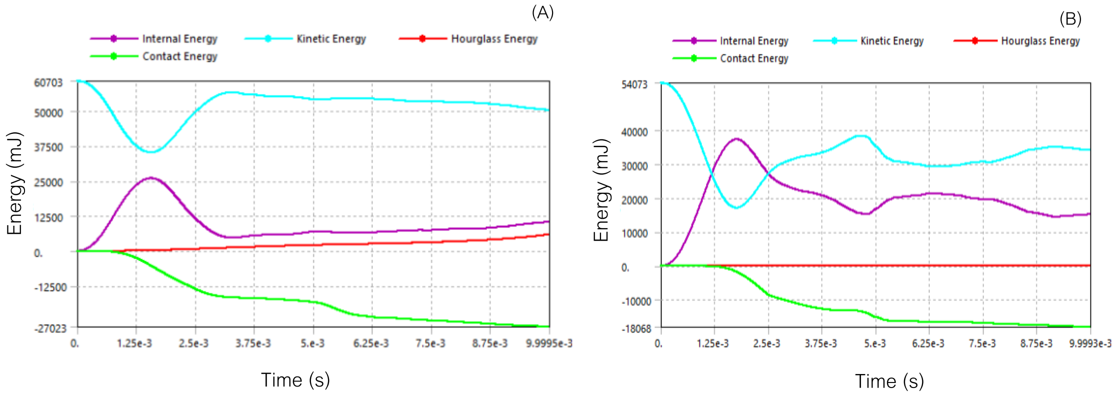


Fig. 6 Energy relates with time on (A) loop wheel with strut; (B) conventional wheel with strut

สรุป

โดยจากการศึกษาภาระกรรมที่เกิดขึ้นบนล้อและทำการวิเคราะห์ในโหมด Static Structural ผ่านโปรแกรม ANSYS เพื่อคัดเลือกล้อแบบลูปที่ดีที่สุด สามารถสรุปว่า ล้อที่มีการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดคือล้อที่ติดตั้งสปริงแหนบที่มีขนาดความยาวแกนเอกเท่ากับ 70.61 มิลลิเมตร และมีความหนา 2.5 มิลลิเมตร โดยมีค่า Maximum Equivalent Stress เท่ากับ 87.137 MPa ค่า Maximum Total Deformation เท่ากับ 0.85 มิลลิเมตร และค่า Factor of Safety เท่ากับ 1.92 ซึ่งผ่านเกณฑ์ในการพิจารณาและมีน้ำหนักที่เบาที่สุด และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในโหมด Explicit Dynamic พบว่าล้อแบบลูป สามารถทำให้พลังงานที่เกิดจากการปะทะของล้อกับพื้นในขณะการลงจอดลดลงจากล้อต้นแบบ 34.21 เปอร์เซ็นต์ โดยมีน้ำหนัก 3.86 กิโลกรัม ในขณะที่ล้อต้นแบบเดิมมีน้ำหนัก 3.275 กิโลกรัม ซึ่งมีน้ำหนักที่ต่างกัน 15.16 เปอร์เซ็นต์ ด้วยน้ำหนักที่มากกว่าแต่มีการดูดซับพลังงานในขณะทำการลงจอดที่ดีกว่าของล้อแบบลูป ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ล้อที่แบบลูปดีกว่าในด้านของประสิทธิภาพในการลงจอดและทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของเครื่องน้อยลง

เอกสารอ้างอิง

AeroToolbox. 2022. An introduction to aircraft wheels and tires. https://aerotoolbox.com/wheels-tires/#removable-flange-wheels, 27 November 2022.

Curry, N.S. 1988. Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices. American Institute of Aeronautic, Inc. Washington, DC, USA.

Federal Aviation Administration. 2009. Part 21-Certification procedures for producTS and articles. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-21, 21 November 2022.

Federal Aviation Administration. 2022. Part 23 - Airworthiness standards: Normal category airplanes. https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-23, 16 August 2022.

Jha, A., 2009. Landing Gear Layout Design for Unmanned Aerial Vehicle. In: 14th National Conference on Machines and Mechanisms. Durgapur, India.

Rizzi, F., 2018. Landing gear design for blended wing body flight test demonstrators. M.A thesis. Instituto Superior Tecnico, University of Lisbon, Portugal.

Sadraey, M.H. 2012. Aircraft Design: A Systems Engineering Approach. Willey and Sons. doi: 10.1002/9781118352700

Shinde, M.C., Hanumant, S., Vishwakarma, P., Rangwani, K., Shinde, S. 2017. Design of loop wheel suspension system. International Journal of Innovations in Engineering and Science 2: 34–40.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

อิทธิพลอุณหภูมิขาเข้าในของการทำแห้งแบบพ่นฝอย การทำแห้งแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งอบลมร้อนต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลต

Effects of inlet spray-drying temperatures, freeze-drying and oven-drying techniques on physicochemical and functional properties of mung bean protein isolate

สหรัฐ แสนแก้ว, ภคมน จิตประเสริฐ*

Saharat Sankeaw, Pakamon Chitprasert*

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagipmc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการทำแห้งโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลตที่สกัดได้จากวัตถุดิบเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตถั่วทอง โดยแปรผันวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้า 140 160 และ 180 °C (SD140, SD160, and SD180) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) และการทำแห้งแบบอบลมร้อน (OD) จากการศึกษาพบว่า FD ให้ผลผลิตสูงสุด 93.45% ($p < 0.05$) และการทำแห้งทุกวิธีให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณโปรตีนมากกว่า 80% จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มโปรตีนไอโซเลต โดยมีปริมาณและชนิดกรดอะมิโนที่ไม่แตกต่างกัน และพบกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายอย่างครบถ้วน รวมถึงแอสพาร์ติก และกรดกลูตามิก โดยเป็นกรดอะมิโนที่โดดเด่นและพบได้ในพืชตระกูลถั่ว ผงโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลต (MBPI) สามารถละลายได้ดีในสภาวะกรดและด่าง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิขาเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอยเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการละลายลดลงที่ pH 2 และ 10 FD ให้โปรตีนที่มีค่าการอุ้มน้ำและน้ำมันสูงสุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการทำแห้งแต่ละเทคนิคส่งผลให้สมบัติทางเคมีกายภาพของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลตแตกต่างกัน ซึ่งสามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ในการพัฒนาอาหารที่หลากหลาย

คำสำคัญ: เทคนิคการทำแห้ง, โปรตีนถั่วเขียวไอโซเลต, สมบัติเชิงหน้าที่, สมบัติทางเคมีกายภาพ

Abstract

This research studied different drying techniques, spray drying at inlet temperatures of 140, 160, and 180 °C (SD140, SD160, and SD180), freeze-drying (FD), and oven drying (OD) for mung bean protein isolate (MBPI) extracted from by-products of the golden bean production. It was found that FD provided the highest yield of 93.45% ($p < 0.05$). All drying techniques gave the products with the protein contents higher than 80%, thus being classified as protein isolates. All products contained all essential amino acids, including aspartic and glutamic, the dominant amino acids in legumes. MBPIs were soluble in acidic and basic solutions. However, the increase in the inlet temperature of spray drying decreased the solubility of the proteins at pH 2 and 10 solution, respectively. FD provided MBPIs with the highest water and oil absorption capacity. It can be concluded that the drying techniques caused the difference in the physicochemical properties of the proteins. therefore, the variation of product properties can be served for different purposes in future food development.

Keywords: drying techniques, functional property, Mung bean protein isolate, physicochemical properties

คำนำ

โปรตีนเป็นสารอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของร่างกาย และมีส่วนช่วยในการทำงานของระบบต่าง ๆ ได้แก่ การซ่อมแซมเนื้อเยื่อ และการสังเคราะห์เอนไซม์ เป็นต้น โปรตีนพืช (plant-based proteins) เป็นโปรตีนทางเลือกชนิดหนึ่งที่มีแคลอรีต่ำ ปราศจากคอเลสเตอรอล และมีปริมาณเส้นใยอาหารสูง ช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งและโรคหัวใจ พืชตระกูลถั่ว ได้แก่ ถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วลูกไก่ และถั่วเขียว อุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์และมีโปรตีนมากกว่าข้าว มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ถั่วเขียวสามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลายชนิดในระดับอุตสาหกรรม เช่น ถั่วทอง หรือถั่วซีก สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการประกอบอาหาร อุตสาหกรรมดังกล่าวมีขั้นตอนการผลิตด้วยการกะเทาะเพื่อแยกเปลือกและเนื้อถั่วเขียวออกจากกัน ทำให้มีเนื้อถั่วเขียวเหลือใช้จำนวนมากถึง 53.44% ซึ่งนิยมใช้เป็นอาหารสัตว์ จึงทำให้วัตถุดิบมีมูลค่าต่ำ การทำแห้งโปรตีนเป็นขั้นตอนที่สำคัญหลังจากการสกัดโปรตีน เพราะทำให้โปรตีนมีความคงตัวและชะลอปฏิกิริยาทางชีวเคมี ทำให้มีอายุการเก็บรักษายาวนานโดยปราศจากสารกันเสีย การทำแห้งโปรตีนส่งผลให้โปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะกายภาพ ได้แก่ สี ขนาด และมวล การทำแห้งโปรตีนทำให้การขนส่งผลิตภัณฑ์เป็นไปได้ง่าย รวมถึงอำนวยความสะดวกต่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ วิธีการทำแห้งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray- drying) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze-drying) และการทำแห้งแบบอบลมร้อน (oven-drying) การทำแห้งแบบพ่นฝอยอาศัยหลักการพ่นฝอยของตัวอย่างให้เป็นละอองฝอย และสัมผัสกับกระแสลมที่มีอุณหภูมิสูงที่ 130–200 °C ซึ่งเป็นวิธีการขจัดน้ำออกไปอย่างรวดเร็ว ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอาศัยเทคนิคอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิของตัวอย่างต่ำกว่าอุณหภูมิโดยรอบ จึงเหมาะสำหรับการทำแห้งโปรตีนที่ไม่สามารถทนร้อน ส่วนการทำแห้งแบบอบลมร้อนเป็นการทำแห้งที่อาศัยหลักการเคลื่อนที่ของลมร้อนขนานหรือตั้งฉากกับผิวหน้าวัตถุดิบ โดยลมร้อนมีการไหลเวียนเข้าสู่ผิวหน้าวัตถุดิบและกำจัดความชื้น ซึ่งมีขั้นตอนไม่ยุ่งยากและราคาถูก จากรูปแบบของวิธีของการทำแห้งที่มีความแตกต่างกัน สามารถส่งผลต่อลักษณะสมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน โดยสมบัติดังกล่าวเป็นดัชนีเบื้องต้นสำหรับเป็นข้อมูลในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอย และวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน ที่สามารถส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลตที่สกัดจากผงถั่วเขียวเหลือใช้จากอุตสาหกรรมผลิตถั่วทอง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

Bovine serum albumin (Sigma-Aldrich Chemicals company, USA), Folin-ciocalteu reagent และ Lowry reagent (Loba Chemie Pvt. Ltd., INDIA), Sodium hydroxide และ Sulfuric acid (Kemaus chemical, Australia) และผงถั่วเขียวจากอุตสาหกรรมผลิตถั่วทอง (Samut sakhon, Thailand)

การทำแห้ง

เตรียมสารแขวนลอย MBPI ในน้ำกลั่น 6% โดยน้ำหนักจากตะกอน MBPI ที่สกัดโดยการใช้ด่าง จากนั้นทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Mini Spray Dryer B-290, BUCHI Labortechnik AG, Flawil, Switzerland) ที่แปรผันอุณหภูมิขาเข้า 140, 160 และ 180 °C อัตราการฉีดที่ 7 มิลลิลิตรต่อนาที วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเตรียมสาร

แขวนลอยโปรตีนลงภาชนะถาดอลูมิเนียมขนาด 9.14 × 18.28 เซนติเมตร ความหนาตัวอย่าง 0.48 เซนติเมตร จากนั้นย้ายเข้าสู่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ -60 °C เป็นเวลา 48 h (Evermed-LCSDF 390 W, Italy) และย้ายเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C ความดันบรรยากาศ -1 atm (Christ-Gamma 2-16 LSCplus, Germany) เป็นเวลา 30 h การทำแห้งแบบอบลมร้อนเตรียมสารแขวนลอยโปรตีนลงภาชนะถาดอลูมิเนียมขนาด 9.14 × 18.28 เซนติเมตร ความหนาตัวอย่าง 0.48 เซนติเมตร จากนั้นย้ายเข้าสู่เครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 °C และมีลมพัดไหลเวียนเป็นเวลา 24 h (Universal oven UF110plus, Memert, Germany) จากนั้นลดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องบดอาหาร

ปริมาณโปรตีน

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Kjeldahl โดยอาศัยเครื่องย่อยและกลั่นอัตโนมัติ และไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนได้สารละลายสีชมพู บันทึกปริมาตรกรด และคำนวณหาปริมาณโปรตีน Equation 1 และ 2

$$\text{Nitrogen (\%)} = \frac{14 \times [\text{0.1 M HCl titrated to sample (mL)} - \text{0.1 M HCl titrated to reference (mL)}] \times \text{Conc. HCl (mol/L)} \times 100}{\text{Weight of dry sample (g)}} \quad (1)$$

$$\text{Protein content (\%)} = \text{Nitrogen (\%)} \times 6.25 \quad (2)$$

ปริมาณและชนิดกรดอะมิโน

วิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโนด้วยเครื่องวิเคราะห์กรดอะมิโน (Laborservice Onken, Gründau, Germany) ใช้คอลัมน์ Zorbax Eclipse-AAA ที่มีความกว้างและยาว 150 × 4.6 มิลลิเมตร และขนาดอนุภาคคอลัมน์ 5 ไมโครเมตร ค่าการดูดกลืนแสง 338 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิ 40 °C และวัฏภาคเคลื่อนที่ A คือ 40 มิลลิโมลาร์ NaH_2PO_4 pH 7.8 และวัฏภาคเคลื่อนที่ B คือ acetonitrile, methanol และ DI water ที่อัตราส่วน 45 : 45 : 10 ปริมาตรต่อปริมาตร และอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

ความสามารถในการละลายของโปรตีน

เตรียมสารละลายโปรตีนแต่ละชนิดที่ pH 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 ด้วยเครื่องกวนผสมที่ความเร็วรอบ 600 เป็นเวลา 30 นาที ปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 10000×g เป็นเวลา 15 นาที วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Lowry's และวัดค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร (G10S UV-vis spectrophotometer, Thermo Fisher scientific, USA) โดยใช้ bovine serum albumin เป็นสารละลายมาตรฐาน

ค่าการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมัน

ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมันสามารถทำตามวิธีการของ ชั่งหลอดปั่นเหวี่ยงความเร็วสูงขนาด 15 มิลลิลิตร และเติมผงโปรตีนปริมาณ 0.10 กรัม จากนั้นเติมน้ำหรือน้ำมันถั่วเหลืองปริมาตร 2.50 มิลลิลิตร คนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสารอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 10000xg เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดทิ้งสารละลายส่วนบน (supernatant)

และตั้งทิ้งไว้อีก 10 นาที จากนั้นดูดสารละลายส่วนเกินด้วยเครื่องดูดจ่ายสารอัตโนมัติ ตามด้วยชั่งน้ำหนักที่แน่นอน คำนวณค่าการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันตาม Equation 3

$$\text{Water and oil absorption capacity} = \frac{\text{Weight of tube and protein sediment after centrifugation (g)} - [\text{centrifuge tube weight (g)} + \text{protein powder weight (g)}]}{\text{Protein powder weight}} \quad (3)$$

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาและงานวิจัยในครั้งนี้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ แสดงผลการทดลองในรูปของค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป IBM SPSS statistic 19 (SPSS: An IBM Company, USA)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลผลิตของ MBPI หลังจากทำแห้งแต่ละชนิดแสดงดัง Table 1 พบว่าวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีร้อยละผลผลิตต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบวิธีการทำแห้งอื่น ๆ เนื่องจากการทำแห้งแบบพ่นฝอยใช้อุณหภูมิขาเข้าในช่วง 140 ถึง 180 °C และมีอุณหภูมิขาออกในช่วง 75.89 ถึง 97.28 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ส่งผลให้โปรตีนเปลี่ยนจากสถานะแก้ว (glass state) เป็นสถานะยาง (rubbery state) นั่นคือ โปรตีนมีลักษณะเหนียวและติดภายในห้องทำแห้งของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าให้ร้อยละผลผลิตมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าที่สูงขึ้น มีผลต่อปริมาณความชื้นที่น้อยลง และลดความเหนียวของอนุภาคในระหว่างทำแห้ง พร้อมกับเกิดการสร้างฟิล์มรอบอนุภาค ซึ่งช่วยลดการเกาะติดในผนังห้องทำแห้ง วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งให้ร้อยละผลผลิตมากกว่าทุกวิธีการทำแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการทำแห้งดังกล่าวอาศัยการแช่เยือกแข็งและการระเหิดตัวทำละลาย จึงไม่สูญเสียโปรตีนในการทำแห้ง และสามารถเก็บผลผลิตได้ง่าย ส่วนการทำแห้งแบบอบลมร้อน มีผลผลิตมากกว่าทำแห้งแบบพ่นฝอย แต่น้อยกว่าการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากหลังทำแห้งด้วยวิธีการนี้มีการบดผงโปรตีนด้วยเครื่องบดอาหารจึงทำให้สูญเสียผงโปรตีนปริมาณเล็กน้อย

ปริมาณความชื้นของผงโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลตหลังจากทำแห้งแต่ละชนิดแสดงดัง Table 1 พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าที่เพิ่มขึ้น ให้ปริมาณความชื้นลดน้อยลงจาก 4.12% เหลือ 3.05% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งให้ความชื้นอยู่ที่ 2.40% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าทุกวิธีการทำแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เป็นผลมาจากใช้ระยะเวลานานมากกว่าวิธีการอื่น ๆ ถึง 30 h ส่วนการทำแห้งแบบอบลมร้อนให้ความชื้นอยู่ที่ 3.87% ซึ่งมากกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้า 160 และ 180 °C อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นของผงโปรตีนที่ได้น้อยกว่า 5% ซึ่งส่งผลดีต่อผลิตภัณฑ์ประเภทผง สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของอาหารเน่าเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาได้ยาวนาน

Table 1 Yield, moisture, protein content, water absorption capacity (WAC), and oil absorption capacity (OAC) of mung bean protein isolates obtained from different drying techniques

Drying techniques		Yield (%)	Moisture (%)	Protein (%)	WAC (g/g)	OAC (g/g)
		gram of dry basis				
Spray-drying	140 °C	45.84±0.76^{a}	4.12±0.37^{c}	87.52±1.93^{b}	1.32±0.09^{a}	0.99±0.09^{a}
	160 °C	54.18±1.67^{b}	3.04±0.10^{b}	87.99±2.74^{b}	1.27±0.04^{a}	0.89±0.04^{a}
	180 °C	53.84±1.93^{b}	3.05±0.12^{b}	88.00±1.61^{b}	1.28±0.01^{a}	0.94±0.11^{a}
Freeze-drying	-40 °C	93.45±0.20^{c}	2.40±0.23^{a}	97.68±1.06^{c}	1.65±0.35^{b}	2.43±0.07^{c}
Oven-drying	45 °C	91.16±0.28^{d}	3.87±0.38^{c}	82.27±1.87^{a}	1.21±0.17^{a}	1.15±0.10^{b}

*Means ± SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

ปริมาณโปรตีนจากการทำแห้งด้วยวิธีการที่แตกต่างกันแสดงดัง Table 1 พบว่า MBPI ที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้า 140, 160 และ 180 °C มีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่มากกว่าการทำแห้งแบบอบลมร้อน ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณโปรตีนมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนหรือทำให้โปรตีนเสียสภาพ ในทางกลับกันการทำแห้งแบบพ่นฝอยและอบลมร้อน อาศัยความร้อนในการระเหยตัวทำละลาย ทำให้โมเลกุลของน้ำส่งผลต่อโครงสร้างของโปรตีนภายในโมเลกุล และก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีลักษณะต่างจากไนโตรเจน จึงทำให้ปริมาณโปรตีนลดน้อยลงจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl ซึ่งสอดคล้องกับ กล่าวถึงอิทธิพลของความร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยา Maillard ระหว่างคาร์โบไฮเดรตกับกรดอะมิโน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนที่ซับซ้อน และมีปริมาณโปรตีนลดน้อยลง อีกทั้งความร้อนก่อให้เกิดสารเชิงซ้อนของแทนนินกับโปรตีน (tannin-protein complex) จึงมีปริมาณโปรตีนลดน้อยลงเช่นกัน อย่างไรก็ตามปริมาณโปรตีนของ MBPI ที่ผ่านการทำแห้งทุกชนิดมีมากกว่า 80% จึงจัดว่าเป็นโปรตีนไอโซเลตตามข้อกำหนด

ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนของ MBPI เมื่อผ่านการทำแห้งโดยใช้วิธีที่ต่างกันแสดงดัง Fig. 1 ล้วนยังพบกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายได้อย่างครบถ้วน อีกทั้งยังมีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นมากกว่าโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต และโปรตีนถั่วลูปินไอโซเลต รายงาน ศึกษากรดอะมิโนจากถั่วเลนทิล 5 สายพันธุ์ พบว่า ถั่วเลนทิลขาดกรดอะมิโนทริพโตเฟน และการศึกษาของ พบว่าถั่วมารามา และถั่วหรั่ง ไม่พบกรดอะมิโนทริพโตเฟน ซึ่งช่วยในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอในร่างกาย MBPI จากทำแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ มีปริมาณกรดอะมิโนวาลีน ฮิสทิดีน และฟีนิลอะลานีน อยู่ที่ 36.41 ถึง 43.14, 23.98 ถึง 27.89 และ 47.22 ถึง 55.40 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อีกทั้งยังพบกรดแอสพาร์ติก และกลูตามิก โดยเป็นกรดอะมิโนที่โดดเด่นและสามารถพบได้โดยทั่วไปจากพืชตระกูลถั่ว อยู่ที่ 82.75 ถึง 97.82 และ 118.74 ถึง 140.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนกรดอะมิโนที่มีหมู่ไทออลประกอบด้วยกรดอะมิโนซิสเตอีน และเมไทโอนีน พบว่า MBPI ที่ผ่านการทำแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ มีกรดอะมิโนที่มีหมู่ไทออลอยู่ที่ 14.77 ถึง 17.23 มิลลิกรัมต่อกรัม มีปริมาณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากงานวิจัยของ ที่รายงานว่า MBPI หลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีกรดอะมิโนที่มีหมู่ไทออลอยู่ที่ 13.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ที่รายงานถึงพืชตระกูลถั่วที่อื่น ๆ ที่พบกรดอะมิโนดังกล่าวในปริมาณน้อย ได้แก่ ถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลูกไก่

Table. 2 Types and contents of amino acids in mung bean protein isolates obtained from different drying techniques

Amino acid (mg/g)		Spray-drying			Freeze-drying	Oven-drying
		140 °C	160 °C	180 °C		
Arginine	Essential amino acids	53.35	58.78	61.81	61.31	61.26
Histidine		23.98	27.26	27.89	27.82	27.83
Isoleucine		30.55	33.49	36.42	36.24	35.65
Leucine		63.47	71.07	75.41	73.94	73.65
Lysine		51.21	57.34	59.03	59.21	57.92
Methionine		11.10	12.25	13.05	12.85	12.61
Phenylalanine		47.22	52.65	55.40	54.53	54.54
Threonine		25.16	28.00	29.09	28.94	28.12
Tryptophan		7.91	8.93	8.09	8.43	8.01
Valine		36.41	40.46	43.14	42.99	42.71
%Total essential amino acids		49.38	50.23	49.40	49.63	49.36
%Total sulfur amino acids		2.08	2.09	2.08	2.09	2.02

ความสามารถในการละลายของ MBPI หลังจากทำแห้งด้วยเทคนิคแต่ละชนิดในสารละลาย pH 2, 4, 6, 8 และ 10 แสดงดัง Fig. 2 พบว่า MBPI ทุกตัวอย่างมีลักษณะการละลายเป็นกราฟยู (u-shape) นั่นคือสามารถละลายได้ดีในสารละละลายที่มีค่าเป็นกรดที่ pH 2 และสารละลายที่มีค่าความเป็นด่างที่ pH 8 และ 10 ส่วนค่าการละลายของ MBPI ที่น้อยที่สุดอยู่ที่สารละลาย pH 4 เนื่องจากโปรตีนมีประจุสุทธิรวมกันเป็นศูนย์ ซึ่งโปรตีนถั่วเขียวมีจุดไอโซอิเล็กทริค (isoelectric point, pI) อยู่ในช่วง pH 4.5 จากผลการวิจัยบ่งชี้ว่าความสามารถในการละลายของ MBPI มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่ามากกว่าค่า pI ของโปรตีน ทำให้โปรตีนมีประจุสุทธิเหมือนกันซึ่งก่อให้เกิดแรงผลักกันและทำให้โปรตีนละลายได้ดี เห็นได้ว่าอิทธิพลของ pH ในสารละลายส่งผลอย่างมากในการละลายของโปรตีน จากการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิขาเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 140, 160 และ 180 °C พบว่าอุณหภูมิขาเข้า 140 °C ที่สารละลาย pH 2 และ 10 มีค่าการละลายของโปรตีนมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และอิทธิพลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 140 ถึง 180 °C ทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนถั่วเขียวลดน้อยลงที่ pH 2 และ 10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนโปรตีนที่ได้จากวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าการละลายของโปรตีนต่ำกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย แต่มากกว่าการทำแห้งแบบอบลมร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จะเห็นได้ว่าโปรตีนที่ผ่านการทำแห้งด้วยเทคนิคที่ต่างกัน และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ส่งต่อความสามารถในการละลายของโปรตีนที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามความสามารถในการละลายของโปรตีนสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีปัจจัยอื่น ๆ มาส่งเสริม ได้แก่ pH ความเข้มข้นของเกลือ และความร้อน เป็นต้น

ค่าการอุ้มน้ำและน้ำมันของ MBPI แสดงดัง Table 1 พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งให้โปรตีนที่มีค่าการอุ้มน้ำมากกว่าทุกวิธีการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากให้ลักษณะของผงโปรตีนที่มีรูพรุน (porous powder) มีบริเวณพื้นผิวที่อุ้มน้ำไว้ได้ดีกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอยและอบลมร้อน ที่ให้ลักษณะผงโปรตีนอนุภาคก้อนกลม (globular powder) และแผ่นเกล็ด (agglomerate powder) ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ ที่กล่าวถึงโครงสร้างของพื้นผิวของโปรตีนที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าการอุ้มน้ำและน้ำมัน จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าผงโปรตีนจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งใช้ได้ดีในผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการการกักเก็บน้ำและน้ำมันสูง ส่วนอิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าของการทำแห้งแบบพ่นฝอยไม่ส่งต่อค่าการอุ้มน้ำและน้ำมันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อยู่ในช่วง 0.89 ถึง 0.99 กรัมต่อ

กรัมโปรตีน และการทำแห้งแบบอบลมร้อนเมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่ามีความสามารถในการอุ้มน้ำที่ไม่แตกต่างกัน แต่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ค่าการอุ้มน้ำและน้ำมันของโปรตีน มีความสำคัญต่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหารซึ่งเพิ่มผิวสัมผัสให้น่ารับประทานมากยิ่งขึ้น เป็นต้น (Rutkowski and Gwiazda, 1986)

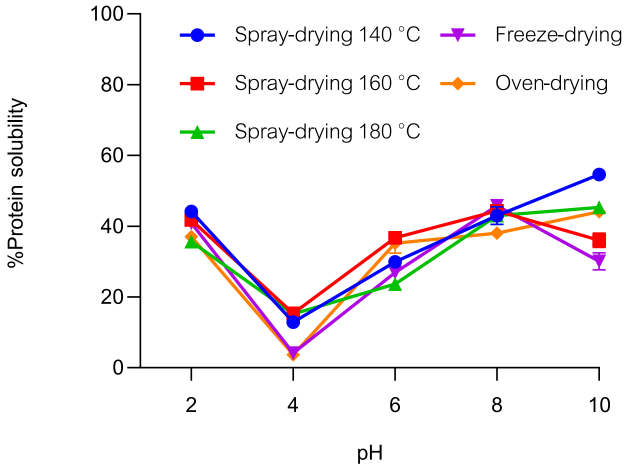


Fig. 1 Protein solubility of mung bean protein isolate obtained from different drying techniques

สรุปผล

จากการศึกษาวิธีการทำแห้งที่เหมาะสมของ MBPI พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งให้ผลผลิตมากกว่าทุกวิธีที่ร้อยละ 93.45 ส่วนอิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าที่เพิ่มขึ้นของการทำแห้งแบบพ่นฝอย ส่งผลให้มีร้อยละผลผลิตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 45.84 ถึง 53.84 และให้ผลผลิตต่ำกว่าวิธีการอื่น ๆ ส่วนวิธีการทำแห้งทุกชนิดให้ปริมาณโปรตีนมากกว่าร้อย 80 และจัดเป็นโปรตีนไอโซเลตตามข้อกำหนด โดยเฉพาะการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ให้ปริมาณโปรตีนมากถึงร้อยละ 97.68 ผงโปรตีนที่ได้หลังจากทำแห้งพบชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายได้อย่างครบถ้วน ซึ่งเหมาะสมต่อการบริโภคเพื่อการเจริญเติบโตของร่างกาย พร้อมกับสามารถพบกรดอะมิโนแอสปาติก และกลูตามิก ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่โดดเด่นในพืชตระกูลถั่ว อีกทั้งยังพบกรดอะมิที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งไม่พบในโปรตีนพืชบางชนิด ค่าการละลายของ MBPI ที่ผ่านการทำแห้งทุกชนิดสามารถละลายได้ดีในสารละลายกรดและด่าง แต่มีค่าการละลายน้อยในสารละลาย pH 4 ส่วนอิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าการละลายของโปรตีนให้ลดน้อยลง อย่างไรก็ตาม ค่าการละลายของโปรตีนสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีปัจจัยอื่น ๆ มาส่งเสริม เช่น ความร้อน วิธีการเตรียม และประเภทของสารละลาย ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งให้ค่าการอุ้มน้ำและน้ำมันมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของโปรตีนที่ดีในการเป็นวัตถุดิบเจือปนอาหารช่วยเพิ่มเนื้อสัมผัสและรสชาติที่ดีขึ้น จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลของวิธีการทำแห้งต่อ MBPI ที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกันนี้ จึงตอบสนองต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความหลากหลายในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร. ภคมน จิตประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

Agoreyo, B.O. O., Akpiroroh, O. A., Orukpe, O. R., Osaweren, Owabor, C. N. 2011. The effects of various drying methods on the nutritional composition of Musa paradisiaca, dioscorea rotundata and colocasia esculenta. Asian J. Biochem. 6(6): 458–464.

Akpan, E. J., Umoh I B. 2004. Effect of heat and tetracycline treatments on the food quality and acridity factors in cocoyam [*Xanthosoma Sagittifolium* (L) Schott]. Pak J Nutr. 3(4): 240–243.

Bernardo, A. E. N., Garcia, R. N., Adachi, M., Angeles, J. G. C., Kaga, A., Ishimoto, M., Utsumi, S., ecson-Mendoza. E. M.T. 2004. 8S Globulin of Mungbean [*Vigna Radiata* (L.) Wilczek]: Cloning and characterization of its cdna isoforms, expression in escherichia coli, purification, and crystallization of the major recombinant 8s Isoform." *J. Agric. Food Chem.* 52(9): 2552–2560.

Boatright, W.L., Hettiarachchy N. S. 1995. "Spray-Dried Soy Protein Isolate Solubility, Gelling Characteristics, and Extractable Protein as Affected by Antioxidants." J. Food Sci. 60(4): 806–809.

Brishti, F. H., Chay, S. Y., Muhammad, K., Ismail-Fitry, M. R., Zarei, M., Karthikeyan, S., Saari., N. 2020. Effects of drying techniques on the physicochemical, functional, thermal, structural and rheological properties of mung bean (*Vigna Radiata*) protein isolate powder. Food Res Int. 138(Pt B): 109783. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109783. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33288169.

Brishti, F. H., Chay, S. Y., Muhammad, K., Ismail-Fitry, M. R., Zarei, M., Saari. N. 2020. Texturized mung bean protein as a sustainable food source: techno-functionality, anti-nutrient properties, in vivo protein quality and toxicity. Food Funct. 11(10): 8918–8930.

Carbonaro, M., Cappelloni, M. Nicoli, S., Lucarini, M., Carnovale, E. 1997 Solubility-digestibility relationship of legume proteins. J. Agric. Food Chem. 45(9): 3387–3394.

Damodaran, S. 2008. Amino acids, peptides and proteins." Fennema's food chemistry. 4: 217–329.

De Gavelle, E., Huneau, J.-F., Bianchi, C. M., Verger, E. O., Mariotti, F. 2017. protein adequacy is primarily a matter of protein quantity, not quality: Modeling an increase in plant: Animal protein ratio in french adults. Nutrients. 9(12): 1333.

Feyzi, S., Varidi, M., Zare, F., Varidi, M. J. 2018. Effect of drying methods on the structure, thermo and functional properties of fenugreek (*Trigonella Foenum Graecum*) protein isolate. J Sci Food Agric. 98(5):1880–1888. doi.org/10.1002/jsfa.8669

Gorissen, S. H. M., Crombag, J. J. R., Senden, J. M. G., Waterval, W. A. H., Bierau, J., Verdijk, L. B., van Loon. L. J. C. 2018.Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates." *Amino Acids* 50.(12): 1685-1695. doi.org/10.1007/s00726-018-2640-5

Gulzar, M, Minnaar, A. 2017.Underutilized protein resources from african legumes." in *sustainable protein sources*. Elsevier: 197–208.

Haque, M A., Adhikari, B. 2015. Drying and denaturation of proteins in spray drying process. Handbook of industrial drying. 33(10): 971–985.

Kneifel, W, Seiler, A.1993. Water-holding properties of milk protein products-a review. Food Struct. 12(3): 297–308.

Kudre, T., Benjakul, S., Kishimura, H. 2013 Effects of protein isolates from black bean and mungbean on proteolysis and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella Albella*). LWT - Food Sci. Technol. 50(2): 511-518. doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.018.

Miroljub, B., Cabrilo, S., Pesic, M., Stanojevic, S., Zilic, S., Macej, O., Ristic, N. 2010. Profile and functional properties of seed proteins from six pea (*Pisum Sativum*) Genotypes. Int J Mol Sci. 11(12): 4973–4990.

Papadopoulos, P., Floudas, G. Schnell, I., Klok, H. A., Aliferis, T., Iatrou, H., Hadjichristidis, N. 2005. "Glass Transition111" in Peptides: Temperature and pressure Effects." J. Chem. Phys. 122(22): 224906.

Rozan, P., Kuo, Y. H., Lambein, F. 2001. Amino acids in seeds and seedlings of the genus lens." Phytochem. 58(2): 281–289.

การแปรรูปกะทิผงโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยและสารคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จากกากเนื้อมะพร้าว

Processing of coconut milk powder using spray drying technique and carboxymethylcelllulose produced from coconut residue

แก้วมณีจันทร์ อาษา, **วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์*,สุวิมล เจริญสิทธิ์**

Kaewmaneechan A-sa, Weerachet Jittanit*, Suvimol Charoensiddhi

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagiwcj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่ได้จากกากเนื้อมะพร้าวในการผลิตกะทิผง โดยนำกากมะพร้าวที่ได้จากการคั้นกะทิและบดลดขนาดมาลดปริมาณไขมันจนเหลือปริมาณไขมันเท่ากับ 0.73% นำไปสกัดเซลลูโลส จากนั้นนำไปสังเคราะห์ CMC เพื่อใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในการเตรียมตัวอย่างอบแห้งกะทิผง ในการทดลองศึกษาอัตราส่วนของ CMC (0.1- 0.6 กรัมต่อกะทิ 100 กรัม) และใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมของ CMC ในการทดลองถัดมา โดยใช้สภาวะการทำแห้งคือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกที่ 180 และ 110 °C ตามลำดับ ศึกษาปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน (MD) เป็นสารตัวพา 2 ระดับ คือ 20 และ 25 กรัมต่อกะทิ 100 กรัม การทดลองพบว่าอัตราส่วนกะทิต่อ CMC ที่เหมาะสมคือ 100:0.6 เนื่องจากช่วยให้ส่วนผสมก่อนอบแห้งมีค่า Emulsion stability (ES) สูงที่สุด สภาวะในการทำแห้งที่ทำให้กะทิผงมีคุณภาพดีและมีปริมาณผลผลิตที่ได้สูง คือ การใช้ MD เป็นสารตัวพาที่ 20 กรัมต่อกะทิ 100 กรัม และเติมสาร CMC 0.6 กรัม

คำสำคัญ: กะทิผง, การทำแห้งแบบพ่นฝอย, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, สารตัวพา, อิมัลซิไฟเออร์

Abstract

This research studies the possibility of applying carboxymethylcellulose (CMC) produced from coconut residue in the manufacturing of coconut milk powder. Coconut residual obtained from coconut milk squeezing and milling was reduced in size and its fat content to 0.73%. Then, CMC was synthesized to be used as an emulsifier in the sample preparation for drying of coconut milk powder. The experiments were conducted by varying the CMC (0.1- 0.6 g per 100 g of coconut milk). The suitable ratio of CMC was applied in the succeeding experiment by using the inlet and outlet drying air temperatures of 180 and 110 °c respectively and applying maltodextrin as a drying carrier at two levels (20 and 25 g per coconut milk 100 g). Also, the coconut powder productions with and without the CMC addition were compared. The result indicated that the suitable ratio of CMC:coconut milk was 0.6:100 by weight because it provided the mixture sample before spray drying that had the highest value of Emulsion stability (ES). The drying condition that produced the greatest quality with the high powder recovery was the application of maltodextrin at 20 g and CMC at 0.6 g per coconut milk 100 g.

Keywords: Carboxymethylcellulose, Coconut milk powder, emulsifier, drying carrier

คำนำ

มะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจประเภทพืชน้ำมันที่มีการปลูกอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปกากมะพร้าวเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำกะทิ มักนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในกากมะพร้าว คือ ใยอาหาร แต่กากมะพร้าวหลังการสกัดกะทิยังคงมีไขมันเหลืออยู่ในปริมาณสูง ส่งผลให้กากเนื้อมะพร้าวมีปริมาณไขมันสูงและมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้เป็นแหล่งของใยอาหาร ซึ่งแหล่งของใยอาหารที่ดีควรมีใยอาหารทั้งหมดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 มีไขมันปริมาณต่ำ ไม่มีกลิ่นและรส (Yalegama et al., 2013)

กะทิผง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำกะทิสดมาทำให้เป็นผงซึ่งเมื่อผสมน้ำแล้วสามารถนำไปใช้ได้ทันที กะทิผงมีลักษณะเป็นผงร่วนมีสีและกลิ่นตามธรรมชาติของกะทิ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2528) การผลิตกะทิผงเริ่มจากการเตรียมน้ำกะทิ จากนั้นทำการปรับความเข้มข้นกะทิ อาจมีการเติมสารช่วยให้กะทิไม่จับตัวกันเป็นก้อนผสมลงไปก่อนที่จะนำไปทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย จากนั้นบรรจุกะทิผงที่ได้ในภาชนะที่สามารถป้องกันอากาศและความชื้นผ่านเข้าออกได้ เพื่อป้องกันไม่ให้กะทิผงที่ได้เกิดการเสื่อมเสียเร็ว

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์กะทิผงที่วางจำหน่ายในท้องตลาดส่วนใหญ่ใช้วัตถุเจือปนอาหารที่ไม่ได้มีอยู่ตามธรรมชาติของน้ำกะทิเช่น มอลโทเด็กซ์ทริน กัมอารบิก ในการเตรียมน้ำกะทิก่อนนำไปอบแห้งในปริมาณที่สูง ผู้วิจัยจึงต้องการนำกากเนื้อมะพร้าวที่เป็นของเหลือจากการคั้นกะทิมาใช้เป็นสารตัวพาในการผลิตกะทิผง เพื่อช่วยลดปริมาณการใช้วัตถุเจือปนอาหาร และเพิ่มมูลค่าให้กับสิ่งเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกะทิ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตกะทิผงโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการนำกากเนื้อมะพร้าวซึ่งเป็นของเหลือที่ได้จากกระบวนการผลิตกะทิและมีใยอาหารสูงไปใช้เป็นสารตัวพา ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อลดปริมาณการใช้วัตถุเจือปนอาหาร และใช้ประโยชน์กากเนื้อมะพร้าวเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับสิ่งเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกะทิ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การผลิตกากเนื้อมะพร้าวจากการคั้นกะทิ

1) การเตรียมกากเนื้อมะพร้าว

คั้นกะทิด้วยเครื่องคั้นกะทิ (Sakaya, รุ่น A2, Sakaya Automate Co., Ltd, Thailand.) จำนวน 3 รอบ โดยเก็บน้ำกะทิที่ได้จากการคั้นรอบที่ 1 และ 2 เพื่อนำไปผลิตกะทิผงต่อไป

2) การบดลดขนาดอนุภาค

ใช้วิธีการซึ่งดัดแปลงจาก มุก และพิณทิพย์ (2560) ชั่งกากเนื้อมะพร้าวหลังคั้นกะทิ โดยผสมกากเนื้อมะพร้าวกับน้ำบดลดขนาดด้วยเครื่อง Supermass colloider (Masuko Sangyo, รุ่น MKPB6-2, Japan) กรองแยกกากและบีบน้ำออก นำกากที่แยกได้เข้าอบในตู้อบแบบถาดอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 h

3) การกำจัดไขมันด้วยตัวทำละลาย

ใช้วิธีการซึ่งดัดแปลงจาก มุก และพิณทิพย์ (2560) ชั่งกากเนื้อมะพร้าวแห้ง เติมเฮกเซนที่อัตราส่วน 1:10 ทำการสกัดด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบใบกวน (Ika, RW20 digital, IKA-Werke GmbH&Co.,Germany) ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 4 h จากนั้นระเหยเฮกเซนออกจากกากมะพร้าวในตู้ดูดควัน และอบแห้งด้วยตู้อบแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 h

2. การเตรียมเซลลูโลสจากกากเนื้อมะพร้าว

1) การต้มด้วยด่าง

ดัดแปลงจาก โศรดา และคณะ (2560) นำกากมะพร้าวจากข้อ 1.3 ผสมกับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10% (w/v) ที่อัตราส่วนกากเนื้อมะพร้าวต่อสารละลายด่าง 1:10 (w/v) ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 h หลังจากนั้นกรองเยื่อแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง

2) การกำจัดลิกนิน

ดัดแปลงจาก โศรดา และคณะ (2560) นำกากเนื้อมะพร้าวที่ผ่านการต้มด้วยด่างนำมากำจัดลิกนินด้วยสารละลาย $NaClO_2$ ความเข้มข้น 1.0% (w/v) ที่ปรับค่าพีเอชเป็น 4 ด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น โดยใช้น้ำหนักของกากเนื้อมะพร้าวต่อสารละลายในอัตราส่วน 1:30 (w/v) ที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 2 h จากนั้นกรองกากเนื้อมะพร้าวและล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง ทำซ้ำอีก 2 รอบ นำกากเนื้อมะพร้าวที่ได้ไปอบแห้งด้วยตู้อบแบบถาดอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 h และนำมาบดด้วย Hammer mill *(Hosokawa Micron, รุ่นAP-S, Hosokawa Micron Corporation, Japan.)*

3. กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) จากกากเนื้อมะพร้าว

ดัดแปลงจาก Rachtanapun et al. (2012) โดยนำเซลลูโลสที่เตรียมจากกากเนื้อมะพร้าวปริมาณ 15 กรัม ผสมกับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40% 50 มิลลิลิตร และไอโซโพรพานอลให้ได้ปริมาตรรวม 450 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 30 min เติมกรดโมโนคลอโรอะซิติก 18 กรัม แล้วปั่นกวนต่อไปอีกเป็นเวลา 30 min นำเข้าเตาอบเพื่อทำปฏิกิริยาต่อที่ 55 °C เป็นเวลา 3 h 30 min รินส่วนที่เป็นของเหลวออก นำส่วนหนืดคล้ายเจลคนในเมทานอลความเข้มข้น 70% ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็นกลางด้วยกรดอะซิติก 90% จากนั้นกรองส่วนหนืดคล้ายเจลออก ล้างด้วยเอทานอลความเข้มข้น 70% 300 มิลลิลิตร 6 ครั้งโดยแช่ครั้งละ 10 min นำ CMC ที่สังเคราะห์ได้ไปอบแห้งที่ 60 °C นาน 24 h เตรียม CMC ทั้งหมดสามรอบโดยใช้สภาวะเดียวกันจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ โดยวาง*แผนการทดลองแบบ CRD และ* ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี *Duncan*

4. ศึกษาคุณภาพทางเคมีและทางกายภาพของ CMC

1) การศึกษาหาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของ CMC ด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

นำตัวอย่าง CMC จากกากเนื้อมะพร้าวและ CMC ทางการค้ามาอบแห้งเพื่อไล่ความชื้น แล้วทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR (รุ่น JIR-SPX200, JEOL, Japan) โดยวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 4,000–400 cm^{-1}

2) ระดับการแทนที่ (Degree of Substitution, DS)

ละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในกรดไนตริกเข้มข้น เพื่อให้หมู่ไนเตรทไปแทนที่หมู่คาร์บอกซีเมทิลในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแล้วทำการล้างกำจัดกรดส่วนเกินออกด้วยเอทานอลแล้วนำไปอบให้แห้ง นำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปละลายในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.5 N แล้วไทเทรตสารละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อหาปริมาณ NaOH ที่เหลืออยู่ในสารละลาย

5. การศึกษาอัตราส่วนของสารตัวพาและสารเพิ่มความคงตัว

1) ศึกษาอัตราส่วนของสารตัวพา

ศึกษาอัตราส่วนของปริมาณมอลโทเด็กซ์ทริน (MD) ที่เหมาะสม โดยนำกะทิผสมกับ MD ที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 20 และ 25 กรัมต่อกะทิ 100 กรัม นำเข้าเครื่อง Mini Spray Dryer (BUCHI, รุ่น B-290, BUCHI (Thailand) Ltd., Thailand.) โดยใช้อุณหภูมิขาเข้าที่ 160-200 °C และอุณหภูมิขาออกที่ 90–130 °C

Table 1 Ratio of drying carrier and condition in spray drying coconut milk powder.

Treatment	Coconut milk (g)	Maltodextrin (g)	Inlet Temperatures (°C)	Outlet Temperatures (°C)	Result
1			160	90	✕
2	100	20	180	110	✓
3			200	130	✓
4			160	90	✕
5	100	25	180	110	✓
6			200	130	✓

✓ means can be dried into coconut milk powder.

✕ means cannot be dried into coconut milk powder.

5.2 ศึกษาอัตราส่วนสารเพิ่มความคงตัว

ประเมินผลความคงตัวด้วยค่า Emulsion Stability (ES) โดยให้ความร้อนกะทิและนำไปผสม CMC จากกากมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 กรัมต่อกะทิ 100 กรัม จากนั้นตั้งทิ้งไว้จนกะทิแยกชั้นเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของอิมัลชั่น (Emulsion phase) กับส่วนของน้ำ คำนวณค่า ES ตาม Equation 1

$$ES = \frac{\text{Emulsion phase height} \times 100}{\text{Total height coconut milk}} \qquad (1)$$

เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วนำกะทิผสมสารตัวพาและสารเพิ่มความคงตัวนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 1 min แล้วโฮโมจิไนส์ด้วย Homogenizer (Benchmark Scientific, รุ่น D1000-E, Benchmark Scientific Inc., USA) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยด้วย Mini Spray Dryer B-290 (BUCHI, รุ่น B-290, BUCHI (Thailand) Ltd., Thailand.) โดยการศึกษาปัจจัยในการทำแห้ง คือ ปริมาณสารตัวพาและสารเพิ่มความคงตัว และควบคุมอุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 °C อุณหภูมิอากาศขาออก 110 °C %อัตราการดูดลมเข้า 100% และ %ความเร็วปั๊ม 20% จากนั้นนำกะทิผงที่ได้ไปศึกษาคุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ

6. ศึกษาคุณภาพทางเคมีและทางกายภาพของผลิตภัณฑ์กะทิผงที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย

1) ร้อยละผลผลิตที่ได้ (%yield) และ % Powder Recovery

คำนวณค่าร้อยละผลผลิตที่ได้ (%yield) และ % powder recovery โดยใช้สมการตาม Equation 2 และ Equation 3

$$\%\text{Yield} = \frac{\text{Weight of sample after drying} \times 100}{\text{Weight of sample after drying}} \quad (2)$$

$$\%\text{Powder recovery} = \frac{\textit{Dry weight of the sample after drying} \times 100}{\textit{Dry weight of the sample}} \quad (3)$$

2) ปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity)

วัดด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ นำตัวอย่างใส่ในถ้วยตัวอย่างปริมาณครึ่งถ้วย นำถ้วยตัวอย่างเปิดฝาออกใส่ในช่องวัดค่า aw บิดที่ดึงช่องใส่ตัวอย่างไปที่ READ รอจนเครื่องมีเสียง อ่านค่า aw จากเครื่อง

3) ค่าการละลาย (Solubility)

ชั่งตัวอย่างผง 2.5 กรัม นำไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 15 min แยกส่วนใสนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C 24 h คำนวนค่าความสามารถในการละลาย โดยใช้สมการสมการตาม Equation 4

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{\text{Weight of solution after drying} \times 100}{\text{Weight of sample}} \quad (4)$$

4) ความสามารถในการเปียก (Wettability)

นำน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างน้ำกลั่นกับจุดปล่อยกะทิผง 10 เซนติเมตร นำกะทิผง 0.1 กรัม เทลงในบีกเกอร์ตรงจุดที่กำหนดพร้อมจับเวลาจนกว่ากะทิผงจะเปียกน้ำทั้งหมด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

กากมะพร้าวหลังคั้นกะทิมีปริมาณไขมันสูงถึง 36.22% ถึงแม้ว่าจะผ่านการคั้นกะทิ 3 รอบแล้วก็ตาม แต่เมื่อทำการกำจัดไขมันด้วยเฮกเซนพบว่ากากมะพร้าวเหลือปริมาณไขมัน 0.73% การบดลดขนาดแบบเปียกเป็นการทำลายโครงสร้างเมทริกซ์ของใยอาหารที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้งและทำให้โครงสร้างยุบตัว น้ำที่ใช้ในการบดจะเข้าไปจับกับอนุภาคที่แตกออก เมื่อบีบน้ำออกอนุภาคที่จับกับน้ำจะหลุดออกไปกับน้ำ

เนื่องจากกากมะพร้าวมีองค์ประกอบหลักคือเซลลูโลสซึ่งไม่ละลายน้ำแต่สามารถดัดแปรโครงสร้างให้สามารถละลายน้ำได้ด้วยการใส่สารละลาย NaOH ลงไปในเซลลูโลสบริสุทธิ์เพื่อทำให้เส้นใยพองตัว จากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตท โดยการแทนที่ของหมู่ $-CH_2COOH$ (Carboxymethyl Groups) บนหมู่ –OH (Hydroxyl Group) 3 หมู่ของหน่วยย่อยของเซลลูโลสเกิดเป็น Ether Linkage ดังนั้นจึงได้ศึกษาการนำเซลลูโลสจากกากมะพร้าวมา

ดัดแปลงโครงสร้างให้มีความคล้ายกับ CMC เพื่อให้กากมะพร้าวมีคุณสมบัติที่คาดว่าจะใช้ในการเป็นสารตัวพาในการทำแห้งกะทิผงแบบพ่นฝอยได้

จากการนำกากมะพร้าวที่ผ่านการลดไขมันมาสกัดเซลลูโลสและผ่านกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากการทดลองพบว่าได้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากกากมะพร้าว 63.28 กรัม จากกากมะพร้าวแห้ง 112.92 กรัม และผล FT-IR spectra วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จากกากมะพร้าวและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทางการค้า แสดงดัง Fig. 2 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันหลัก ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนิล และอีเทอร์ และลักษณะของเส้นกราฟที่ได้พบว่าที่ 2900 cm ปรากฏพีค -CH stretching, 1600 cm ปรากฏพีค -COO group, 1430 cm ปรากฏพีค -CH bending และ 1080 ปรากฏพีค -C-O-C stretching เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความถี่ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากกากมะพร้าวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทางการค้า พบว่า peak ที่แต่ละ Wavenumber มีลักษณะใกล้เคียงกัน

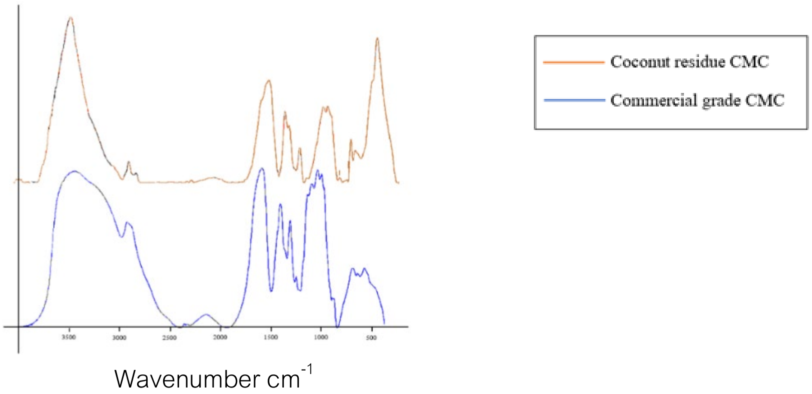


Fig. 2 FT-IR spectra show functional group of Commercial CMC and Coconut residue CMC

จากนั้นทดลองนำ CMC ทางการค้ามาใช้เป็นสารตัวพาในการทดลองโดยเลือกใช้สภาวะการอบแห้งคือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกที่ 180 °C และ 110 °C ตามลำดับ เนื่องจากหากเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนน้ำในผลิตภัณฑ์อาหารผงให้ระเหยออกไป และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง หรืออีกนัยหนึ่งมีความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์และอาหารผงมีค่าลดลง (คณิตนันท์, 2557) และใช้ปริมาณ CMC 20 กรัมต่อกะทิ 100 กรัม จากผลการทดลองพบว่า CMC ไม่สามารถใช้เป็นสารตัวพาได้เนื่องจากไม่มีคุณสมบัติใช้เป็นสารตัวพาคือไม่สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มปริมาณผลผลิตให้สูงขึ้นได้แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า CMC มีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์เนื่องจากเมื่อเติม CMC กะทิไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างอยู่ในภาชนะเพื่อรอการป้อนเข้าสู่เครื่องทำแห้ง ซึ่งต่างจากการเติม MD เพียงอย่างเดียวที่กะทิจะเกิดการแยกชั้นซึ่งอาจส่งผลกับคุณลักษณะและสมบัติของกะทิผงที่ได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาการใช้ MD ร่วมกับ CMC กากมะพร้าวในการทำแห้งกะทิแบบพ่นฝอยเพื่อช่วยไม่ให้กะทิเกิดการแยกชั้นระหว่างการทำแห้ง และเพื่อคุณลักษณะที่ดีของกะทิผงโดยศึกษาการสังเคราะห์ CMC จากกากมะพร้าวเพื่อนำมาใช้ในการผลิตกะทิผง

Fig. 1 Coconut milk and maltodextrin were separated before spray drying.

ในการสังเคราะห์ CMC จำเป็นต้องใช้เซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์โดยการกำจัดองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลออกซึ่งการกำจัดเฮมิเซลลูโลสทำได้ในขั้นตอนการต้มด้วยด่าง โดยสารละลายด่างจะเข้าทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับเฮมิเซลลูโลส และทำการกำจัดลิกนินด้วยสารละลายที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ ในงานวิจัยนี้ทดลองนำกากมะพร้าวที่ผ่านการลดไขมันมาสกัดเซลลูโลส จากการทดลองพบว่ากากมะพร้าวมีผลผลิต 53% และปริมาณเซลลูโลสเท่ากับ 40.66% การสกัดเซลลูโลสโดยการนำกากมะพร้าวแช่ในสารละลาย NaOH ทำให้องค์ประกอบของกากมะพร้าวที่ไม่ทนต่อด่างละลายออกมาอยู่ในรูปของสารละลายส่งผลให้ลิกนินลดลง

CMC ทางการค้า และ CMC กากมะพร้าวมีค่า DS. เท่ากับ 0.73 และ 0.80 ตามลำดับ ค่า DS. ที่สูงของ CMC กากมะพร้าวแสดงถึงปฏิกิริยาการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิลต่อหนึ่งโมเลกุลกลูโคสและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเกรดการค้า (โศรดา และคณะ, 2560)

ตารางที่ 2 Emulsion stability (ES) of Coconut milk

Treatment	Coconut milk (g)	Coconut residue CMC (g)	Emulsion Stability (%)
1	100	0.1	61.29
2	100	0.2	62.50
3	100	0.3	63.63
4	100	0.4	65.62
5	100	0.5	75.00
6	100	0.6	87.50

จากตารางที่ 2 ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ CMC ที่ได้จากกากมะพร้าวในการทำแห้งกะทิผงโดยพิจารณาจากความคงตัว ศึกษาค่า Emulsion Stability (ES) จากการทดลองพบว่ากะทิสดหากไม่เติมสารเพิ่มความคงตัวจะส่งผลให้กะทิเกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจน ระบบอิมัลชัน oil-in-water ควรมีค่า ES สูงกว่าร้อยละ 80 และการเพิ่มความคงตัวของน้ำกะทิแปรผันตรงกับปริมาณ CMC ที่เติมลงไป การเติม CMC ที่ได้จากกากมะพร้าวในปริมาณ 0.1-0.5% w/v ไม่เพียงพอต่อการเพิ่มความคงตัวกะทิ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.6 พบว่ากะทิจะมีความหนืดมากจนเกินไปจนเปลี่ยนเป็นสภาพคล้ายเจล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากกากมะพร้าวที่ระดับความเข้มข้น 0.6% w/v สามารถป้องกันการรวมตัวของเม็ดไขมันได้

Table 3 Effects of coconut milk powder production using carboxymethyl cellulose from coconut residue as a emulsifier on spray drying.

Treatment	%yield	Powder recovery (%)	Solubility (%)	Wettability (s)	aw
1 (MD 20g)	16.20±0.175^{ns}	74.28±0.389^{ns}	92.21±0.163^{a}	5.56±0.090^{a}	0.36±0.003^{ns}
2 (MD 25g)	16.43±0.135^{ns}	73.72±0.676^{ns}	92.31±0.266^{a}	5.49±0.140^{a}	0.35±0.018^{ns}
3 (MD 20g + CMC coconut residue 0.6g)	16.39±0.057^{ns}	73.95±0.192^{ns}	98.10±0.189^{b}	4.19±0.085^{b}	0.35±0.068 ^{ns}
4 (MD 25g + CMC coconut residue 0.6g)	16.32±0.066^{ns}	73.91±0.469^{ns}	98.87±0.246^{b}	4.33±0.342^{b}	0.35±0.099 ^{ns}

^{a,b,c,d}Different letters in the same column mean significant differences *($p > 0.05$)*

ns is not significantly different statistically at 95%

เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมของการเติม CMC จากกากมะพร้าวเพื่อทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ จึงทำการทดลองทำแห้งกะทิผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย อัตราส่วนของกะทิและอิมัลซิไฟเออร์ที่อัตราส่วนสารตัวพา 20 กรัมต่อกะทิ 100 กรัม และเติมสาร CMC 0.6 กรัม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณผลผลิต (%yield) และ %Powder recovery ของกะทิผงมีค่าซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ปริมาณ % Powder recovery สูงแสดงให้เห็นว่ามีการเกาะติดของผงที่ผนังของเครื่องอบแห้งในปริมาณที่น้อย

ค่าการละลาย ตามตารางที่ 3 ผลการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เห็นได้ว่ากะทิผงที่ใช้ CMC กากมะพร้าวเป็นอิมัลซิไฟเออร์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่ากะทิผงที่ใช้ MD เพียงอย่างเดียว

ความสามารถในการเปียก คือ ความสามารถของผงที่จะยอมให้น้ำแทรกผ่านเข้าไปที่อุณหภูมิหนึ่งเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถคืนตัวเมื่อเติมน้ำของอาหารชงละลายทันที จากค่า Wettability ของกะทิผงที่ใช้ CMC จากกากมะพร้าวเป็นอิมัลซิไฟเออร์พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกะทิผงที่ใช้สารตัวพาเพียงอย่างเดียว

ปริมาณ aw ของกะทิผงไม่แตกต่างกันมาก จากผลการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.35-0.36 ซึ่งในอาหารแห้งควรมีค่าน้อยกว่า 0.6 aw มีบทบาทสำคัญมากต่อการแปรรูปและการเก็บรักษาอาหารอบแห้งโดยมีผลต่อปฏิกิริยา ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย การเจริญหรือความคงตัวของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในอาหารซึ่งมีความสัมพันธ์กับความคงตัวของอาหาร

สรุป

กากมะพร้าวที่ได้จากการคั้นกะทิและบดลดขนาดมาลดปริมาณไขมันจนเหลือปริมาณไขมันเท่ากับ 0.73% นำไปสกัดเซลลูโลสจากนั้นนำไปสังเคราะห์ CMC สามารถใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในการเตรียมตัวอย่างอบแห้งกะทิผง โดยใช้สภาวะการทำแห้งคือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกที่ 180 °C และ 110 °C ตามลำดับ และใช้ปริมาณ MD เป็นสารตัวพา 20 ต่อกะทิ 100 กรัม และเติมสาร CMC 0.6 กรัม การทดลองพบว่า CMC กากมะพร้าวช่วยให้ส่วนผสมก่อนอบแห้งมีค่า Emulsion stability (ES) สูงที่สุด กะทิผงมีคุณภาพดีและมีปริมาณผลผลิตที่ได้สูง และ Wettability ต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิมล เจริญสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้เสียสละเวลาและกรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณสาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความกรุณาสนับสนุนมอบทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ

เอกสารอ้างอิง

คณิตนันท์ เอซัน. 2557. การศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีต่อคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของน้ำตาลมะพร้าวผง.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

มุก ลิ้มมณี, พิณทิพย์ รัมภกาภรณ์. 2560. การเตรียมกากมะพร้าวจากกากคั้นกะทิเพื่อนำไปดัดแปรทางเคมีและเสริมในผลิตภัณฑ์อาหาร. ใน: รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55. สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม, สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 811–812.

โศรดา กนกพานนท์, ชารีฟ อินทพันธ์, อภิตา บุญศิริ. 2560. การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเปลือกมะพร้าวอ่อน. วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์ 4(4): 60–65.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2528. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกะทิสำเร็จรูป. มอก. 582–2528. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

Rachtanapun, P.; Luangkamin, S.; Tanprasert, K.; Suriyatem, R. 2012. Carboxymethyl cellulose film from durian rind. LWT-Food Sci. Technol. 48: 52–58.

Yalegama, L. L. W. C., Karunaratne, D. N., Sivakanesan, R., Jayasekara, C. 2013. Chemical and functional properties of fibre concentrates obtained from by-products of coconut kernel. Food Chemistry. 141(1): 124–130.

Influence of heat, proteases, and time on the hydrolysis of cricket protein

Siriprapa Jitmoleerat, Wasaporn Preteseille Chanput*

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wasaporn.c@ku.th

Abstract

It has been increasing consumer interest in new protein sources, in which edible insects are one of the popular alternatives. Cricket is a protein-rich edible insect compared to others; therefore, it drives so much attention to protein hydrolysate production. This research aims to study the influence of processing factors on some parameters of cricket protein hydrolysate. The percentage of degree of hydrolysis (%DH) and molecular weight distribution of cricket protein were examined. The results showed that the %DH of cricket protein hydrolysate using Alcalase® was significantly higher than those of Neutrase® throughout the hydrolysis time up to 120 minutes. The %DH was increased in proportion to the hydrolysis time. Heat treatment at 80 ^{o}C for 30 minutes prior to enzymatic hydrolysis, did not show significant difference in terms of %DH, compared to the non-heat samples (except heat treated followed by Alcalase 90 minutes). The highest %DH of cricket protein obtained from Alcalase hydrolysis was observed at 120 minutes (73.88±2.71%). From the results of SDS-PAGE, most protein bands were absent after enzymatic hydrolysis at 60, 90, and 120 minutes. Most of the protein fragments were below 10-15 kDa.

Keywords: Alcalase, cricket, enzymatic hydrolysis, Neutrase, SDS-PAGE

Introduction

According to the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, the global population will rise (United Nations, 2019). There may be a shortage of food, space for living, cultivating, and area to farm animals in the future. On top of that, there might be insufficient protein production capacity due to the huge amount of land required and greenhouse gas emissions. As a result, consumers have been increasingly turning to alternative proteins. Edible insects provide a nutritious alternative to animal protein for human consumption. It is a trendy nowadays due to its high protein content, fast reproductive rate, little natural resources required for rearing, and few lower greenhouse gas emissions than livestock (Kim et al., 2019). In Southeast Asia, insects have been consumed from the past up to nowadays. Insect consumption is currently popular and in high demand in the market. According to the report that represents the benefit of insects (high in protein, fiber, and vitamin B12, as well as being biologically active), the trading value of insects has increased by 20% per year over the last five years. The global edible insect business is currently worth 12,800 million baht (Van Huis et al., 2013).

House cricket (*Acheta domesticus*) is native to South-West Asia and has a protein content of 64.4–70.8% dry weight (Brogan et al., 2021). Although cricket is rich in protein, consumers hesitate to consume them due to their unappealing appearance. Protein hydrolysate serves several functions, including increasing solubility, water-holding capacity, emulsifying ability, and foam formation ability. Furthermore, protein hydrolysate is also beneficial to human health. It can control the operation of various systems in the human body and reduce the risk of developing certain diseases. It was discovered that insect protein hydrolysate possesses a wide range of biological activities, including antioxidant properties, anti-hypertensive properties, anti-diabetic properties, anti-inflammatory properties, and properties to reduce the allergenicity (Hall et al., 2017; Hall et al., 2018). Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of heat treatment, types of proteases and hydrolysis time on cricket protein hydrolysate preparation using commercial enzymatic hydrolysis by determination of % degree of hydrolysis and molecular weight distribution prior to further study on, for instance, biological properties as well as reduction of allergenicity.

Materials and Methods

Materials

Unless specified, chemicals used were of reagent grade and obtained from suppliers: Sodium hydroxide, o-phthalaldehyde, 2-mercaptoethanol, brilliant blue G250, bromophenol blue, and ammonium persulphate were purchased from Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA). Hydrochloric acid 37% was obtained from QRëC^{TM} (Quality Reagent Chemical, New Zealand). Sodium dodecyl sulphate, sodium tetraborate and tris (hydroxymethyl)methylamine were purchased from Ajax finechem Pty Ltd (New South Wales, Australia).

Methanol and acetic acid (glacial) were bought from MERCK™ (Darmstadt, Germany). Glycine and glycerol were obtained from Thermo Fisher Scientific (Waltham, MA, USA).

Whole house crickets (*Acheta domesticus*) were purchased from Global Bugs Asia (Bangkok, Thailand). Alcalase® (Protease from *Bacillus licheniformis*, ≥ 2.4 U/g) and Neutrase® (Protease from *Bacillus amyloliquefaciens*, ≥ 0.8 U/g) were used in the hydrolysis reaction and obtained from Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA).

Preparation of cricket protein hydrolysate using proteases

The frozen whole crickets were stored at 4 °C overnight to thaw. The following morning, samples were washed twice with tap water, then boiled in distilled water at a ratio of 1:2 (w/v) for 5 minutes. Then, drained water and blended with a blender in distilled water at a ratio of 1:2 (w/v) for 2 minutes until homogenous. The blended cricket was divided into 3 methods for protein hydrolysate preparation, (1) no heat and no enzyme addition; (2) no heat and enzymatic hydrolysis; and (3) heat at 80 °C for 30 minutes followed by enzymatic hydrolysis. Enzymatic hydrolysis was performed using 3% (E/S) at pH 8 for alcalase and pH 7 for neutrase. Then, the samples were incubated in a shaking water bath and subjected to constant shaking at 60 °C and 55 °C, respectively, for 15, 30, 60, and 90 minutes. Samples were boiled at 100 °C for 5 minutes to stop the reaction and centrifuged at 7,000 rpm at 4 °C for 15 minutes. The supernatant was then analyzed for %degree of hydrolysis and molecular weight distribution.

%Degree of hydrolysis (%DH)

According to the method of Alu'datt et al. (2012), 50 µL of clear protein hydrolysate was mixed with 2 mL of o-phthalaldehyde reagent, incubated for 2 minutes, and measured at wavelength 340 nm. The %DH was calculated using the following Equation 1:

$$\%DH = \frac{MW \times Abs\ (340nm)}{(\delta \times \varepsilon \times \rho)} \times 100 \qquad (1)$$

MW represents the mean of molecular weight of amino acids in crickets (136.65), δ is the dilution factor, ε is the constant (6000 m^{-1} cm^{-1}) and ρ is the soluble protein (mg/mL).

SDS-PAGE

The method of Hall et al. (2018) was used with a slight modification. A 20 µg of cricket protein hydrolysates with %DH greater than 50% were mixed with the loading dye in a ratio of 1:1 and heated to 95 °C for 5 minutes. Then, the protein marker and samples were loaded into gel slots using 12% separating gel and

4% stacking gel. The gel was run at 100 volts for 2 hours. After that, the gel was stained by soaking in the staining solution for 1 hour, then washed it off with the de-staining solution until the gel was transparently clear.

Statistical analysis

Data were analyzed using one-way ANOVA ($p \leq 0.05$) and differentiate the means by Duncan's multiple range test (DMRT). Value $p \leq 0.05$ was considered to be statistically significant. All statistical analyses were performed using the SPSS (Statistics Package for the Social Sciences) program version 22.

Result and Discussion

%Degree of hydrolysis (%DH)

Cricket protein hydrolysate is derived from enzymatic or chemical hydrolysis of cricket protein. Hydrolysis causes protein molecules to be cleaved into polypeptides or short-chain peptides, which can improve the protein's functional and biological properties (Hall et al., 2018). The digestion can be speculated using %degree of hydrolysis (%DH) which is an indicator of peptide bond cleavage and the breakdown of the structured proteins into smaller peptides. In this experiment, blended whole crickets were heated and hydrolysed by two different proteases at different time points.

Fig. 1 shows that %DH can be affected by the types of enzymes, hydrolysis time, and temperature. The control (no heat + no enzyme) at 15, 30, 60, 90, and 120 minutes of digesting time had the lowest %DH (less than 12%). Addition of alcalase and neutrase could significantly elevate %DH throughout the digesting time 15-120 minutes compared to the control ($p \leq 0.05$). Surprisingly, the samples treated by heat treatment prior to enzymatic hydrolysis (heat + enzyme) was not significantly different from the non-heated sample (no heat + enzyme), except alcalase digestion at 90 minutes. It can be explained that heating cricket powder at 80 ^{o}C might not be sufficient to loosen the complex cricket protein structure which is bonded with chitin, fat and phenolic compounds (Choi et al., 2017; Tan et al., 2021). Higher temperature assisted with pressure could be worth for the future trial. In both enzymes, particularly alcalase, when hydrolysis time was increased, the %DH was also significantly higher due to the enzymatic reaction. Obviously, alcalase could better cleave cricket protein than neutrase (Fig. 1) ($p \leq 0.05$). The %protein yield of alcalase and nutrase was observed maximumly 17% and 7% at 90 minutes digesting time, respectively. Even if both alcalase and neutrase are endopeptidases and have been widely used to produce protein hydrolysate (Aspevik et al., 2016), they have different principles of function. Alcalase is a serine protease that attacks the peptide bond through a serine residue at the active site. However, neutrase is a metalloprotease that randomly hydrolyses internal peptide bonds with zinc metal as a co-catalyst (Nielsen, 2010). Although the zinc content of house cricket has been reported to be 16-16.9

mg/100 g dry weight, this this may not be sufficient (Koseckova et al.,2022). Another reason could be that the enzyme unit of alcalase is 3 times higher than nutrase, which can contribute to more efficiently protein cleavage.

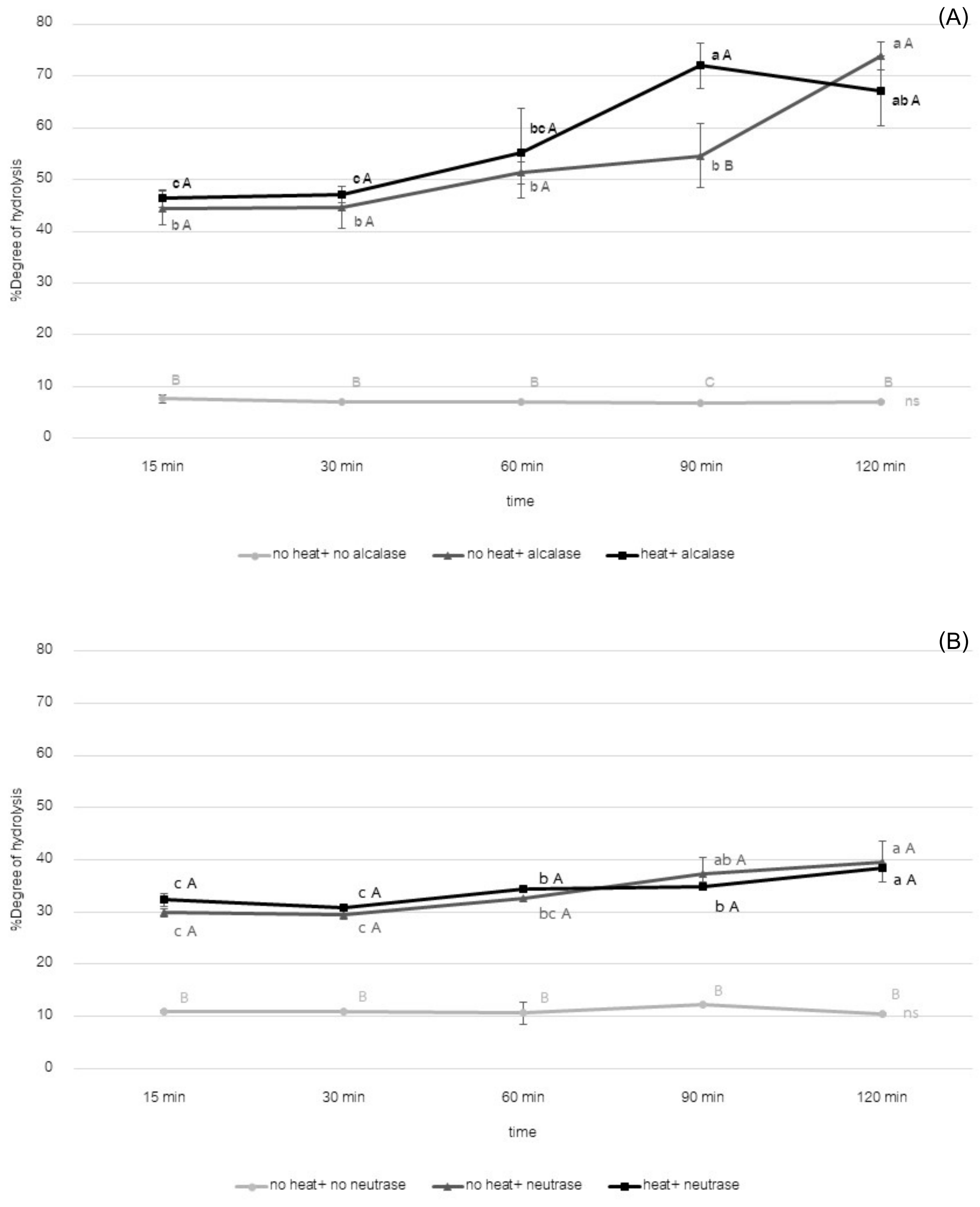


Fig. 1 Effect of heat treatment and enzymatic hydrolysis using (A) alcalase and (B) neutrase on %degree of hydrolysis (%DH). Values are means ± standard deviation of replications. The degree of hydrolysis measurement was performed using two independent x two technical replicates of each treatment (*n* = 4).

[A-E]Different superscripts in vertical values indicate significantly different ($p \leq 0.05$)

[a-b]Different superscripts in horizontal values indicate significantly different ($p \leq 0.05$)

As indicated by Hall et al. (2018) that protein hydrolysate with %DH > 50 showed great biological properties and lower allergenicity. Therefore, in this study, samples with %DH > 50 were selected to study protein molecular weight profile. These samples are heat + alcalase at 60, 90, and 120 minutes, no heat + alcalase at 60, 90, and 120 minutes. Among all selected samples, the highest %DH was observed at no heat+ alcalase for 120 minutes (73.88±2.71[a]), heat + alcalase for 90 minutes (71.96±4.33[ab]), and 120 minutes (67.18±6.77[b]), respectively.

SDS-PAGE.

SDS-PAGE protein profile showed several bands ranging from 10 to 250 kDa in the control sample (no heat + no alcalase) at the digestion time of 60, 90, and 120 minutes (Fig. 2), indicating no protein digestion occurred. Most protein bands were absent in the samples after alcalase hydrolysis, in which mostly protein molecular weight below 10-15 kDa could be visible due to successful enzymatic hydrolysis. In accordance with Hall and Liceaga (2020), after cricket protein was hydrolysed with alcalase, the size of protein was observed below 6 kDa. The main allergenic protein in cricket is tropomyosin with the size of 37 kDa (Hall and Liceaga, 2021) The tropomyosin band is evidence visible in all control treatments; no heat+no enzyme at 60, 90, and 120 minutes of digesting time. Alcalase hydrolysis after 60 minutes could make the tropomyosin band became invisible, which can be implied the possible reduction of allergenicity. However, further allergenicity test, for example, ELISA or western blot should be further done to obtain the definite conclusion.

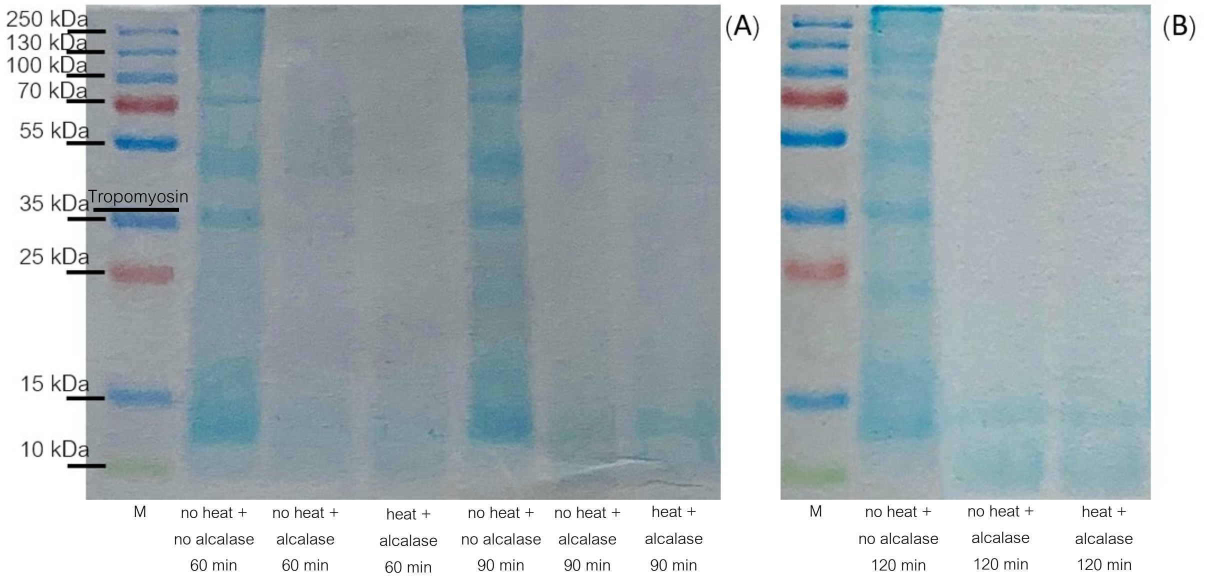


Fig. 2 Molecular weight distribution of cricket protein hydrolysate including controls (no heat + no alcalase) and alcalase treatments for (A) 60, 90, and (B) 120 minutes. (M; Molecular weight marker)

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgment

We would like to sincerely thank to "Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI) (Grant No. FF(KU) 7.64)" for financial support throughout the research process and "the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University" for providing us with academic presentation scholarship.

References

Alu'datt, M.H., Ereifej, H., Abu-Zaiton, A., Alrababah, M., Almajwal, A., Rababah, T., Yang, W. 2012. AntiOxidant, Anti-Diabetic, and Anti-Hypertensive effects of extracted phenolics and hydrolyzed peptides from barley protein fractions, Int. J. Food Prop. 15: 781–795. doi.org/10.1080/10942912.2010.503357.

Aspevik, T., Egede-Nissen, H., Oterhals, A. 2016. A Systematic Approach to the Comparison of Cost Efficiency of Endopeptidases for the Hydrolysis of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) By-Products. Food Technol. Biotechnol. 54: 421–431.

Brogan, E. N., Park, Y.-L., Matak, K. E., Jaczynski, J. 2021. Characterization of protein in cricket (*Acheta domesticus*), locust (*Locusta migratoria*), and silkworm pupae (*Bombyxmori*) insect powders. LWT - J. Food Sci. Technol. 152: 1–7.

Choi, B. D., Wong, N. A. K., Auh, J. H. 2017. Defatting and Sonication Enhances Protein Extraction from Edible Insects. Korean J Food Sci Anim Resour. 37: 955–961. doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.6.955.

Hall, F. G., Jones, O. G., O'Haire, M. E., Liceaga, A. M. 2017. Functional properties of tropical banded cricket (*Gryllodes sigillatus*) protein hydrolysates. Food Chem. 224: 414-422.

Hall, F., Johnson, P. E., Liceaga, A. 2018. Effect of enzymatic hydrolysis on bioactive properties and allergenicity of cricket *(Gryllodes sigillatus)* protein. Food Chem. 262: 39–47.

Hall, F., Liceaga, A. 2020. Effect of microwave-assisted enzymatic hydrolysis of cricket (*Gryllodes sigillatus*) protein on ACE and DPP-IV inhibition and tropomyosin-IgG binding. J. Funct. Foods. 64: 103634. doi.org/10.1016/j.jff.2019.103634.

Hall, F., Liceaga, A. 2021. Isolation and proteomic characterization of tropomyosin extracted from edible insect protein. Food Chem: Molecular Sciences. 3: 100049. doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100049.

Kim, T.K., Yong, H.I., Kim, Y.B., Kim, H.W., Choi, Y.S. 2019. Edible insects as a protein source: A review of public perception, processing technology, and research trends. Food Sci. Anim. Resour. 39: 521–540.

Koseckova, P., Zverina, O., Pechova, M., Krulikova, M., Duborska, E., Borkovcova, M. 2022. Mineral profile of cricket powders, some edible insect species, and their implication for gastronomy. J. Food Compos. Anal. 107: 1–7. doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104340.

Nielsen, P.M. 2010. Enzymes in protein modification. In Enzymes in Food Technology, In: Robert, W. J., Oort, M. V. (Eds.). IA: Wiley-Blackwell. pp. 292–319.

Purschke, B., Meinlschmidt, P., Horn, C., Rieder, O., Jäger, H. 2018. Improvement of techno-functional properties of edible insect protein from migratory locust by enzymatic hydrolysis. Eur. Food Res. Technol. 244: 999–1013.

Tan, Y.N., Chin, Y.L., Chen, W.N. 2021. Comparison of Sustainable Lipid and Protein Removal Methods for the Isolation of Insect Chitin from Black Soldier Fly Exoskeleton. Food Sci. Technol. 1: 698–706. doi.org/10.1021/acsfoodscitech.0c00104.

United Nations. 2019. World population prospects 2019: Highlights. Switzerland. https://www.un.org/devel opment/desa/
publications/world-population-prospects-2019-highlights.html. 2 December 2022.

Van Huis, A., Van Itterbeek, J., Klunder, H., Est her, M., Afton, H., Giulia, M., Paul, V. 2013. Edible insects: future prospects for food and feed security. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Italy.

Optimum use of nitrite on the qualities and residual nitrite in emulsion-type sausage with different fat contents

Supapich Somboonying[a], Pitiporn Ritthiruangdej[b], Kanithaporn Vangnai[a,*]

[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kanithaporn.v@ku.th

Abstract

Fat contents of emulsified sausage may vary based on the manufacturer's formula, the proposes of the cost-reduction, and consumers' health concerns. Nitrite is used as an additive in meat products for the effects of reddening, preservatives, and antioxidants. High nitrite intake is well known to cause various adverse health effects for humans. Thus, nitrite levels should be optimally used in the sausage to obtain the desired product qualities and safety. Therefore, this research aims to investigate the effects of ingoing nitrite used (0, 80, 125, 250, and 375 ppm) in emulsion-type chicken sausage with 5% and 15% fat contents on their qualities and residual nitrite in the final products. Lower cooking loss and moisture were observed in 15% fat sausage. Our results confirmed that at similar ingoing nitrite levels (125-250 ppm), the residual nitrite levels in 15% fat sausages were significantly higher than those of 5% fat sausages up to 14 ppm. Therefore, lower ingoing nitrite levels must be considered to formulate higher fat sausage to obtain consumer safety.

Keywords: chicken sausage, fat, nitrite, safety

Introduction

Sausage is a meat product that is consumed in Thailand and worldwide. The fat content of sausage varies widely, ranging from 10-30% (Lu et al., 2021; Zhao et al., 2018). Sausages with high-fat content may result from manufacturers dealing with rising meat prices; one simple cost-cutting solution is lower lean meat content while increasing the fat content in the formula. On the other hand, sausage with low-fat content may reflect the efforts of the industry to produce lower-fat products to serve consumers concerned about their health. Several sausage manufacturers put effort into increasing the protein by adding lean meat and lower fat to produce more healthy sausage.

Nitrite, especially sodium nitrite, is a food additive commonly added to cured meat products. When nitrite enters the meat system, some may react with meat compositions (protein, myoglobin, and fat), creating the unique pink color and flavor of the cured meat products. At the same time, some nitrite may change to nitrate and nitrogen gas. The remaining nitrite in the final products is called residual nitrite, which plays an essential role as the antimicrobial and antioxidant to make the products safe and preserve from microbial spoilage and lipid oxidation during storage (Alahakoon et al., 2015; Sindelar and Milkowski, 2011). However, excessive residual nitrite in cured meat products brings safety concerns because high nitrite intake can interfere with the oxygen transport system in the human body. Also, this remaining nitrite could be reacted with amines and free amino acids, forming carcinogenic nitrosamines when applied to cured meat at high cooking temperatures. Therefore, using the optimal amount of nitrite is a critical success in controlling the quality and safety of cured meat products (Huang et al., 2020).

Until now, there is still a lack of information to recommend a suitable amount of nitrite based on the sausage formulation that varies the contents of lean meat and fat. Therefore, this research aims to investigate the effects of ingoing nitrite used (0, 80, 125, 250, and 375 ppm) in emulsion-type chicken sausage with 5% fat (95% lean meat) and 15% fat (85% lean meat) on their qualities and residual nitrite in the final products. The results from this study could be used as guidelines to recommend the suitability of using the ingoing nitrite in the sausage with the difference in lean meat and fat contents to support the safe use of nitrite to obtain the desired product qualities and safety.

Materials and Methods

Preparation of Emulsion-Type Sausage

The sausage was prepared with two different formulations: lean chicken breast meat and pork fat, with 5% fat sausages (95% lean meat) and 15% fat sausages (85% lean meat). Other ingredients were added based on manufactured practices, including salt, sodium tripolyphosphate, sucrose, monosodium glutamate, and ice. Five levels of ingoing sodium nitrite: 0, 80, 125, 250, and 375 ppm with comparable to 0, 53, 83, 167, and 250 ppm as nitrite ion (NO_2^-) were added in both 5% and 15% fat sausages which the formulations as shown in Table 1.

The sausage in each formulation batter was prepared in a silent cutter (Mainca, Spain) and stuffed into a 24-mm diameter collagen casing (PTK solution and supplies, Thailand). Then the prepared sausage was cooked in a smoke chamber (Kerres, Germany) at 65-77 °C until the internal temperature reached 72 °C. The cooked sausages were immediately cooled down. The cooking yield was determined in the cooking step of manufacturing sausages from the weight of sausages stuffed with meat batter before and after cooking. The percentage of cooking yield was calculated using the following formula: Cooking yield (%) = (Cooked sample weight / Raw sample weight) x 100. The moisture content and residual nitrite of each sample were determined by the following methods.

Table 1 Formulation of 5% fat (95% lean meat) and 15% fat (85% lean meat) sausages

Ingredients	5% fat sausages (95% lean meat)	15% fat sausages (85% lean meat)
Chicken breast (lean meat)	2,850 g	2,550 g
Pork backfat (fat)	150 g	450 g
Sodium nitrite	0, 80, 125, 250, 375 ppm	0, 80, 125, 250, 375 ppm
Salt	50 g	50 g
Sodium tripolyphosphate	7.5 g	7.5 g
Sucrose	50 g	50 g
Monosodium glutamate	10 g	10 g
Ice	500 g	500 g

Moisture Content

The moisture of sausage samples was determined using the AOAC method (2019). The oven-drying method determined the moisture content at 105 °C. The cooked sausage samples were ground to obtain the homogenized sample. The approximately 3 grams of ground sample were added into an aluminum can. Then, dried the sample in the hot air oven for 18 hours. After that, collected the sample and cooled down for 30 minutes before weighing the dried sample.

Residual Nitrite

Homogenous five grams of sausage sample were used to extract the nitrite with 25 mL hot water (60 °C) and add 25 mL of acetonitrile to eliminate the interference. Then, fill about 1.5 mL of extraction through the nylon syringe filter (0.2 μm). The mixture of acetonitrile and lithium borate gluconate buffer was used as a mobile phase. HPLC with an ion-exchange column and HPLC-diode array detector was used to detect nitrate and nitrite at 205 nm. The method for analyzing residual nitrite was validated, and the limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) were 0.27 ppm and 0.89 ppm, respectively. Furthermore, the recovery ranged from 82-93%, which was acceptable according to AOAC laboratory validation guidelines (DMSC, 2014).

Statistical Analysis

In this study, a completely randomized design was applied as the experimental design. The experiment was conducted in duplicate. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA) with Duncan's multiple range test using IBM SPSS Statistics software to determine differences of means with significance decided at the 95% confidence level ($p < 0.05$). An independent two-sample t-test ($p < 0.05$) was used at each sodium nitrite level to compare the sausage samples with different ratios of lean meat and backfat.

Result and Discussion

Fig. 1 and 2 show the appearance of the surface and interior of sausage samples with 5% and 15% fat added with five nitrite levels. The surface color of all sausage samples was not different and appeared similar to the brownish-dark orange of commonly smoked sausages. This surface color is associated with the pyrolysis of wood compositions for the occurrence of caramelization and Maillard reactions during the smoking step (Malarut and Vangnai, 2018). The addition of different nitrite levels did not affect the surface color of the sausage samples. For the interior color of smoked sausages, as shown in Fig. 1, sausage samples with 5% fat (95% lean meat) and 15% fat (85% lean meat) treated with 250 and 375 ppm nitrite appear slightly pinker than other samples at both fat levels. During the processing, the existing nitrite is converted to nitric oxide and reacts with myoglobin and metmyoglobin to produce a stable cured pink color in cooked sausages; with this higher added nitrite, pinker interior color can be expected (AMSA, 2012). However, the fat levels did not affect the surface and interior colors of the sausage samples.

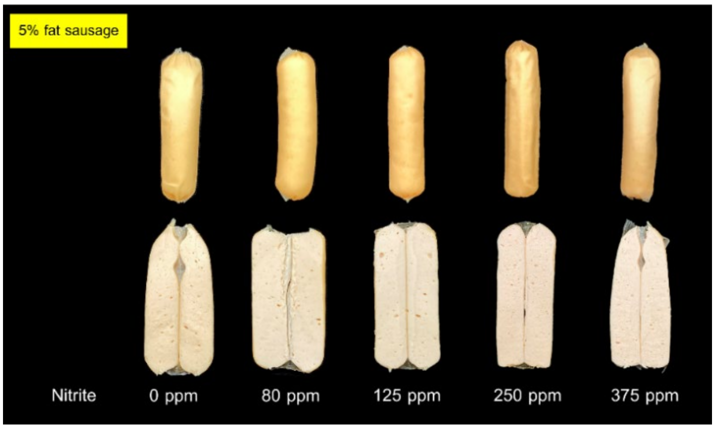


Fig. 1 Photographs of surface and interior colors of 5% fat sausages with five different nitrite levels

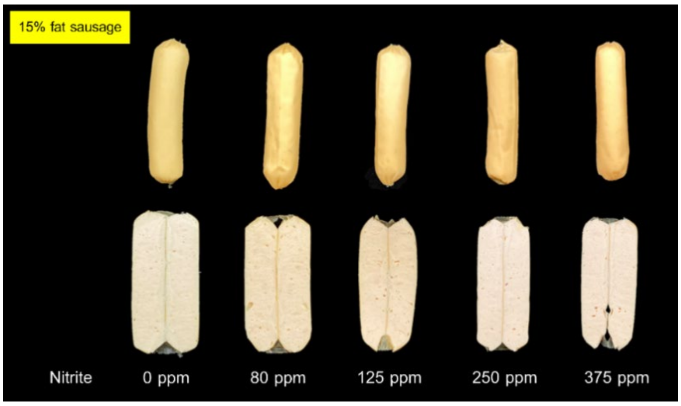


Fig. 2 Photographs of surface and interior colors of 15% fat sausages with five different nitrite levels

The cooking yield is closely related to the consumer's preference for the sausage quality. Table 2 shows no significant interactions between the nitrite levels and cooking yield observed among all treatments. Fat reduction from 15% to 5% caused a significantly reduced cooking yield at a similar nitrite level (0-250 ppm). Fat is the critical component to obtaining the stable structure of emulsion-type sausages. Higher fat content may result in more emulsion stability than lower fat content, resulting in good captures of water stably bound in a meat emulsion system and higher cooking yields of the samples (Jung et al., 2022). A similar result was reported by Li et al. (2022), who observed that the cooking yield of emulsion-type sausage significantly reduced with the reduction of fat contents in sausage formulations. The scanning electron microscopic image confirmed their result that the reduced fat emulsion-type sausage exhibited larger porous structures compared with the full fat emulsion-type sausages. The reduced water-holding capacity of reduced fat emulsion-type sausages due to their poor network structure resulted in more cooking loss. The increase in cooking loss means a decrease in cooking yield, which is conducive to the expansion of the sausage industry. However, no difference in cooking yield between 15% fat sausages (85% lean meat) and 5% fat sausages (95% lean meat) at the nitrite level of 375 ppm; the reason is still unknown.

Table 2 Cooking yield (%) of 5 and 15% fat sausages with five different nitrite levels

	5% fat sausages (95% lean meat)	15% fat sausages (85% lean meat)
0 ppm	90.83 ± 0.36^{Ab}	92.38 ± 0.25^{Aa}
80 ppm	90.41 ± 0.08^{Ab}	92.14 ± 0.03^{Ba}
125 ppm	88.32 ± 0.46^{Bb}	91.82 ± 0.22^{Ba}
250 ppm	88.29 ± 0.45^{Bb}	92.62 ± 0.09^{Aa}
375 ppm^{ns}	89.94 ± 0.91^{A}	90.92 ± 0.23^{C}

Each value represents the mean±SD

^{ns}No statistically significant differences were detected among treatments ($p > 0.05$)

$^{A-C}$Different superscripts in the same column indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

$^{a-b}$Different superscripts in the same row indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

The moisture content of sausage samples is shown in Table 3; sausages with 15% fat at every level of ingoing nitrite have significantly lower moisture content than the sausages with 5% fat ($p \leq 0.05$). These results may be attributed to the higher proportion of lean chicken breast meat in the 5% fat sausages formulation. Lean chicken breast meat has been reported as having a water content of approximately 77% (w/w), which is much higher than the water content in pork back fat (17%, w/w) (Domínguez-Niño et al., 2020; Yum et al., 2005).

Table 3 Moisture content (%) of 5 and 15% fat sausages with five different nitrite levels

	5% fat sausages (95% lean meat)	15% fat sausages (85% lean meat)
0 ppm	70.75 ± 0.16^{Aa}	63.40 ± 0.11^{Bb}
80 ppm	70.50 ± 0.57^{Aa}	64.52 ± 0.49^{Ab}
125 ppm	69.89 ± 0.22^{Ba}	64.35 ± 0.31^{Ab}
250 ppm	69.74 ± 0.11^{Ba}	63.87 ± 1.05^{ABb}
375 ppm	69.59 ± 0.67^{Ba}	63.87 ± 0.55^{ABb}

Each value represents the mean±SD

$^{A-B}$Different superscripts in the same column indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

$^{a-b}$Different superscripts in the same row indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

The residual nitrite of 5% and 15% fat sausages with five different nitrite levels are presented in Table 4. More than 60% of the nitrite ion (NO_2^-) was decreased during the processing in all applied treatments. In addition, increased levels of ingoing nitrite from 0 to 375 ppm caused significant increases in the residual nitrite in both 5% and 15% fat sausages.

Nitrite reduction occurs because it primarily reacts with the meat composition when it enters the meat system, particularly the protein and fat, which account for approximately 30% and 5%, respectively. It can also be a residue for 20% (Alahakoon et al., 2015). However, there was no significant difference in residual nitrite between 5% and 15% fat sausages at the excessive nitrite level of 375 ppm. At this level, the finished product with 5% and 15% fat showed the residual nitrite levels were above the safety level (80 ppm) regulated by Notification of the ministry of public health no. 418 B.E.2563. Although, there are significant increases of residue nitrite in both 5% and 15% fat sausages when increase level of ingoing nitrite but interestingly, the 5% fat (95% lean chicken) sausages show significantly lower residual nitrite than the 15% fat (85% lean chicken meat) sausage. This could be due to the proportion of protein in lean meat of 5% fat sausages that was higher than 15% fat sausages for approximately 2% (w/w) (USDA, 2019). The high proportion of protein in lean meat contributes to the main components that can react with nitrite during the processing, leading to the lower residual nitrite in the finished products compared with the 15% fat sausage.

Table 4 Residual nitrite of 5 and 15% fat sausages with five different nitrite levels

Ingoing Sodium nitrite	Ingoing Nitrite ion (NO_2^-)	5% fat sausages (95% lean meat)	15% fat sausages (85% lean meat)
0 ppm^{ns}	0 ppm	n.d.	n.d.
80 ppm^{ns}	53 ppm	18.26±3.70^{D} (34.45%)	21.66±0.84^{D} (40.87%)
125 ppm	83 ppm	28.90±0.87^{Cb} (34.82%)	36.12±2.71^{Ca} (43.52%)
250 ppm	167 ppm	62.61±1.98^{Bb} (37.49%)	73.63±5.36^{Ba} (44.09%)
375 ppm^{ns}	250 ppm	95.60±6.27^{A} (38.24%)	93.25±3.37^{A} (37.30%)

Each value represents the mean±SD

Residual nitrite (NO_2^- , ppm) represents as mean±S.D. (%residual nitrite ions compared to the ingoing levels)

^{ns} No statistically significant differences were detected among treatments ($p > 0.05$)

$^{A-E}$ Different superscripts in the same column indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

$^{a-b}$ Different superscripts in the same row indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

In conclusion, the proportion of lean meat and fat content in each sausage formulation influenced both product quality and safety. Due to the addition of fat (lower lean meat), 15% fat sausages tend to have higher cooking yield and residual nitrite but have lower moisture content compared to 5% fat sausages. Moreover, the excessive ingoing nitrite caused residual nitrite levels above the safety level (80 ppm). As a result, in high-fat sausages, the product quality, the amount of nitrite added, and the remaining amount of nitrite must all be balanced. Lower ingoing nitrite levels must be considered to formulate higher fat sausage to obtain consumer safety. However, further studies are required to provide the most comprehensive data by adding up the nitrite range and studying the final product's safety and quality during storage.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgment

This study was financially supported by Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), FF (KU) 6.65, Kasetsart University, Thailand. We are also grateful to the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, for awarding us an academic presentation.

References

Alahakoon, A. U., Jayasena, D. D., Ramachandra, S., Jo, C. 2015. Alternatives to nitrite in processed meat: Up to date. Trends in Food Science & Technology. 45: 37-49. doi.org/10.1016/j.tifs.2015.05.008

AMSA. 2012. Meat Color Measurement Guidelines. American Meat Science Association. Champaign, Illinois, USA.

DMSC. 2014. Standard methods for food analysis, volume ii. National Office of Buddhism, Bangkok, Thailand.

Domínguez-Niño, A., Lucho-Gómez, A. M., Pilatowsky-Figueroa, I., López-Vidaña, E. C., Castillo- Téllez, B., García-Valladares, O., 2020. Experimental study of the dehydration kinetics of chicken breast meat

and its influence on the physicochemical properties. CYTA - J. Food. 18(1): 508–517. doi.org/10.1080/19476337.2020.1791961

Huang, L., Zeng, X., Sun, Z., Wu, A., He, J., Dang, Y., Pan, D. 2020. Production of a safe cured meat with low residual nitrite using nitrite substitutes. Meat Sci. 162: 1–9. doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108027

Jung, D.Y., Lee, H.J., Shin, D., Kim, C.H., Jo, C. 2022. Mechanism of improving emulsion stability of emulsion-type sausage with oyster mushroom (Pleurotus ostreatus) powder as a phosphate replacement. Meat Sci. 194: 1–11. doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108993

Li, X.L., Meng, R., Xu, B.C., Zhang, B., Cui, B., Wu, Z.Z. 2022. Function emulsion gels prepared with carrageenan and zein/carboxymethyl dextrin stabilized emulsion as a new fat replacer in sausages. Food Chem. 389: 1–7. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133005

Lu, Y., Cao, J., Zhou, C., He, J., Sun, Y., Xia, Q., Pan, D. 2021. The technological and nutritional advantages of emulsified sausages with partial back-fat replacement by succinylated chicken liver protein and pre-emulsified sunflower oil. LWT – Food Sci. Technol. 149: 1–9. doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111824

Malarut, J., Vangnai, K. 2018. Influence of wood types on quality and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of smoked sausages. Food Control. 85: 98–106. doi.org/10.1016/ j.foodcont.2017.09.020

MOPH. 2020. Notification of the ministry of public health (no.418) B.E.2563. https://food.fda.moph.go.th/law/ data/announ_moph/P418.pdf, November 18, 2022.

Sengboontan, P., Vangnai, K. 2021. Risk assessment and the production of cured meat products with low residual nitrite. M.Sc. thesis, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Sindelar, J.J. and L. Milkowski. 2011. Sodium Nitrite in Processed Meat and Poultry Meats: A Review of Curing and Examining the Risk/Benefit of Its Use. American Meat Science Association. 3: 1–6.

USDA. 2019. Chicken, broiler or fryers, breast, skinless, boneless, meat only, cooked, braised. https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/331960/nutrients, November 18, 2022.

Warner, R. D. 2017. Lawrie's Meat Science, 8th ed. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Sawston, Cambridge.

Yum, H.W., Seo, J.K., Jeong, J.Y., Kim, G.D., Rahman, M.S., Yang, H.S. 2018. The Quality Improvement of Emulsion-type Pork Sausages Formulated by Substituting Pork Back fat with Rice Bran Oil. Food Sci Anim Resour. 38(1): 123–134. doi.org/10.5851/kosfa.2018.38.1.123

Zhao, Y., Hou, Q., Zhuang, X., Wang, Y., Zhou, G., Zhang, W. 2018. Effect of regenerated cellulose fiber on the physicochemical properties and sensory characteristics of fat-reduced emulsified sausage. LWT - Food Sci Technol. 97: 157-163. doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.053

Effect of nitrite levels on safety and qualities in Nham (Thai fermented pork sausage) during fermentation

Pimwaree Charoensin[a], Pitiporn Ritthiruangdej[b], Kanithaporn Vangnai[a,*]
[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: kanithaporn.v@ku.th

Abstract

Nitrite is a multipurpose additive in meat products for the effects of reddening, preservatives, and antioxidants. However, the over-intake of nitrite from processed meat products is of concern due to their toxicological effects. Optimal ingoing nitrite levels must be carefully considered to obtain the desired product qualities and safety. This study investigated the effect of various ingoing nitrite levels (0, 80, 125, and 250 mg/kg) on Nham's residual nitrite, pH, and color values during the 3-day fermentation. The pH of Nham in all nitrite levels gradually decreased and reached the pH of 4.3-4.5 at the final fermentation stage. Residual nitrite in Nham was significantly decreased during the fermentation. At 0-day fermentation, residual nitrite in Nham obtained the values of 11.4, 24.3, and 46.1 mg/kg for samples with ingoing nitrite levels of 80, 125, and 250 mg/kg, respectively. After 2-day fermentation, the residual nitrite in all samples was rapidly decreased until the not detectable level at the final fermentation stage. Our results suggested that the optimal ingoing nitrite levels could be used up to 250 mg/kg to obtain the desirable qualities of Nham with no safety concerns on the residual nitrite in the final products.

Keywords: fermentation, Nham, nitrite, safety, Thai-fermented sausage

Introduction

Nham is a traditional Thai fermented pork sausage popularly for its unique texture, flavor, and taste. The main ingredients include fresh minced pork, pork rind, cooked rice, garlic, seasonings, salt, sugar, and sodium nitrite (DLD, 2019). Nham production is processed by tightly packing into cylindrical plastic bags, excluding air, and fermented at room temperature for 3–4 days without further ripening. At the end of the fermentation period, Nham commonly has a pH of 4.4–4.8. Nham is commonly consumed uncooked, and to ensure the safety of Nham from survival and growth of some pathogenic microorganisms naturally contaminated in raw pork meat; it is recommended that Nham must be fermented until pH $\leq$ 4.6 (Santiyanont et al., 2019). The initial flora of Nham derives mainly from the raw materials and sometimes starter culture, which primarily involves the successive dominated growth by Lactic acid bacteria (Tanasupawat and Komagata, 1995).

Nitrite as sodium- or potassium-nitrite is a food additive commonly added in cured meat, including Nham to provide a desirable cured meat color, cured flavor, antioxidant activity, and antimicrobial, especially *Clostridium botulinum* (AMSA, 2011). The common mechanism of nitrite is that it can be converted to nitrous acid under acidic conditions and decomposes to nitric oxide. Then, nitric oxide binds to the iron ion of myoglobin and forms nitrosylmyoglobin, which turns bright red in meat products (Govari and Pexara, 2015). However, residual nitrite in the finished product is a safety concern due to exposure to a high level of the residues causing both acute and long-term health effects, including methemoglobinemia and cancer. In January 2022, Thailand suffered from outbreaks of excessive nitrite concentrations in cured sausages up to 3,700 mg/kg, resulting in methemoglobinemia found in 8 cases (Sangsawang et al., 2022). Whereas the notification of the ministry of public health determines residual nitrite does not exceed 80 mg/kg in processed meat products (MOPH, 2020). Furthermore, excessive amounts of residual nitrite in cured products could further react with amines and free amino acids to form carcinogenic nitrosamines, which can be occurred easily at low pH. Therefore, controlling the suitable nitrite level is the key to providing desirable qualities and safety to consumers (Sallan et al., 2020).

Efforts have been primarily directed at studying the perfect starter culture to produce and control to obtain high-quality Nham. To our knowledge, there is still a lack of knowledge on how to use nitrite in Nham suitably. The guidelines on the addition of nitrite in Nham and other fermented meat products are urgently needed to provide products with good quality and safety to consumers. Therefore, our study aimed to investigate the optimal ingoing nitrite levels for manufacturing Nham on the qualities and monitor the nitrite changes during fermentation.

Materials and Methods

Preparation of Nham

Nham was prepared according to the method of the Department of Livestock Development (DLD, 2019). Briefly, minced pork (53%), pork rind (35%), rice (4.5%), garlic (4.5%), sodium chloride (2%), sucrose

(0.4%), sodium tripolyphosphate (0.2%), sodium erythorbate (0.2%), and sodium nitrite were mixed for 30 min. Four levels of added sodium nitrite were varied (0, 80, 125, and 250 mg/kg). After mixing, the batter was stuffed into a plastic casing with a diameter of 24 mm, sealed tightly, and fermented at 30 ºC for 72 hours. Samples were taken during fermentation to analyze pH, color values, and residual nitrite.

Determination of pH

Sample 5 g was homogenized in 50 mL of distilled water and measured pH by using a pH meter and calibration with a standard buffer containing pH 4.0, 7.0, and 10.0 (Visessanguan et al., 2004).

Color evaluation

The color of the samples was measured by HunterLab colorimeter in the mode of CIE. D65 illuminant at 10º observation was used to detect lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*). The color was recorded on the surface of the sample at three random points (Visessanguan et al., 2006).

Residual nitrite determination by HPLC-DAD

Five grams of homogenized sample was used to residual nitrite extract by 25 mL of hot water (60 ºC) for 10 min and remove the interference by 25 mL of acetonitrile. After cooling the solution to room temperature, the solution was filtered through a Whatman paper No.1 into a 200 mL-volumetric flask and adjusted to the volume. Then, fill in the vial through nylon syringe filters (0.2 µm). Nitrite was detected by ion-exchange chromatography with a diode array detector (205 nm), and the 2.0 mL/min flow rate of the borate-gluconate buffer is a mobile phase following the standard method of the Department of Medical Science (DMSC, 2014). The validation of the analytical method was performed. The limit of detection (LOD) and the limit of quantification (LOQ) were 0.27 mg/kg and 0.89 mg/kg, respectively. According to AOAC recommendations for laboratory validation, the recovery was acceptable and ranged from 82 to 93% (AOAC, 2016).

Experimental design and statistical analyses

The experiment design, a randomized completely block design was applied in this study. The experiment was produced in duplicates. IBM SPSS Statistics software was used to analyze the analysis of variance (ANOVA) and compare means using Duncan's multiple range test at the 95% confidence level ($p < 0.05$).

Result and Discussion

Fig. 1 shows the pH values of Nham during the 72-h fermentation at four different ingoing sodium nitrite levels (0, 80, 125, and 250 mg/kg). The pH of all samples generally decreased with increasing fermentation time. A rapid pH decrease during the fermentation at 18 hours was probably due to an increased accumulation

of organic acid, mainly lactic acid produced by Lactic acid bacteria. After that, the pH of all Nham samples continued to decrease as fermentation time increased. However, when Nham samples reached pH 4.6 at 24-h fermentation, the pH values were not much changed with the increasing fermentation time; this could be due to the lactobacilli, which is the primary producer of lactic acid responsible for the decrease in pH during the fermentation had already reached their late exponential phase at pH 4.6 (Rojsuntornkitti et al., 2010). Our results here is supported by Visessanguan et al. (2004), who suggested that during the first stage of fermentation, the growth of pediococci (*P. acidilactici, and P. pentosaceus*) provides a pH of 5.9–6.3, which results in the subsequent growth of lactobacilli (*L. plantarum, L. pentosus,* and *L. sake*) reduce the pH to 4.4–4.6 and produce a sour taste.

Our result here also shows that the changes in pH of Nham with the addition of nitrite at 0, 80, and 125 mg/kg were very similar throughout the fermentation process, except for the treatment with the highest nitrite (250 mg/kg), showed higher pH values, especially during 18-24 h fermentation. This occurrence could be related to the nitrite inhibiting the growth of Lactic acid bacteria at high nitrite levels. The sensitivity of heterofermentative lactic acid bacteria to sodium nitrite was also observed by Korkeala et al. (1992), who found that high levels of sodium nitrite with existing salt could potentially inhibit the growth of Lactic acid bacteria, especially Leuconostocs.

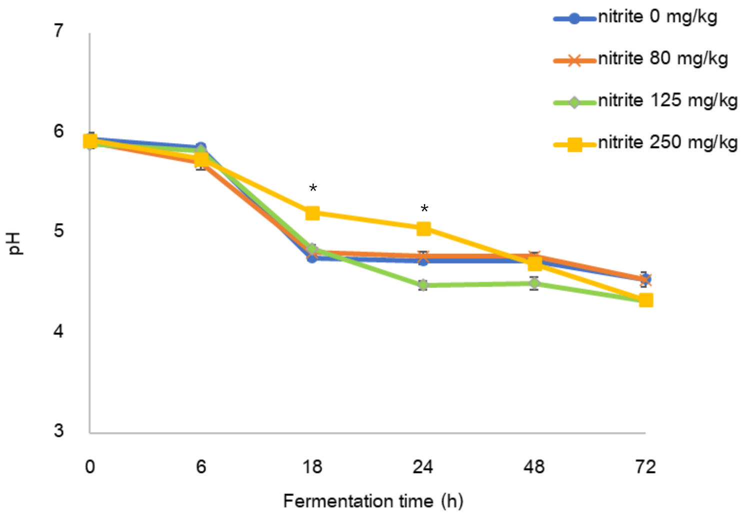


Fig. 1 pH of Nham during 72h-fermentation at different ingoing nitrites

*Indicate the significant differences at the same fermentation time ($p < 0.05$)

The interior appearance of Nham is shown in Fig. 2. When the fermentation time increased, Nham had a more rigid and elastic texture in all samples. The change of texture occurs during fermentation when the pH is decreased, resulting in acid coagulation or acid-induced gelation that affects muscle protein denature and forms aggregates (Visessanguan et al., 2006). In addition, the observed color of Nham is clearly different between Nham treated and untreated with nitrite, which describes in Table 1.

For the color values of Nham samples during the fermentation, L* values (lightness) were increased when fermentation time increased and had the highest values at 72-h fermentation of all samples. The a* values (redness) were increased to a maximum at 24-h fermentation for Nham with ingoing nitrite levels (80, 125, and 250 mg/kg) due to it providing the bright red color of meat products through the reaction with myoglobin and forming nitrosylmyoglobin (NOMb). This was agreed with Visessanguan et al. (2004) who reported redness of Nham is caused by NOMb, before a slight decrease thereafter. However, there was no significant difference of a* values among the three different nitrite levels.

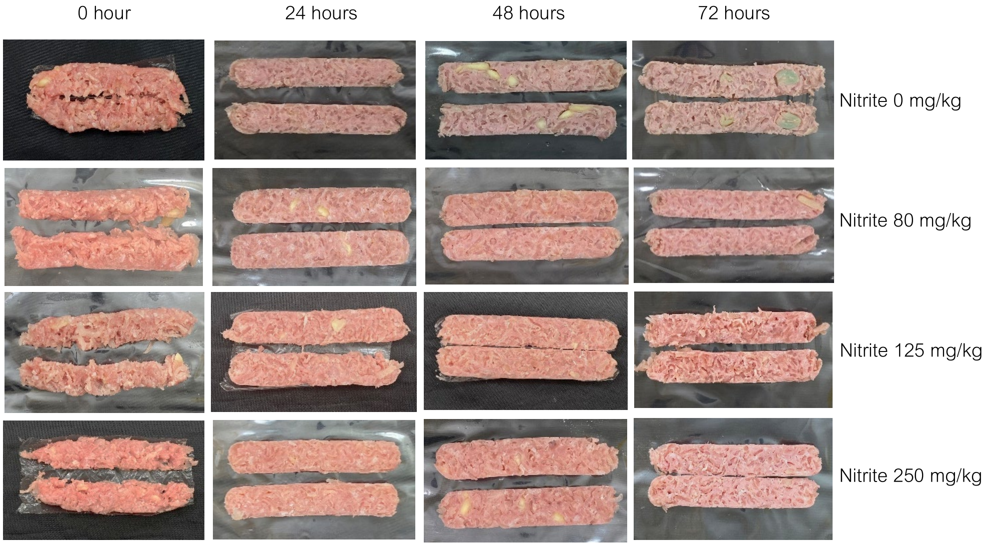


Fig. 2 Interior appearance of Nham during 72h-fermentation at different ingoing nitrites

Table 1 Color values (L*a*b*) and appearance of Nham during 72h-fermentation at different ingoing nitrites

Ingoing nitrite (mg/kg)	Fermentation time (h)	L*	a*	b*
0	0	50.23±1.76^{bA}	1.77±0.39^{aB}	12.64±1.15^{aA}
	24	60.97±1.02^{aA}	2.49±0.24^{aB}	11.43±0.49^{aA}
	48	59.91±4.74^{aA}	2.46±0.67^{aB}	11.68±1.48^{aA}
	72	63.37±9.06^{aA}	2.60±0.78^{aB}	11.70±2.43^{aA}
80	0	44.70±0.73^{dB}	6.95±0.45^{bA}	12.17±0.85^{aA}
	24	55.86±1.29^{cC}	8.50±0.34^{aA}	8.90±0.58^{bB}
	48	61.86±1.35^{bA}	6.66±0.79^{bA}	7.20±0.60^{cB}
	72	68.02±5.04^{aA}	7.01±0.79^{bA}	7.51±0.73^{cB}
125	0	46.38±1.81^{cB}	7.04±0.89^{abA}	12.05±1.43^{aA}
	24	58.06±0.89^{bB}	8.36±0.31^{aA}	7.98±0.56^{bC}
	48	61.28±2.30^{aA}	6.80±1.25^{bA}	7.42±0.71^{bB}
	72	63.50±3.03^{aA}	7.14±1.16^{abA}	7.15±0.89^{bB}
250	0	45.56±0.53^{cB}	7.75±0.82^{bA}	11.63±0.68^{aA}
	24	55.77±1.56^{bC}	8.95±1.17^{aA}	9.29±0.74^{bB}
	48	60.79±1.22^{aA}	7.29±0.45^{bA}	7.70±0.63^{cB}
	72	61.12±1.21^{aA}	7.19±0.83^{bA}	7.45±0.57^{cB}

$^{a\text{-}d}$indicate significant differences in the same nitrite level ($p < 0.05$)

$^{A\text{-}C}$indicate significant differences in the same fermentation time ($p < 0.05$)

In our study, four levels of ingoing sodium nitrite were added in Nham, including 0 mg/kg, 80 mg/kg (53 mg/kg as nitrite ion), 125 mg/kg (83 mg/kg as nitrite ion), and 250 mg/kg (167 mg/kg as nitrite ion). During the process before fermentation, approximately 70-80% of ingoing nitrite in samples was lost, mainly due to the chemical reactions of nitrite with other meat components, such as protein, myoglobin, and lipid. In addition, nitrite could be lost as nitrogen gas during mixing (Alahakooon et al., 2015). Therefore, at 0-h fermentation, the residual nitrite of 22%, 29%, and 27% remained from the samples with ingoing nitrite levels of 80, 125, and 250 mg/kg, respectively. After 6-h fermentation, the residual nitrite was only detected in the Nham samples with 125 and 250 mg/kg added nitrite samples.

At 18-h fermentation, Nham becomes more acidic; ingoing nitrite was rapidly decreased until not detectable, shown in Fig. 3. The rapid decrease of nitrite during the fermentation process of Nham differs from the emulsion-type sausage in which residual nitrite remained constant during 30-day chilled storage (data not shown). This study agrees with Sallan et al. (2015), who reported that approximately 90% of nitrite was decreased in Sucuk (traditional semi-dry fermented sausage) after 2-days fermentation. Our results obviously confirmed that nitrite presence under acidic conditions, which are produced by Lactic acid bacteria, could readily change to other chemical compounds, especially nitric oxide, or rapidly react with other components in the meat matrix. Furthermore, the metabolism of lactic acid bacteria, including *L. plantarum* produces nitrite reductases, which influence nitrite degradation through nitric acid respiration and form nitrogen gas (Honikel, 2008; Huang et al., 2020).

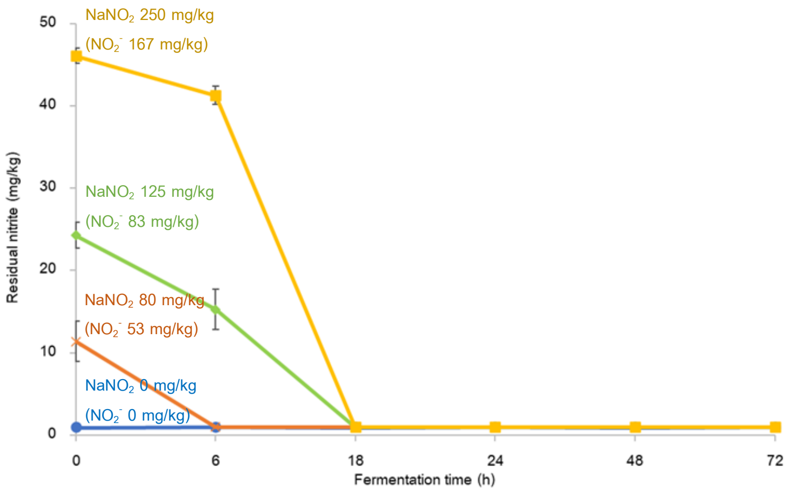


Fig. 3 Residual nitrite in Nham during 72h-fermentation at different ingoing nitrites

In conclusion, the results of the present study indicate that all ingoing nitrite levels (80-250 mg/kg) in Nham provide desired color and appearance qualities. The lowering of the pH of Nham during fermentation resulted in rapidly decreased ingoing nitrite levels, which became undetectable after three days of fermentation. To assure product safety, further research must be conducted on the microbiological safety of the products with varying levels of ingoing nitrite before a recommendation can be made for the meat manufacturing industry.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgments

This research is funded by Kasetsart University through the Graduate School Fellowship Program. We are thankful for the financially supported by Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), FF(KU) 6.65, Kasetsart University, Thailand, and also grateful to the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, for awarding us an academic presentation.

Reference

Alahakoon, A.U., Jayasena, D.D., Ramachandra, S., Jo, C. 2015. Alternatives to nitrite in processed meat: Up to date. Trends Food Sci. Technol. 45: 37–49. doi.org/10.1016/j.tifs.2015.05.008

AMSA. 2011. Sodium nitrite in processed meat and poultry meats: A review of curing and examining therisk/benefit of its use. The United States of America. https://meatscience.org/publicationsresources/white-papers/docs/default-source/publications-resources/white-papers/2011-11-amsanitrite-whitepaper, 01 December 2022.

AOAC. 2016. Appendix f: Guidelines for standard method performance requirements. http://www.eoma.aoac.org/app_f.pdf, 01 December 2022.

DLD. 2019. Meat processing technology: meat production 2019. Thailand. [In Thai]

DMSC. 2014. Standard methods for food analysis, volume ii. National Office of Buddhism. Bangkok, Thailand.http://bqsf.dmsc.moph.go.th/bqsfWeb/wp-content/uploads/2017/Publish/e-book/StandardMethod VolumeII.pdf, 03 September 2022. [In Thai]

Govari, M. Pexara, A. 2015. Nitrates and Nitrites in meat products. J. Hell. Vet. Medical Soc. 66: 127–140.doi.org/10.12681/jhvms.15856

Honikel, K.-O. 2008. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products. Meat Sci.78: 68–76. doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.030

Huang, L., Zeng, X., Sun, Z., Wu, A., He, J., Dang, Y., Pan, D. 2020. Production of a safe cured meat with lowresidual nitrite using nitrite substitutes. Meat Sci. 162: 1–9 doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108027.

Korkeala, H., Alanko, T., Tiusanen, T. 1992. Effect of sodium nitrite and sodium chloride on growth of lactic acidbacteria. Acta Vet Scand. 33: 27–32. doi.org/10.1186/BF03546933

MOPH. 2020. Notification of the ministry of public health (no.418) B.E.2563. Thailand. http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P418.pdf, 03 September 2022.

Rojsuntornkitti, K., Jittrepotch, N., Kongbangkerd, T., Kraboun, K. 2010. Substitution of nitrite by Chinese redbroken rice powder in Thai traditional fermented pork sausage (Nham). Int. Food Res. J. 17: 153–161.

Sallan, S., Kaban, G., Oğraş, Ş.Ş., Çelik, M., Kaya, M. 2020. Nitrosamine formation in a semi-dry fermentedsausage: Effects of nitrite, ascorbate and starter culture and role of cooking. Meat Sci. 159: 1-7.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107917

Sangsawang, C., Chuaydamrong, N., Luankaew, T., Thepparat, T., Leesahud, N. 2022. Investigation of a Methemoglobinemia Outbreak Caused by Eating Sausages with High Concentrations of Nitrates and Nitrites in Trang Province. Outbreak survill. investig. rep. e-j (OSIR). 15: 47–54.

Santiyanont, P., Chantarasakha, K., Tepkasikul, P., Srimarut, Y., Mhuantong, W., Tangphatsornruang, S., Zo,Y.-G., Chokesajjawatee, N. 2019. Dynamics of biogenic amines and bacterial communities in a Thaifermented pork product Nham. Int. Food Res. J. 119: 110–118. doi.org/10.1016/ j.foodres.2019.01.060

Tanasupawat, S., Komagata, K. 1995. Lactic acid bacteria in fermented foods in Thailand. World J MicrobiolBiotechnol. 11: 253–256. doi: 10.1007/BF00367094

Visessanguan, W., Benjakul, S., Riebroy, S., Thepkasikul, P. 2004. Changes in composition and functionalproperties of proteins and their contributions to Nham characteristics. Meat Sci. 66: 579–588.doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00172-4

Visessanguan, W., Benjakul, S., Smitinont, T., Kittikun, C., Thepkasikul, P., Panya, A. 2006. Changes in microbiological, biochemical and physico chemical propertiesn of Nham inoculated with different inoculum levels of Lactobacillus curvatus. LWT - Food Sci. Technol. 39: 814–826. doi.org/10.1016/j.lwt.2005.05.006

ผลของปริมาณสตาร์ชทั้งหมดต่อคุณลักษณะของแผ่นแป้งห่ออาหารที่ผลิตจากข้าวอะไมโลสสูงและถั่วเขียว

Influence of total starch content on characteristics of rice paper produced by high amylose rice and mungbean

ธนิษฐา พัฒนสิงห์, น้ำฝน ลำดับวงศ์*

Tanittha Phatthanasing, Namfone Lumdubwong*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: faginfl@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณและชนิดของสตาร์ชต่อคุณลักษณะทางกายภาพของแผ่นแป้งห่ออาหารจากวัตถุดิบสี่ชนิด: แป้งข้าวเจ้า (RF) แป้งถั่วเขียว (MBF) สตาร์ชข้าวเจ้า (RS) และสตาร์ชถั่วเขียว (MBS) จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง ลักษณะทางกายภาพ ความสามารถในการดูดน้ำกลับและลักษณะเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้ง พบว่าปริมาณสตาร์ชทั้งหมดมีผลต่อคุณสมบัติการพองตัว และการเกิดเจลาติไนเซชัน ชนิดของสตาร์ชมีผลต่อความสามารถในการละลาย ความหนาและความโปร่งใสของแผ่นแป้ง โดยพบว่าค่าความเค้นสูงสุด (TS at peak) ของแผ่นแป้งถั่วเขียวมีค่ามากกว่าข้าวถึงสองเท่า นอกจากนี้ค่า TS ของสตาร์ชสูงกว่าแป้ง 70–100% ปริมาณและชนิดของสตาร์ชไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการดึงยืดของแผ่นแป้ง ($p > 0.05$) โดยเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%E) มีค่าอยู่ที่ 70-73%

คำสำคัญ: ข้าว, ถั่วเขียว, ผลิตภัณฑ์อาหารแบบแผ่นแป้ง, สตาร์ช

Abstract

The objective of the study was to investigate the impact of the starch content and the botanical source on physical characteristics of starch-based food wraps. Food wraps from four different materials; rice flour (RF), mung bean flour (MBF), rice starch (RS), and mung bean starch (MBS) were produced. The chemical compositions and physico-chemical properties of flours and starches were determined. The physical appearance, water uptake, and texture of those wraps were investigated. The results showed the impact of the starch content on swelling power (SP) and gelatinization properties. The solubility was influenced by the botanical source. The thickness and transparency of the dehydrated food wraps were influenced by the interaction between the starch content and the botanical source. It was found that tensile strength at peak (TS) of mung bean wraps was twofold than rice wraps. Further, TS of starch wraps was 70-100% higher than flour wraps. The starch content and the botanical source did not have a significant impact on wrap ductility as the percent of elongation (%E) of the wraps was 70–73%.

Keywords: Mung bean, Rice, Rice paper, Starch

คำนำ

แผ่นแป้งห่ออาหาร เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย โดยผู้บริโภคสามารถจำแนกความแตกต่างของแผ่นแป้งแต่ละชนิดได้จากลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัส ตัวอย่างแผ่นแป้งอาหารที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ แผ่นแป้งเมี่ยง แผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวหลอด แผ่นแป้งเครป และแผ่นฮะเก๋า วิธีการผลิตแผ่นแป้งหลักวิธีหนึ่ง ได้แก่การผสมแป้งกับน้ำ กวนผสมให้เข้ากัน เทน้ำแป้งลงในภาชนะบรรจุ โดยควบคุมความหนาของตัวอย่าง จากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้เกิดเจลาติไนเซชัน และน้ำแป้งเซ็ตตัวเป็นแผ่นเจลบาง (Detchewa et al., 2021) จากนั้นลอกแผ่นแป้งเพื่อบริโภคแบบสด หรือนำแผ่นแป้งดังกล่าวมาทำการอบแห้ง และแช่แผ่นแป้งให้ดูดน้ำกลับก่อนการบริโภคอีกครั้งหนึ่ง ขึ้นอยู่กับประเภทอาหาร โดยปริมาณสตาร์ชและชนิดสตาร์ช เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้งที่เตรียมจากข้าวสาลี ส่งผลให้มีลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสต่างกัน โดยปริมาณสตาร์ชทั้งหมดในแป้งสาลี และสตาร์ช มีค่า 84.1% และ 96.6% ตามลำดับ (Holm et al., 1986) และการผลิตแป้งแหนมเนือง โดยทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าดิบ 0–40%w/w พบว่า การเติมแป้งกล้วยดิบทำให้ความหนืด การคืนตัวของเจล ความเค้นสูงสุด และความเหนียวของแผ่นแป้งสูงขึ้น และทำให้แผ่นแป้งมีความสว่างลดลง (Detchewa et al., 2021) ทั้งนี้ความแตกต่างของลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสของแผ่นห่ออาหารที่เตรียมจากแป้งและสตาร์ชจากพืชชนิดเดียวกัน เกิดจากชนิดและปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีอื่น เช่น โปรตีนและไขมัน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีน/ไขมันกับสตาร์ช ขณะที่ขนาดและรูปร่างเม็ดแป้ง อัตราส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกติน ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ของพืชต่างชนิดกัน ส่งผลให้แผ่นห่ออาหารมีลักษณะต่างกัน ด้วยเหตุดังที่กล่าวมา วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือเพื่อศึกษาผลของปริมาณและชนิดสตาร์ชต่อลักษณะปรากฏ และเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้งห่ออาหาร โดยการนึ่งแป้งและสตาร์ชจากข้าวและถั่วเขียว เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกในการผลิตแผ่นแป้งห่ออาหาร

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบที่ใช้

แป้งข้าวชัยนาท1 (RF) (จากกรมการข้าว, ประเทศไทย), แป้งถั่วเขียว (MBF) ตราไร่ทิพย์ (บริษัท ไร่ธัญญะ จำกัด), สตาร์ชข้าวชัยนาท1 (RS) สกัดตามวิธีการของ Lumdubwong (1996) และสตาร์ชถั่วเขียว (MBS) ตราต้นสน (บริษัท สิทธินันท์ จำกัด)

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้า แป้งถั่วเขียว สตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชถั่วเขียว

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธี AOAC (2000) และทำการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Chrastil (1987)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง

วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้ differential scanning calorimetry (DSC) ตามวิธีการของ Teixeira et al. (2012) โดยเตรียมแป้งผสมกับน้ำอัตราส่วน 20%w/w ทำการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 25-180 °C ที่อัตราการไหล 10 °C/min และวิเคราะห์คุณสมบัติการพองตัว และความสามารถในการละลาย ตามวิธีการของ Crosbie (1991)

การผลิตแผ่นแป้งนึ่งจากแป้งข้าวเจ้า แป้งถั่วเขียว สตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชถั่วเขียว

เตรียมแผ่นแป้ง โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Detchewa et al. (2021) โดยผสมแป้ง 20%w/w กวนผสมที่ 200-250 rpm ด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 30 min จากนั้นเทลงในถาด (ก 9.3 cm x ย 23 cm x ล 1 cm) ถาดละ 15 g แล้วนำไปนึ่งในอ่างน้ำโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 95 °C เป็นเวลา 7 min จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นตัวแล้วทำการลอกแผ่นแป้งออก นำออกมาผึ่งลมที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 h หรือจนความชื้นมีค่าเท่ากับ 13±2%w/w นำแผ่นแป้งที่ได้ไปบรรจุในถุงพลาสติกซิบล็อกและเก็บในโถดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) 50±2% ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 h เพื่อรอการวิเคราะห์ และก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติเนื้อสัมผัส จะทำการแช่แผ่นแป้งในน้ำ (500 ml) เป็นเวลา 5 min แล้วซับน้ำส่วนเกินออกด้วยกระดาษทิชชู่ เพื่อเป็นการเลียนแบบการบริโภคจริง จากนั้นและห่อด้วยพลาสติกแรปและบรรจุลงในภาชนะปิดสนิท เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ก่อนนำไปวิเคราะห์

การศึกษาลักษณะปรากฏ และเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้ง

วิเคราะห์ความชื้นของแผ่นแป้งแห้งและแผ่นแป้งคืนรูปด้วยวิธีมาตราฐาน AOAC (2000) ตรวจวัดความหนาของแผ่นแป้งแห้งโดยใช้ไมโครมิเตอร์ *และ*วัดความใสของแผ่นแป้งขนาด 4 cm × 1 cm ที่ความยาวคลื่น 600 nm ตามวิธีการของ Soo and Sarbon (2018)

วิเคราะห์ค่าความทนทานต่อการพับ ตามวิธีการของ Soe et al. (2020) โดยการนำแผ่นแป้งขนาด 1 × 1 cm^2 มาทำการพับซ้ำๆ ที่ตำแหน่งเดิมที่มุม 180° จนกว่าจะขาด จากนั้นจึงบันทึกจำนวนครั้งในการพับ
วิเคราะห์สมบัติเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้งโดยดัดแปลงจากวิธีการของ (Detchewa et al., 2021) นำแผ่นแป้งที่คืนรูปแล้วมาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 1.5 cm และยาว 7 cm สำหรับวัดค่าความเค้นสูงสุด (Tensile strength at peak) และ %Elongation at peak โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyser, Model TA. XT plus) หัววัดรหัส A/TGT (Self tightening roller grips) โดยใช้สภาวะดังนี้ Pre-test speed 1.0 mm/s, Test speed 3 mm/s และ Post-test speed 10 mm/s

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มทดลองโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics Version 22.0

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ช

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวชัยนาท (RF) แป้งถั่วเขียว (MBF) สตาร์ชข้าวชัยนาท (RS) และสตาร์ชถั่วเขียว (MFS) (ตารางที่ 1) ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แป้งมีปริมาณเถ้า เยื่อใยหยาบ โปรตีน ไขมัน และเถ้า สูงกว่าสตาร์ช โดยปริมาณโปรตีนและไขมันของ MBF มีค่าสูงที่สุด (22.86% และ 0.93%) ขณะที่ MBS มีปริมาณโปรตีนต่ำสุด สำหรับปริมาณแอมิโลสของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์โดยหลักการการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน จากไอโอดีนและสตาร์ชพอลิเมอร์ที่มีรูปร่างเป็นเส้นตรง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบทั้งแป้งและสตาร์ช ปริมาณแอมิโลสของถั่วเขียวสูงกว่าข้าวทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง บ่งชี้ถึงโมเลกุลแอมิโลสของถั่วเขียว มีลักษณะเป็นเส้นตรง และแอมิโลเพกตินมีตำแหน่งกิ่ง (พันธะ

glycosidic α-1,6) อยู่ลึกเข้าไปใกล้กับรีดิวซิงค์เอนด์ (reducing end) มากกว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกตินของข้าว (Vu & Lumdubwong, 2016)

Table 1 Chemical compositions and amylose content of native flours and starches.

Sample	Moisture (%)	Protein (%)	Lipid (%)	Ash (%)	Crude fiber (%)	Amylose content (%)	λ_{max}[ns]
Flour							
- Rice	10.80±0.01[a]	6.00±0.03[b]	0.15±0.01[b]	0.23±0.00[b]	0.71±0.01[b]	26.41±0.00[c]	578±0.00
- Mung bean	7.30±0.07[d]	22.86±0.08[a]	0.93±0.03[a]	2.95±0.01[a]	1.60±0.03[a]	25.47±0.00[d]	578±0.00
Starch							
- Rice	10.06±0.02[b]	0.79±0.00[c]	0.03±0.03[d]	0.09±0.00[c]	0.34±0.03[c]	31.78±0.06[b]	578±0.00
- Mung bean	10.00±0.06[c]	0.17±0.00[d]	0.07±0.01[c]	0.06±0.00[d]	0.72±0.09[b]	45.15±0.02[a]	582±5.66

*Means±SD in the same column followed by different superscript were significantly different ($p < 0.05$)

*[ns] were not significantly different ($p > 0.05$)

กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งและสตาร์ชแสดงในตารางที่ 2 กำลังการพองตัวมีค่าอยู่ระหว่าง 9.49-12.14 g/g โดยกำลังการพองตัวของสตาร์ชมีค่ามากกว่าแป้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) RF มีกำลังการพองตัวสูงกว่า MBF กำลังการพองตัวของ MBS สูงกว่า RS เล็กน้อย แต่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ปริมาณโปรตีนและไขมันเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้กำลังการพองตัวของแป้งต่ำกว่าสตาร์ช อย่างไรก็ตาม กำลังการพองตัวของ MBS ไล่เลี่ยกับ RS แสดงให้เห็นว่า มีปัจจัยอื่น นอกเหนือจากปริมาณแอมิโลสที่ควบคุมการพองตัวของเม็ดแป้ง ดังที่มีรายงานถึงกำลังการพองตัวขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน (Jiao et al., 2020) ความสามารถในการละลายของแป้งและสตาร์ช มีค่า 8.2-41.22% โดย MBF มีความสามารถในการละลายสูงที่สุด ความสามารถในการละลายของสตาร์ชลดลง บ่งชี้ว่ามีองค์ประกอบทางเคมีอื่น เช่น โปรตีน ละลายออกมาเป็นส่วนหนึ่งในสารละลายของแป้ง MBS มีความสามารถในการละลายสูงกว่า RS ประมาณสามเท่า แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์ amylose leaching ระหว่างการพองตัวของเม็ดแป้ง เกิดขึ้นกับ MBS มากกว่า RS (Jiao et al., 2020) การเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างแป้ง (ตารางที่ 2) พบว่า MBF มีค่า To ต่ำที่สุดคือ 68.90 °C และมี Tp และ Tc เท่ากับ 76.29 °C และ 88.55 °C ตามลำดับ RF มี To สูงที่สุดคือ 74.46 °C และมี Tp และ Tc เท่ากับ 78.71 °C และ 84.43 °C ตามลำดับ ทั้งนี้ ΔH ของ RF สูงกว่า MBF (19%) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Piyapattanamongkol et al. (2022) ที่รายงานว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน และ ΔH ของ RF สูงกว่า MBF (Tp MBF 76.10 °C *vs* Tp RF 79.59 °C และ ΔH MBF *vs* ΔH RF 8.70 J/g และ 12.79 J/g ตามลำดับ) สำหรับอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันที่ต่ำลงของสตาร์ช ประมาณ 2 °C อาจเกิดจากสองสาเหตุได้แก่ สารละลายด่างที่ใช้ในการสกัดสตาร์ช ทำลายความสมบูรณ์ของผลึกสตาร์ชบางส่วน และ/ หรือ ปริมาณไขมันและโปรตีนที่สูงกว่าในแป้ง มีผลทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งเกิดได้ช้า ขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าสู่เม็ดแป้ง และเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างของโมเลกุล ส่งผลทำให้ต้องใช้พลังงานในการทำลายพันธะภายในโครงสร้างแอมิโลสมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่วิเคราะห์ได้ของแป้งสูงกว่าสตาร์ช (Chungcharoen et al., 2015) อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งเอนโดเทิร์มดังกล่าวเป็นของสตาร์ช เมื่อพิจารณาจากค่า ΔH ซึ่งเป็นดัชนีของปริมาณผลึก ที่สอดคล้องกับปริมาณสตาร์ชทั้งหมดในตัวอย่าง

Table 2 Swelling power, solubility and gelatinization properties of native flours and starches.

Sample	Swelling Power (g/g)	Solubility (%)	Gelatinization properties[A]				
			To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	Tc-To (°C)	ΔH (J/g)
Flour							
- Rice	10.49±0.22[b]	10.44±0.04[c]	74.46±0.12[a]	78.71±0.13[a]	84.43±0.11[b]	9.97±0.01[b]	9.92±0.75[a]
- Mung bean	9.49±0.02[c]	41.22±0.57[a]	68.90±0.39[d]	76.29±0.37[c]	88.55±0.96[a]	19.66±1.35[a]	6.73±0.25[b]
Starch							
- Rice	12.05±0.09[a]	8.26±0.10[d]	73.80±0.05[b]	77.98±0.23[b]	84.05±0.35[c]	10.26±0.30[b]	11.79±0.07[a]
- Mung bean	12.14±0.17[a]	25.13±0.01[b]	71.46±0.08[c]	75.18±0.03[d]	81.10±0.08[d]	9.64±0.16[b]	8.01±0.39[b]

*Means±SD in the same column followed by different superscript were significantly different (p < 0.05)

[A]To = onset temperature of gelatinization; Tp = peak temperature; Tc = conclusion temperature.

ลักษณะปรากฏและสมบัติทางเคมีกายภาพของแผ่นแป้งคืนรูป

ความชื้นและความหนาของแผ่นแป้ง มีค่า 11.47-15.27% และ 0.29-0.56 mm ตามลำดับ (ภาพที่ 1) โดยความหนาของแผ่นแป้งไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความชื้น แผ่นแป้ง MBF ที่มีความชื้น 11.47% มีความหนาสูงที่สุด (0.56±0.11 mm) และความหนาของแผ่นแป้ง MBS ไล่เลี่ยกับแผ่นแป้ง RS ทั้งที่มีความชื้นสูงกว่า 1.73% นอกจากนี้ปริมาณความชื้น และปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ไม่มีอิทธิพลต่อความหนาของแผ่นแป้ง RF เมื่อพิจารณาจากความหนาของแผ่นแป้ง RF และ RS ภาพที่ 2A แสดงถึงความหนาของแผ่นแป้งเมื่อดูดน้ำกลับ เพิ่มขึ้น (0.02 mm) ทั้งนี้ความสามารถในการดูดน้ำกลับของแผ่นแป้งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (p > 0.05) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 36.99–50.48% และความสามารถในการดูดน้ำกลับของแผ่นแป้งจากสตาร์ชร์สูงกว่าแผ่นแป้งจากแป้ง (4.4%) Lubowa et al. (2018) รายงานว่าการอัตราส่วนของแอมิโลสที่สูง ส่งผลให้เกิดโครงข่ายเจลที่ต่อเนื่อง ทำให้เกิดการรวมตัวของโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงทำให้เป็นอุปสรรคในการซึมผ่านของน้ำ มีผลทำให้การดูดน้ำกลับลดลง ปรากฏการณ์ที่แผ่นแป้ง RS ดูดน้ำกลับได้มากกว่าแผ่นแป้ง MBS จึงบ่งชี้ถึงสัดส่วนความเป็นอสัณฐานของแผ่นแป้ง RS ที่สูงกว่า MBS ค่าความใสของแผ่นแป้งจากแป้งและสตาร์ชที่ดูดน้ำกลับแล้ว มีค่า 1.21–5.37% (ตารางที่ 2) ในภาพรวม พบว่า แผ่นแป้งจากสตาร์ชใสกว่าแผ่นแป้งจากแป้ง และความใสของแผ่นแป้ง RS ใกล้เคียงกับแผ่นแป้งทางการค้ามากที่สุด แผ่นแป้ง MBF ขุ่นกว่าแผ่นแป้ง RF และมีสีเหลืองต่างจากแผ่นแป้งอื่นอย่างชัดเจน MBS มีค่าความใสสูงที่สุด เท่ากับ 5.37% และ MBF มีค่าความใสต่ำที่สุด เท่ากับ 1.21% มีรายงานถึงความใสของแผ่นแป้งเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบเคมีอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีนถั่วเขียวที่มีสีเหลือง รวมถึง องค์ประกอบของโมเลกุลแป้ง ปริมาณผลึก และการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของแป้ง ซึ่งจะทำให้ความใสลดลงได้ (Majzoobi et al., 2015) นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของสตาร์ชและโปรตีนพอลิเมอร์ รวมถึงไขมันในแผ่นแป้งที่ต่างกัน ส่งผลให้ความหนาของตัวอย่างต่างกัน และมีผลต่อการส่องผ่านแสง ฟิล์มมีความหนาที่มาก ทำให้การส่องผ่านแสงลดลง และค่าความโปร่งใสของฟิล์มลดลง (Samsalee et al., 2022)

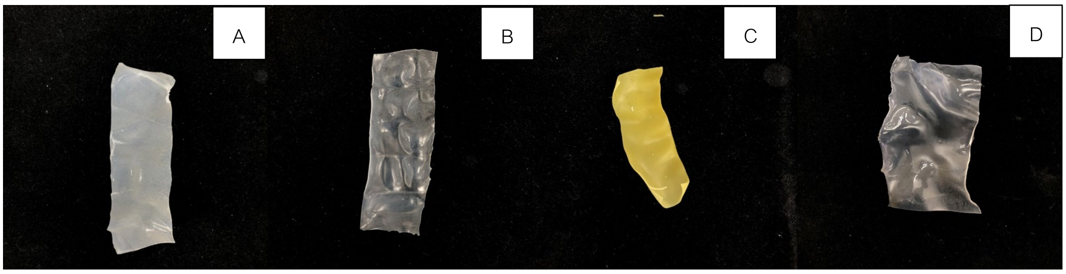


Fig. 1 Appearance of reabsorped starch-based food wraps: (A) chainat 1 rice flour; (C) chainat 1 rice starch; (C) mung bean flour; and (D) mung bean starch

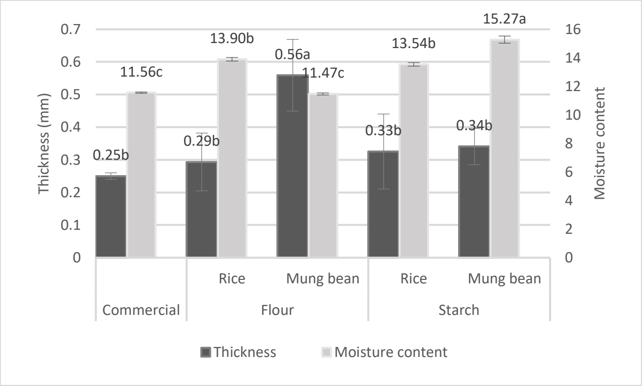


Fig. 2 Appearance and thickness and moisture content of dried starch-based food wraps.

เมื่อทดสอบความแข็งแรงทนทานต่อการม้วนพับของแผ่นแป้งคืนรูป ที่ผ่านการดูดน้ำกลับแล้ว พบว่าแผ่นแป้งที่เตรียมจากสตาร์ช มีความทนทานต่อการหักมากกว่าแผ่นแป้งที่เตรียมจากแป้ง โดยจำนวนครั้งของการม้วนพับของแผ่นแป้งสตาร์ชที่มากกว่าแป้งมาจากปริมาณสตาร์ชทั้งหมดในตัวอย่างที่สูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมิโลสที่สามารถสร้างโครงข่ายสามมิติในการเกิดเจลที่แข็งแรง ค่าความเค้นสูงสุด (TS at peak) ของแผ่นแป้งคืนรูป มีค่า 322-1241 kPa (ภาพที่ 2B) ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดและชนิดสตาร์ชมีผลต่อสมบัติเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้ง โดยภาพรวมแผ่นแป้งจากสตาร์ชมีค่า TS สูงกว่าแผ่นแป้งจากแป้ง โดย MBS มีค่า TS สูงกว่า RS (2 เท่า) ความแข็งแรงของ MBS ที่สูงกว่า RS เป็นผลมาจากปริมาณแอมิโลส ดังที่ Vu and Lumdubwong (2016) รายงานว่าฟิล์มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ จะมีค่า TS ต่ำ อย่างไรก็ตามปริมาณแอมิโลสของถั่วเขียว ที่วิเคราะห์จากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไอโอดีน เป็นค่าสูงเกินจริง เนื่องมาจากแอมิโลเพกตินของสตาร์ชถั่วเขียวที่มีสายโซ่ยาว (45.15%) โดยปริมาณแอมิโลสถั่วเขียว ที่วิเคราะห์จาก size exclusion chromatography มีค่า 29.1% เท่านั้น ค่าการดึงยืดของแผ่นแป้งจากข้าวและถั่วเขียวมีค่าไม่แตกต่างกัน บ่งชี้ว่าปริมาณสตาร์ชทั้งหมด องค์ประกอบทางเคมีอื่น และชนิดสตาร์ชไม่มีอิทธิพลต่อการดึงยืดโครงร่างตาข่ายของแผ่นแป้ง ค่าการดึงยืดของแผ่นแป้งทุกตัวอย่างอยู่ในช่วง 70-73% ($p > 0.05$)

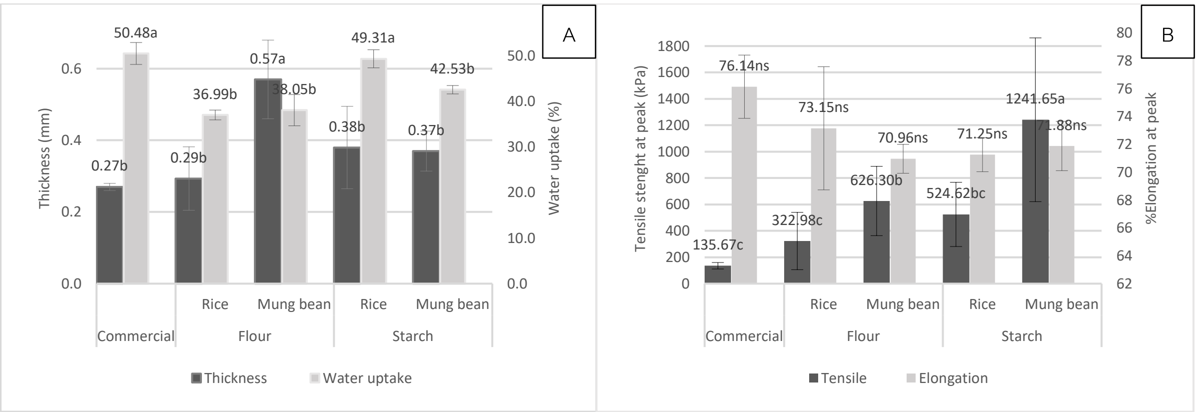


Fig. 3 Water uptake ability: (A) tensile strength at peak (TS) and %elongation at peak; (B) of reabsorbed starch-based food wraps.

*ns were not significantly different ($p > 0.05$)

Table 3 Transparency and folding endurance of reabsorbed starch-based food wraps.

Sample	Transparency (%mm^{-1})	Folding endurance (times)
Commercial	5.31±0.68	37±6
Flour		
- Rice	2.62 ± 0.59^{b}	38 ± 8^{bc}
- Mung bean	1.21 ± 0.19^{c}	26 ± 8^{c}
Starch		
- Rice	5.04 ± 0.36^{a}	53 ± 20^{ab}
- Mung bean	5.37 ± 0.04^{a}	71 ± 12^{a}

*Means±SD in the same column followed by different superscript were significantly different ($p < 0.05$)

สรุป

ปริมาณแอมิโลส กำลังการพองตัว และความสามารถในการละลายของสตาร์ชสูงกว่าแป้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของข้าวสูงกว่าถั่วเขียว โดยปริมาณสตาร์ชทั้งหมดมีผลทำให้อุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูงขึ้น ลักษณะปรากฏและสมบัติทางเคมีกายภาพของแผ่นแป้งพบว่า ความหนาของแผ่นแป้งไม่ได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความชื้น เมื่อนำแผ่นแป้งไปแช่น้ำคืนรูป พบว่าความสามารถในการดูดน้ำกลับของแผ่นแป้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดที่สูงส่งผลให้แผ่นแป้งมีความใส ทนทานต่อการพับ และมีค่า TS สูง เป็นผลให้แผ่นแป้งจากสตาร์ช โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นแป้งจากสตาร์ชถั่วเขียว เหมาะกับอาหารที่ต้องม้วนห่อ และต้องการแสดงไส้อาหาร ขณะที่แผ่นแป้งจากแป้ง ที่มีค่า TS ต่ำ และทึบแสง เหมาะกับการนำไปใช้เป็น non gluten pasta เป็นแผ่นพาสต้า ลาซานญ่า ทดแทนการใช้แป้งจากข้าวสาลี โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นแป้งจากแป้งถั่วเขียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

Association of Official Agricultural Chemists, A. 2000. Official methods of analysis (Vol. 222). Association of Official Analytical Chemists Washington, DC.

Chrastil, J. (1987). Improved colorimetric determination of amylose in starches or flours. Carbohydr. Res. 159(1): 154–158.

Chungcharoen, T., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P., Soponronnarit, S. 2015. Quality attributes of germinated high-amylose and waxy rice in superheated steam and hot air drying. Dry. Technol. 33(7): 876–885.

Crosbie, G. 1991. The relationship between starch swelling properties, paste viscosity and boiled noodle quality in wheat flours. J J. Cereal Sci. 13(2): 145–150.

Detchewa, P., Yamirudeng, K., Pongkanpai, V., Maneewong, C. 2021. Substitution of Rice Flour by Unripe Banana Flour Improved Physical Characteristics and Increased Bioactive Compounds of Vietnamese Rice Paper. Burapha Science Journal. 26(2): 1148–1163.

Holm, J., Björck, I., Drews, A., Asp, N. G. 1986. A rapid method for the analysis of starch. Starch‐Stärke. 38(7): 224–226.

Jiao, A., Yang, Y., Li, Y., Chen, Y., Xu, X., Jin, Z. 2020. Structural properties of rice flour as affected by the addition of pea starch and its effects on textural properties of extruded rice noodles. J. Food Prop. 23(1), 809–819.

Lubowa, M., Yeoh, S. Y., Easa, A. M. 2018. Textural and physical properties of retort processed rice noodles: Influence of chilling and partial substitution of rice flour with pregelatinized high-amylose maize starch. Food Sci Technol Int. 24(6): 476–486.

Lumdubwong, N. 1996. Rice starch isolation by alkaline protease digestion Kansas State University.

Majzoobi, M., Pesaran, Y., Mesbahi, G., Golmakani, M. T., & Farahnaky, A. (2015). Physical properties of biodegradable films from heat‐moisture‐treated rice flour and rice starch. Starch‐Stärke, 67(11–12): 1053–1060.

Piyapattanamongkol, T., Kongpensook, V., Tananuwong, K. 2022. Physicochemical properties and viscoelastic behavior of rice–mung bean composite flour systems as potential ingredients for plant‐based foods. Cereal Chem. 99(6): 1261–1271.

Samsalee, N., Romsomsa, N., Musika, S. 2022. Physicochemical, mechanical and thermal properties of edible film from man lueat (dioscorea alata) flour.

Soe, M. T., Pongjanyakul, T., Limpongsa, E., Jaipakdee, N. 2020. Modified glutinous rice starch-chitosan composite films for buccal delivery of hydrophilic drug. Carbohydr. Polym. 245:116556.

Soo, P., Sarbon, N. 2018. Preparation and characterization of edible chicken skin gelatin film incorporated with rice flour. Food Packag. Shelf Life. 15: 1–8.

Teixeira, E. d. M., Curvelo, A. A., Corrêa, A. C., Marconcini, J. M., Glenn, G. M., Mattoso, L. H. 2012. Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid). Ind Crops Prod. 37(1): 61–68.

Vu, H. P. N., Lumdubwong, N. 2016. Starch behaviors and mechanical properties of starch blend films with different plasticizers. Carbohydr. Polym.154: 112–120.

อิทธิพลของปริมาณน้ำและอัลคาไลน์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อคุณลักษณะทางกายภาพของเจลสตาร์ช

Influence of water content and alkaline calcium hydroxide on physical characteristics of starch gels

อริสรา ตอนสุข, น้ำฝน ลำดับวงศ์*

Arisara Tonsuk, Namfone Lumdubwong*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: faginfl@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำและอัลคาไลน์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ต่อลักษณะทางกายภาพของเจลสตาร์ชที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบอิทธิพลของชนิดสตาร์ช (ข้าวและถั่วเขียว) ความเข้มข้นของสตาร์ช (20% w/w และ 50% w/w) และชนิดของตัวทำละลาย (น้ำและสารละลาย 0.07 M $Ca(OH)_2$) ต่อคุณสมบัติทางความร้อน กำลังการพองตัว (SP), % ความสามารถในการละลาย และเนื้อสัมผัสของเจล ผลการทดลองพบว่าปริมาณที่ละลายได้ของเจลสตาร์ชถั่วเขียว สูงกว่าเจลสตาร์ชข้าวสามเท่า ในระบบน้ำที่มากเกินพอ การเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าว ซึ่งแสดงจากอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน มีความไวต่อปริมาณน้ำและสารละลายอัลคาไลน์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชถั่วเขียว ขณะที่ปริมาณน้ำและสารละลายอัลคาไลน์มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของจุดหลอมเหลวของสตาร์ชข้าว และพบว่าความเค้นต้านทานแรงดึง (TS) ของแผ่นชีทสตาร์ชข้าวที่ขึ้นรูปในระบบน้ำ และระบบสารละลายด่าง ที่ความเข้มข้นสตาร์ช 50% w/w มีค่าต่ำกว่าแผ่นชีทสตาร์ชถั่วเขียว อย่างมีนัยสำคัญ แต่ตัวทำละลายอัลคาไลน์เพิ่มความแข็งแรงของแผ่นชีทสตาร์ชข้าว แต่ลดความแข็งแรงของแผ่นชีทสตาร์ชถั่วเขียว ผลการเปรียบเทียบพบว่า% การยืดตัว (%E) ของแผ่นชีทสตาร์ชทั้งหมดคือ ~70% ($p > 0.05$) บ่งชี้ว่าตัวแปรต้นในงานวิจัยดังกล่าว ไม่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดึงยืดของแผ่นชีทสตาร์ช

คำสำคัญ: ข้าว, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, ถั่วเขียว, ผลิตภัณฑ์อาหารแบบแผ่นสตาร์ช, สตาร์ช

Abstract

The objective of the study was to investigate effect of water content and alkaline calcium hydroxide [$Ca(OH)_2$] on physical characteristics of different starch gels. The main effects of starch type (rice and mung bean), starch concentration (20% w/w and 50% w/w), and type of solvent (water and 0.07 M $Ca(OH)_2$ solution) on thermal properties, swelling power (SP), % solubility, and gel texture were determined. The soluble content of mung bean (MB) gel was three times higher than rice starch (RS) gel in the excess water system. The crystallinity of RS, expressed by the gelatinization temperature, was more susceptible to water content and presence of alkaline solution, compared to MB. The melting enthalpy of RS, however, was drastically affected by both water content and alkaline solution. It was found that tensile strength (TS) of RS sheet was significantly lower than MB sheet, regardless of type of solvent. Nonetheless, the opposite effect of alkaline solvent was reported on the strength of different starch sheet/gel. Also, all variables did not affect the stretch ability of starch sheet since the % elongation (%E) of all starch sheets was ~70% ($p > 0.05$).

Keywords: Calcium hydroxide, Food wraps, Mung bean, Rice, Starch

คำนำ

ปริมาณน้ำในระหว่างกระบวนการทำให้สตาร์ชสุก เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่ง ที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ อุณหภูมิที่ใช้ในการแปรรูปอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก (อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน) ในระบบที่มีปริมาณน้ำสูงมากเกินพอ ($\geq$ 65% w/w) มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแปรรูปอาหารในระบบความชื้นต่ำ (อุณหภูมิหลอมเหลว) ดังเช่นอุณหภูมิในการหุงข้าวสุกต่ำกว่าอุณหภูมิในการหลอมฟิล์มข้าวบริโภคได้ (Donmez et al., 2021) อัลคาไลน์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของอาหาร การเตรียมผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้ง/สตาร์ชหลายชนิด ใช้น้ำปูนใสหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ในระหว่างการแช่ตัวอย่าง และ/หรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เช่น ขนมเปียกปูน ตอร์ติญ่าร์ และลอดช่อง โดยการใช้อัลคาไลน์ดังกล่าว ส่งผลให้เนื้อสัมผัสเจลของอาหารแข็งแรง และ/หรือ เจลมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีรายงานถึง การผลิตเมทริกซ์สตาร์ชในสภาวะที่เป็นด่างและมีแคลเซียม; 0.02M $Ca(OH)_2$ สามารถเพิ่มความสามารถในการกักเก็บสารให้กลิ่นไว้ในเมทริกซ์สตาร์ชได้มากกว่าปริมาณลินาโลออลที่กักเก็บไว้ในเมทริกซ์สตาร์ชที่ผลิตโดยใช้น้ำถึง 13 เท่า (วรรธนมณฑน์ และสิรี, 2561) และอัตราส่วนระหว่างแป้งต่ออัลคาไลน์ยังมีผลต่อเนื้อสัมผัสของตัวอย่างต่างกัน Topete-Betancourt et al.(2020) รายงานถึงการแช่แป้งข้าวโพด ใน $Ca(OH)_2$ ที่ความเข้มข้น 50% (w/v) ทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นตอร์ติญ่า ส่งผลให้แป้งโดมีความหนืดและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากปริมาณน้ำและอัลคาไลน์ในกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสอาหารแล้ว ชนิดแป้งที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร มีผลต่อเนื้อสัมผัสของเจลเช่นเดียวกัน ผู้บริโภคสามารถแยกแยะความแข็งแรงยืดหยุ่นของเจลอาหารในขนมเปียกปูน ลอดช่อง และตอร์ติญ่าได้ ด้วยเหตุดังที่กล่าวมา วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณน้ำและอัลคาไลน์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ต่อลักษณะทางกายภาพของเจลสตาร์ชที่แตกต่างกัน โดยการนำสตาร์ชผสมกับน้ำหรืออัลคาไลน์แล้วนำไปให้ความร้อนจนเกิดการเจลาติไนซ์ ขึ้นรูปเป็นแผ่นชีทเจลสตาร์ชที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ถึง 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งแผ่นชีทจะมีความหนามากกว่าหรือเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ต่างกับแผ่นฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร (Drobny, 2013) จากนั้นทำการวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดสตาร์ช (ข้าวและถั่วเขียว) ความเข้มข้นของสตาร์ช (20% w/w และ 50% w/w) และชนิดของตัวทำละลาย (น้ำและสารละลาย 0.07 M $Ca(OH)_2$) ต่อคุณสมบัติทางความร้อน กำลังการพองตัว %ความสามารถในการละลาย และเนื้อสัมผัสของเจล

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ข้าวพันธุ์ชัยนาท (จากกรมการข้าว ประเทศไทย)เพื่อนำมาสกัดเป็นสตาร์ชข้าว (RS) สตาร์ชถั่วเขียว (MB) (ตราต้นสน จำหน่ายโดยห้างสรรพสินค้าสยามแม็คโคร จำกัด) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] (Analysis grade, จำหน่ายโดย บริษัทซีทีแลบอราตอรี่ จำกัด)

การเตรียมสตาร์ชข้าว (RS)

เตรียมแป้งข้าวโดยวิธีโม่เปียก และสกัดสตาร์ชข้าวด้วย 0.05M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ตามวิธีของ Lumdubwong and Seib (2000)

การเตรียมแผ่นชีทสตาร์ชเจล

ใช้วิธีการดัดแปลงของ Sefa-Dedeh et al. (2004) โดยเตรียมแผ่นชีทสตาร์ชที่มีความเข้มข้น 50% w/w โดยนำน้ำกลั่น 50 กรัม หรือ 0.07 M แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผสมกับสตาร์ช 50 กรัม โดยกวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาทีจากนั้นเทตัวอย่างลงในขวดแก้วสามคอ และกวนต่อเนื่องโดยใช้ใบพัด ที่ความเร็วรอบ 50 rpm ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเทตัวอย่างของเหลวที่เริ่มมีความข้นหนืด 25 กรัม ลงในถาดสแตนเลสขนาดกว้าง 93 มิลลิเตร × ยาว 230 มิลลิเลตร × ลึก 10 มิลลิเมตร เพื่อนำไปนึ่งต่อในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และนำตัวอย่างแผ่นชีทออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที นำแผ่นชีทสตาร์ชทุกตัวอย่างไปเก็บควบคุมความชื้นที่ 52%RH เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์อื่น

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณแอมิโลส

นำสตาร์ชข้าวชัยนาทและสตาร์ชถั่วเขียวไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยและเถ้า โดยวิธีของ AOAC (2000) วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส และ λmax โดยหลักการเกิดปฏิกิริยาสารเชิงซ้อนกับไอโอดีน ตามวิธีของ Chrastil (1987)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชข้าวและถั่วเขียว

วิเคราะห์กำลังการพองตัวและการละลาย ที่ความเข้มข้นสตาร์ช 1% w/v และ 50% w/v โดยใช้วิธีการของ Crosbie (1991) และวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชในระบบน้ำ (25% w/w และ 50% w/w) และในระบบ 0.07 M $Ca(OH)_2$ ที่ 50% w/w ละลายต่างกัน ด้วยเครื่อง differential scanning calorimetry (DSC) โดยวิธีของ Vázquez-Rodríguez et al. (2013) ตัวอย่างบรรจุใน crucible สแตนเลสขนาด 120 ไมโครลิตร สภาวะการให้ความร้อนเริ่มจาก 25 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อนเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

การวิเคราะห์คุณสมบัติเนื้อสัมผัส

ตัดแผ่นชีทเจลให้มีขนาด กว้าง 15 มิลลิเมตร x ยาว 80 มิลลิเมตร x หนา 1.2 มิลลิเมตร และนำมาวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึงของตัวอย่าง โดยดัดแปลงวิธีของ Puhin et al. (2021) ใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA. XT. Plus, Stable Micro Systems Ltd., Surrey, UK) แบบทดสอบแรงดึง พร้อมโหลดเซลล์ 5 กิโลกรัม โพรบ (A/TGA) Self tightening roller grips และ ค่าความยาวตั้งต้น (L_0) 15 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทดสอบสมมติฐานโดยวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Factorial in Completely Randomized Design จากการทดลอง 2 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น95% และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มทดลองโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สถิติ IBM SPSS Statistics Version 19.0

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช

Table 1 Chemical compositions of RS and MB starch

Sample	Moisture (%, at dry-basis)	Protein (%, at dry-basis)	Lipid (%, at dry-basis)	Crude fiber (%, at dry-basis)	Ash (%, at dry-basis)	Amylose content (%, at dry-basis)
Rice starch (RS)	10.06 ± 0.02^a	0.79 ± 0.00^a	0.03 ± 0.03^b	0.34 ± 0.03^b	0.09 ± 0.00^a	28.64 ± 0.66^b
mung bean starch (MB)	10.00 ± 0.06^b	0.17 ± 0.00^b	0.07 ± 0.01^a	0.72 ± 0.09^a	0.06 ± 0.00^b	39.98 ± 1.02^a

Means ± SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ช โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่าง α-1,4-กลูแคนและไอโอดีนเกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีน้ำเงิน พบว่าสตาร์ชข้าวและสตาร์ชถั่วเขียวมีปริมาณแอมิโลส 28.64%และ 39.98% ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า λ_{max} ของสตาร์ชทั้งสองชนิดมีค่า 578 nm เท่ากัน แต่ค่าการดูดกลืนแสงของสตาร์ชถั่วเขียวที่ตำแหน่งดังกล่าว สูงกว่าสตาร์ชข้าว~ 11.72% (1.43 และ1.13) บ่งชี้ว่าสายโซ่แอมิโลเพกทินของถั่วเขียว อาจมีความเป็นกิ่งที่มีลักษณะสายยาว ส่งผลให้เพิ่มค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งดังกล่าวมากกว่าสตาร์ชข้าว ซึ่งปริมาณแอมิโลสที่สูง และความยาวสายโซ่ของแอมิโลเพกทินของถั่วเขียว สอดคล้องกับการเลือกใช้สตาร์ชดังกล่าวในการขึ้นรูปฟิล์มและอาหารเส้นเนื่องจากให้เจลที่มีเนื้อสัมผัสแข็งแรง มีความยืดหยุ่น (Wathanamon et al., 2018).

กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชในระบบน้ำและอัลคาไลน์

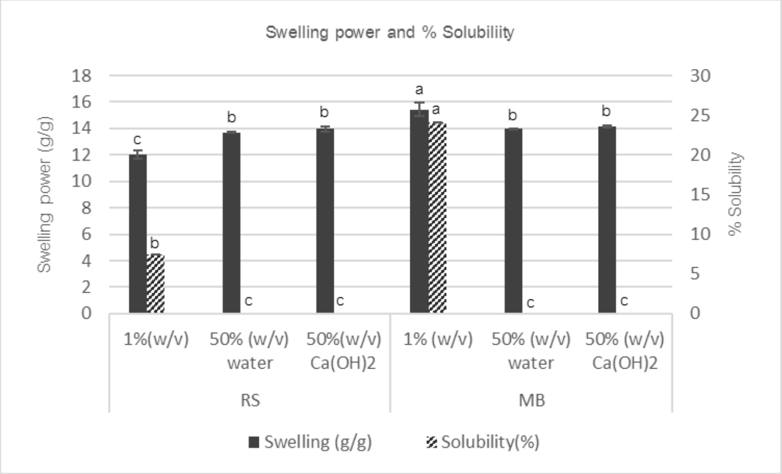


Fig. 1 Swelling and % solubility of 1% (w/v) RS with water, 50% (w/v) RS with water, 50% (w/v) RS with 0.07M $Ca(OH)_2$, 1% (w/v) MB with water, 50% (w/v) MB with water and 50% (w/v) MB with 0.07M $Ca(OH)_2$

[a-c]Different letters indicate significantly difference between mean values ($p< 0.05$)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชนิดสตาร์ช และปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดสตาร์ชและความเข้มข้นของสตาร์ช มีผลต่อกำลังการพองตัว (Fig. 1) สตาร์ชถั่วเขียวมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชข้าว ($p < 0.05$) ซึ่งไม่ได้เป็นไปในทางเดียวกันกับปริมาณแอมิโลสของตัวอย่าง (Table 1) และไม่สอดคล้องกับรายงานของ Tester and Morrison (1990) ที่

รายงานไว้ว่า กำลังการพองตัวแปรผันตรงตามปริมาณแอมิโลเพกทิน ขณะที่แอมิโลสมีบทบาททำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดสตาร์ชแข็งแรง ส่งผลให้การพองตัวของเม็ดสตาร์ชลดลง นอกจากนี้ กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วเขียว ในระบบ 50% w/v น้ำและ อัลคาไลน์ 50% w/v ลดต่ำลงเล็กน้อย ($p < 0.05$) แต่กำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวไม่แตกต่างกันในระบบน้ำและอัลคาไลน์

เปอร์เซ็นต์การละลายของสตาร์ชถั่วเขียวในระบบน้ำมากเกินพอ มีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวคิดเป็น 300% บ่งชี้ถึงปริมาณตัวถูกละลายที่แพร่ออกจากแกรนูลที่มากกว่า หรืออีกนัยหนึ่ง มีความเป็นไปได้ว่า ขนาดโมเลกุลแอมิโลสของสตาร์ชถั่วเขียวเล็กกว่าสตาร์ชข้าว นอกจากนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจมาจากที่กำลังการพองตัวของถั่วเขียวสูงกว่าข้าว มีผลทำให้อัตราการแพร่ของน้ำที่เข้าไปในแกรนูลเม็ดแป้งถั่วเขียวเร็วกว่า เป็นผลให้การละลายและแพร่ออกของแอมิโลสจากแกรนูลเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำหรืออัลคาไลน์ ในระบบความเข้มข้น 50% w/v ไม่เพียงพอในการละลายแอมิโลส ในเม็ดสตาร์ช และส่งแพร่ผ่านแกรนูลออกมาในสารละลายดังแสดงไว้ในค่า %การละลายที่เข้าใกล้ศูนย์

คุณสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชในระบบน้ำและอัลคาไลน์

Table 2 Thermal properties of RS and MB compared with water content and alkaline solution

Condition	Sample	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	T_c - T_o (°C)	Enthalpy (J/g)
Fully gelatinization	RS	73.76 ± 0.01 ^{c}	78.41 ± 0.08 ^{b}	84.51 ± 0.06 ^{d}	10.75 ± 0.07 ^{d}	11.65 ± 0.34 ^{d}
	MB	71.18 ± 0.03 ^{e}	74.86 ± 0.02 ^{e}	81.34 ± 0.10 ^{e}	10.16 ± 0.07 ^{d}	8.47 ± 0.04 ^{d}
Water 50% w/w	50% w/w RS	71.18 ± 0.03 ^{d}	74.86 ± 0.02 ^{c}	88.99 ± 0.21 ^{b}	10.16 ± 0.07 ^{b}	8.47 ± 0.04 ^{b}
	50% w/w MB	71.05 ± 0.23 ^{e}	75.35 ± 0.29 ^{d}	83.48 ± 0.99 ^{d}	12.44 ± 0.76 ^{c}	64.40 ± 3.35 ^{c}
0.07M $Ca(OH)_2$ 50% w/w	50% w/w RS	75.93 ± 0.19 ^{a}	81.38 ± 0.11 ^{a}	95.19 ± 0.30 ^{a}	19.26 ± 0.11 ^{a}	308.03 ± 9.05 ^{a}
	50% w/w MB	74.19 ± 0.10 ^{b}	78.33 ± 0.01 ^{b}	86.40 ± 0.42 ^{c}	12.21 ± 0.52 ^{c}	62.59 ± 1.30 ^{c}

Means ± SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

T_o = onset temperature of gelatinization; T_p = peak temperature; T_c = conclusion temperature.

วรรธนมณฑน์ และสิรี (2561) รายงานก่อนหน้า ถึงอุณหภูมิเจลาติไนเซชันและเอนทาลปีของ 2% w/v สตาร์ชถั่วเขียวในระบบ 0.02M $Ca(OH)_2$ ที่เพิ่มขึ้นจาก73.7 °C เป็น 77.2°C และ จาก 1.5 J/g เพิ่มขึ้นเป็น 1.7 J/g สำหรับในงานวิจัยนี้ พบว่าสมบัติทางความร้อนของ RS และ MB ในระบบน้ำที่มากเกินพอ ระบบน้ำและอัลคาไลน์ ที่ความเข้มข้น 50% w/w (Table 2) ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยชนิดสตาร์ช ระบบน้ำ และอัลคาไลน์ ที่มีระดับความเข้มข้นของสตาร์ชต่างกัน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสตาร์ช และระบบน้ำ/อัลคาไลน์ มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน และเอนทาลปี อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวในระบบน้ำ (50% w/w) ลดลง และเพิ่มขึ้นในระบบอัลคาไลน์ (50% w/w) ในทางกลับกัน อุณหภูมิเจลาติไนซ์และเอนทาลปีของสตาร์ชถั่วเขียว สูงเพิ่มขึ้นในทั้งสองระบบ และมีค่าสูงที่สุดในระบบอัลคาไลน์ ปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว ในระบบน้ำ 50% w/w ที่เพิ่มขึ้นจากระบบน้ำมากเกินพอ สอดคล้องกับปริมาณพลาสติไซเซอร์ (น้ำ) ที่ลดลง และอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน และเอนทาลปีที่เพิ่มขึ้นของสตาร์ชข้าวและถั่วเขียว ในระบบอัลคาไลน์ 50% w/w อาจมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในสารละลาย กับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชโมเลกุลของสตาร์ชที่แตกตัวเป็นประจุบ ที่สภาวะ pH > 12 เหนี่ยวนำส่งเสริมให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslinks) ระหว่างสตาร์ชและ Ca^{2+} (วรรธนมณฑน์ และสิรี, 2561)

ค่าเอนทาลปีของ endotherm ของสตาร์ชข้าว ในระบบน้ำมากเกินพอที่สูงกว่าสตาร์ชถั่วเขียว สอดคล้องกับปริมาณแอมิโลส และตามที่ Fredriksson *et al.* (1998) รายงานไว้ว่า แป้งหรือสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินสูงกว่า (แอมิโลสต่ำกว่า) จะใช้พลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันสูงกว่า เนื่องจากมีปริมาณของส่วนที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Crystalline) สูงกว่าตัวอย่างที่มีแอมิโลสสูง และการเชื่อมขวางระหว่าง Ca^{2+} และ alkoxide ion (OH^-) กับสตาร์ชพอลิเมอร์ น่าจะลดความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำและไฮดรอกซิลของสตาร์ชพอลิเมอร์ แต่ทำให้เกิดปริมาณความเป็นระเบียบของผลึกแอมิโลเพกทินเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Fig. 2 นอกจากนี้สตาร์ชข้าวมีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากความเข้มข้นและอัลคาไลน์มากกว่าสตาร์ชถั่วเขียว (Table 2)

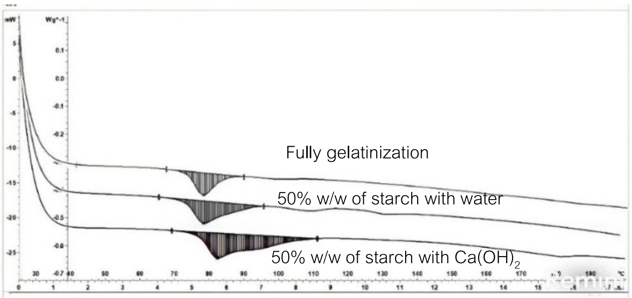


Fig. 2 The enthalpy (ΔH) differences of RS and MB between fully gelatinization, 50% (w/w) with water and 50% (w/w) with $Ca(OH)_2$

สมบัติเนื้อสัมผัสของแผ่นชีท/เจลสตาร์ชในระบบน้ำและอัลคาไลน์

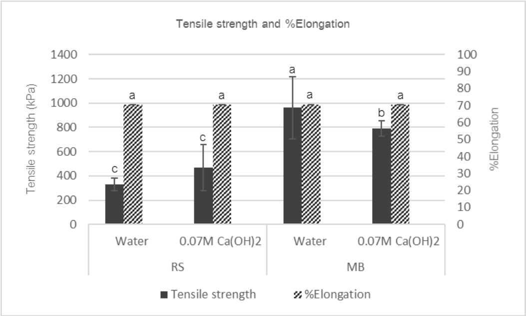


Fig. 3 Tensile strength and %Elongation of 50% (w/v) RS with water, 50% (w/v) RS with 0.07M $Ca(OH)_2$, 50% (w/v) MB with water and 50% (w/v) MB with 0.07M $Ca(OH)_2$

[a-c]Different letters indicate significantly different between mean values (*p< 0.05*)

แผ่นชีท/เจลสตาร์ชทุกตัวอย่าง มีความหนา ~1.2 มิลลิเมตร -1.4 มิลลิเมตร ($p > 0.05$) และ ความชื้น ~42%-47% ($p > 0.05$) เมื่อทำการวิเคราะห์ความเค้นต้านทานแรงดึงของแผ่นชีท พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 328 kPa-961 kPa (Fig. 3) และความเค้นต้านทานแรงดึง (TS)ของแผ่นชีทสตาร์ชถั่วเขียว ในระบบ 50% w/w น้ำ สูงกว่าชีทสตาร์ชข้าว ~ 49% ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณแอมิโลสและกำลังการพองตัวที่สูงกว่าสตาร์ชข้าว ทั้งนี้แผ่นชีทสตาร์ชถั่วเขียวที่เตรียมในระบบ %50 w/w $Ca(OH)_2$ มีค่าความแข็งแรงทนต่อการดึงยืดลดลง ~9.6% ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ตรงข้ามกับแผ่นชีทสตาร์ชข้าวที่

เตรียมในระบบอัลคาไลน์ ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ∼17.4% อย่างไรก็ตามตัวทำละลายอัลคาไลน์และชนิดสตาร์ชไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวอย่างชีท ดังแสดงจาก %การยืดตัว (%E) ของชีททุกตัวอย่าง ∼70% ($p > 0.05$)

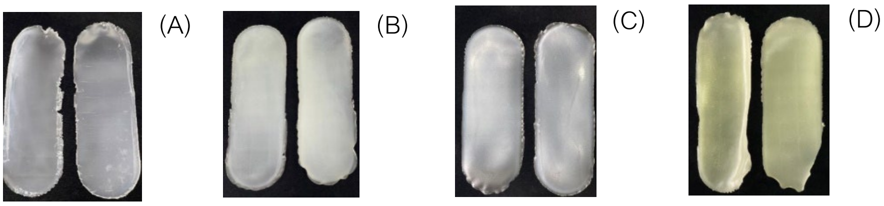


Fig. 4 Starch gels/sheet: (A) 50% (w/w) RS with water; (B) 50% (w/w) RS with $Ca(OH)_2$; (C) 50% (w/w) MB with water; (D) 50% (w/w) MB with $Ca(OH)_2$

ลักษณะปรากฏของแผ่นชีท/เจล สตาร์ชข้าวและสตาร์ชถั่วเขียว ในระบบ 50% w/w น้ำและ ของ 50% w/w $Ca(OH)_2$ (Fig. 4) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอัลคาไลน์ที่มีต่อสตาร์ชต่างชนิดกัน แผ่นชีทเจลสตาร์ชข้าวมีความขุ่น ทึบแสงเพิ่มขึ้น ขณะที่แผ่นชีทสตาร์ชถั่วเขียวแผ่นเจลเปลี่ยนเป็นสีเหลือง มีรายงานว่าอัลคาไลน์ (pH>10) สามารถเหนี่ยวนำสารกลุ่ม flavones-*C*-diglycosides ซึ่งเป็นเม็ดสีตามธรรมชาติในสตาร์ช ให้เกิดสีเขียวและสีเหลืองเด่นชัดขึ้น (ชาญจารุจิตร์ และ ชัยเสรี, 2561) ระดับความเข้มของสีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของอัลคาไลน์ที่ใช้ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีหากอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด (Fu, 2008)

สรุป

จากการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำ ชนิดสตาร์ช และปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดสตาร์ชและความเข้มข้นของสตาร์ช มีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วเขียวมากกว่าสตาร์ชข้าว ($p < 0.05$)ในระบบน้ำที่มากเกินพอ และกำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วเขียว ในระบบ 50% w/v น้ำและ อัลคาไลน์ 50% w/v ลดต่ำลงเล็กน้อย ($p < 0.05$) และในระบบดังกล่าวพบว่า เปอร์เซ็นต์สารละลายได้ของสตาร์ชถั่วเขียวสูงกว่าสตาร์ชข้าวถึงสามเท่า สตาร์ชข้าวมีความไวต่อปริมาณน้ำและสารละลายอัลคาไลน์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชถั่วเขียว เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเจลาติไนเซชันมากกว่า ทั้งนี้ปริมาณน้ำและสารละลายอัลคาไลน์มีผลต่อการเพิ่มค่าเอนทาลปีของจุดหลอมเหลวของสตาร์ชข้าวอย่างชัดเจน การตรวจสอบพบว่าความเค้นต้านทานแรงดึง (TS) ของแผ่นชีทสตาร์ชข้าวที่ขึ้นรูปในระบบน้ำ และระบบสารละลายด่าง ที่ความเข้มข้นสตาร์ช 50% w/w มีค่าต่ำกว่าแผ่นชีทสตาร์ชถั่วเขียวอย่างมีนัยสำคัญ โดยสารละลาย $Ca(OH)_2$เพิ่มความแข็งแรงของแผ่นชีทสตาร์ชข้าว แต่ลดความแข็งแรงของแผ่นชีทสตาร์ชถั่วเขียว แต่ตัวแปรต้นทั้งหมดในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อ %การยืดตัวของแผ่นชีทสตาร์ช โดย %การยืดตัว (%E) ของแผ่นชีทสตาร์ชทั้งหมดคือ ∼70% ($p > 0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

วรรธนมณฑน์ ชาญจารุจิตร์, สิรี ชัยเสรี. 2561. ผลของสภาวะด่างต่อความสามารถในการกักเก็บลินาโลออลในเมทริกซ์สตาร์ชที่ผ่านการทำแห้ง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 13(2): 36–48

Association of Official Agricultural Chemists, A. 2000. *Official methods of analysis* (Vol. 222). Association of Official Analytical Chemists Washington, DC.

Chrastil, J. 1987. Improved colorimetric determination of amylose in starches or flours. Carbohydr. Res. 159(1): 154–158.

Chrastil, J. 1987. Improved colorimetric determination of amylose in starches or flours. Carbohydr. Res. 159(1): 154–158.

Crosbie, G. 1991. The relationship between starch swelling properties, paste viscosity and boiled noodle quality in wheat flours. J. Cereal Sci.13(2): 14–150.

Donmez, D., Pinho, L., Patel, B., Desam, P., Campanella, O. H. 2021. Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation. Curr. Opin. Food Sci. 39: 103–109.

Drobny, J.G. 2013. Industrial applications of ionizing radiation. Ionizing Radiation and Polymers, pp. 149–212.

Fu, B. X. 2008. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing. Food Res. Int. 41: 888–902.

Fredriksson, H., Silverio, J. Andersson, R., Elliason, A.C., Åman., P. 1998. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches. Carbohydr. Polym. 35: 119–134.

Lumdubwong, N., Seib, P. A. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of Wet-milled Rice Flour. Department of Grain Science and Industry, Kansas State University.

Puhin, K., Fukuoka, M., Ratanasumawong, S. 2021. Effect of starch and non-starch components on water migration, microstructure, starch retrogradation and texture of flat rice noodles made from different rice varieties. Int. J. Food Sci. Technol. 56(7): 3344–3354.

Sefa-Dedeh, S., Cornelius, B., Sakyi-Dawson, E., Afoakwa, E. O. 2004. Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. Food Chem. 86(3): 317–324. doi.org/10.1016 /j.foodchem.2003.08.033

Tester, R. F., Morrison W. R. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. Cereal Chem. 67: 551–557

Topete-Betancourt, A., Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. d. D. 2020. Relaxation tests and textural properties of nixtamalized corn masa and their relationships with tortilla texture. Food Biosci. 33: 1–7

Vázquez-Rodríguez, J. A., Amaya-Guerra, C. A., Báez-González, J. G., Núñez-González, M. A., Figueroa-Cárdenas, J. D. 2013. Study of the fortification with bean and amaranth flours in nixtamalized maize tortilla. CyTA - J. Food Sci.11(sup1): 62–66. doi.org/10.1080/19476337.2012.753644

สาขาทรัพยากรธรรมชาติ
และสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources

And Environment)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

การวิเคราะห์ปัญหาและการจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พระราชบัญญัติอุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562

The problem analysis and policy recommendations formulation for resolving land occupation in the protected areas according to the section 64 of national parks act, B.E. 2562, and section 121 of wild animal conservation and protection act, B.E. 2562

เสาวลักษณ์ วงษ์สวาสดิ์, ขวัญชัย ดวงสถาพร*, ปัสสี ประสมสินธ์

Saowaluk Wongsawad, Khwanchai Duangsathaporn*, Patsi Prasomsin

ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fforkcd@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัญหาและจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 โดยการสัมภาษณ์เชิงลึก ผู้ที่เกี่ยวข้องจำนวน 19 คน ที่ครอบคลุมหน่วยงานภาครัฐ องค์กร พัฒนาเอกชน ประชาชน และนักวิชาการ ด้วยวิธีการคัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจง และแบบลูกโซ่ ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) วิเคราะห์แบบ SWOT และการวิเคราะห์แบบ TOWS Matrix โดยมีข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ แบ่งได้ 5 ด้าน ดังนี้ 1) ด้านพัฒนาและปรับปรุงกฎหมายและนโยบาย 2) ด้านพัฒนากลไกและเครื่องมือในการบริหารงาน 3) ด้านพัฒนาศักยภาพของเจ้าหน้าที่ 4) ด้านพัฒนาการมีส่วนร่วมและการสร้างความเข้มแข็งให้แก่ชุมชน และ 5) ด้านส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยรูปแบบการใช้ที่ดินให้เกิดความยั่งยืน

คำสำคัญ: การครอบครองที่ดินป่าไม้, ป่าอนุรักษ์, พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562, พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562

Abstract

The research aimed to analyze the problems and formulate policy recommendations for resolving land occupation in the protected areas according to the section 64 of National Parks Act, B.E. 2562, and section 121 of Wild Animal Conservation and Protection Act, B.E. 2562 by using in-depth interviews from 19 persons by purposive sampling and snowball sampling including governmental organizations, non-governmental organizations, people, and academicians. The data were analyzed by using content analysis, SWOT analysis, and the TOWS matrix technique. Policy recommendations include 5 issues including 1) development and improvement of law and policy, 2) development of mechanism and management tools, 3) improvement of personnel potentiality, 4) development of participation and strengthening of communities, and 5) promotion and support of sustainable land use research.

Keywords: Forest land occupation, National parks act, B.E.2562, Protected area, Wild animal conservation and protection act, B.E.2562

คำนำ

อุทยานแห่งชาติ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า และเขตห้ามล่าสัตว์ป่า อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ได้มีการอาศัยอำนาจตาม พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 ในการบริหารจัดการพื้นที่อุทยานแห่งชาติ และพ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ในการบริหารจัดการพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า และเขตห้ามล่าสัตว์ป่า ปัจจุบันพื้นที่อุทยานแห่งชาติ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า และเขตห้ามล่าสัตว์ป่ามีประชาชนอาศัยและใช้ประโยชน์อยู่ประมาณ 4.7 ล้านไร่ (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2562) ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญของการปรับปรุงกฎหมายใน พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และพ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 สำหรับเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหาการครอบครองที่ดินในอุทยานแห่งชาติ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า และเขตห้ามล่าสัตว์ป่า โดยได้มีการบัญญัติมาตรา 64 ใน พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 ใน พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ที่สามารถให้ประชาชนอาศัยและทำกินอยู่ในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ได้ภายใต้เงื่อนที่กำหนด จากเดิมที่ พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2504 และพ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2535 ไม่มีบทบัญญัติที่ให้อำนาจในการอนุญาตให้ประชาชนสามารถใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ได้ จะเห็นได้ว่ากฎหมายซึ่งเป็นเครื่องมือหลักในการบริหารจัดการพื้นที่ป่าอนุรักษ์นั้นมีข้อจำกัด จึงทำให้ปัญหาการครอบครองที่ดินในป่าอนุรักษ์นั้นสะสมมาอย่างยาวนาน จากบทบัญญัติของกฎหมายที่กำหนดในมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ.2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ที่มีการบัญญัติไว้ในกฎหมายโดยให้กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ทำการสำรวจการถือครองที่ดินของประชาชนที่อาศัยหรือทำกินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์แต่ละแห่งให้แล้วเสร็จภายใน 240 วันนับตั้งแต่พระราชบัญญัตินี้มีผลบังคับใช้ โดยยึดตามกรอบเวลาตามมติคณะรัฐมนตรีเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2541 เรื่อง การแก้ไขปัญหาที่ดินในพื้นที่ป่าไม้ หรือตามคำสั่งคณะรักษาความสงบแห่งชาติ ที่ 66/2557 เรื่อง เพิ่มเติมหน่วยงานสำหรับการปราบปราม หยุดยั้งการบุกรุกทำลายทรัพยากรป่าไม้ และนโยบายการปฏิบัติงานเป็นการชั่วคราวในสภาวการณ์ปัจจุบัน เมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2557 ภายหลังการสำรวจการครอบครองที่ดินเสร็จแล้วนั้น จะต้องมีการจัดทำโครงการเกี่ยวกับการอนุรักษ์และดูแลรักษาทรัพยากรธรรมชาติซึ่งมีการกำหนดระยะเวลาของโครงการคราวละไม่เกิน 20 ปี โดยจะต้องมีการจัดทำแผนที่แสดงแนวเขตของโครงการ เกณฑ์ในการพิจารณาและคุณสมบัติ หน้าที่ของบุคคลที่อาศัยหรือทำกินในชุมชนที่อยู่ภายใต้โครงการ ทั้งนี้ยังมีการกำหนดหลักเกณฑ์ วิธีการ เงื่อนไข การอยู่อาศัยหรือทำกิน และการสิ้นสุดโครงการ แม้ว่ากฎหมายจะสามารถให้ประชาชนอาศัยหรือทำกินในพื้นที่ป่าได้ แต่ยังทำให้ประชาชนบางส่วนเกิดข้อกังวล เนื่องจากการใช้ประโยชน์ในที่ดินป่านั้นจะต้องอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของรัฐ และไม่ได้มีสิทธิในที่ดินนั้น ซึ่งอาจจะทำให้ประชาชนขาดสิทธิ์และเสรีภาพในการจัดการพื้นที่ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และ มาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 และจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย แบบสัมภาษณ์ อุปกรณ์บันทึกเสียง อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และ อุปกรณ์สำนักงาน

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดผู้ให้ข้อมูลหลักที่สำคัญ (Key informants) จากหน่วยงาน ประชาชน หรือองค์กรที่มีการดำเนินการเกี่ยวกับการแก้ไขการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามกระบวนการในบทบัญญัติมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ทั้งนี้ผู้วิจัยได้คัดเลือกผู้ให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องจำนวน 19 คน โดยคัดเลือกผู้ให้ข้อมูลหลักด้วยวิธีการเลือกตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive sampling) จำนวน 11 คน เพื่อให้ได้กลุ่มผู้ให้ข้อมูลสำคัญที่หลากหลาย และสามารถตอบคำถามได้ครอบคลุมทุกประเด็น จึงได้ให้ผู้ให้ข้อมูลหลักแนะนำผู้ที่ควรสัมภาษณ์เพิ่ม ซึ่งเป็นการเลือกผู้ให้ข้อมูลรองแบบลูกโซ่ (Snowball sampling) จำนวน 8 คน ที่ครอบคลุมทั้งหน่วยงานภาครัฐ องค์กรพัฒนาเอกชน ประชาชน และนักวิชาการ จนได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและเหมาะสมในการศึกษา ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. หน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ 1.1) ผู้อำนวยการส่วนจัดการที่ดินและชุมชนในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ 1.2) ผู้แทนผู้อำนวยการส่วนจัดการพื้นที่ป่าอนุรักษ์ 1.3) ผู้อำนวยการส่วนอนุรักษ์ทรัพยากร 1.4) ผู้อำนวยการส่วนฟื้นฟูและพัฒนาพื้นที่อนุรักษ์ (สบอ. 4) 1.5) ผู้อำนวยการส่วนอุทยานแห่งชาติ (สบอ. 4) 1.6) ผู้อำนวยการส่วนฟื้นฟูและพัฒนาพื้นที่อนุรักษ์ (สบอ. 10) 1.7 ผู้แทนผู้อำนวยการส่วนอุทยานแห่งชาติ (สบอ.10) 1.8) ประธานคณะทำงานเฉพาะกิจขับเคลื่อนนโยบายการแก้ปัญหาการอยู่อาศัยและทำกินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ (สบนร.) และ 1.9) ประธานคณะกรรมการแก้ไขปัญหาความมั่นคงในที่อยู่อาศัย พื้นที่ทำกินและพื้นที่ทางจิตวิญญาณของชุมชนชาวเล

2. องค์กรพัฒนาเอกชน/ประชาชน ได้แก่ 2.1) ตัวแทนสมัชชาคนจน 2.2) ตัวแทนมูลนิธิสืบนาคะเสถียร 2.3) ตัวแทนศูนย์วนศาสตร์ชุมชนเพื่อคนกับป่า (RECOFTC) 2.4) ตัวแทนองค์กรระหว่างประเทศเพื่ออนุรักษ์ธรรมชาติ (IUCN) 2.5) ตัวแทนมูลนิธิคนเพียงไพร 2.6) ตัวแทนสมาคมอุทยานแห่งชาติ 2.7) ตัวแทนเครือข่ายปฏิรูปที่ดินภาคอีสาน (คปอ.) และ 2.8) ตัวแทนภาคประชาชน

3. นักวิชาการ ได้แก่ 3.1) นักวิชาการจากวิทยาลัยการปกครอง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และ 3.2) นักวิชาการจากคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทั้งนี้ เมื่อผู้วิจัยได้สัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลหลักแล้ว เพื่อให้ได้คำตอบที่ครอบคลุมทุกประเด็น ผู้วิจัยจะให้ผู้ให้ข้อมูลหลักแนะนำบุคคลที่ควรจะสัมภาษณ์ต่อไป ซึ่งเป็นบุคคลที่สามารถถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในประเด็นที่ผู้วิจัยต้องการศึกษาได้เป็นอย่างดี และเมื่อผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลต่อไปจนพบว่าแม้สัมภาษณ์คนอื่น ๆ ต่อไปก็ไม่ได้ข้อมูลใหม่เพิ่มเติมอีก ที่เรียกได้ว่า ข้อมูลมีความอิ่มตัว (Saturation of data) ผู้วิจัยจึงหยุดเก็บข้อมูล

เครื่องมือในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ แบบสัมภาษณ์ (Interview) เป็นการสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-structure interview) ซึ่งเป็นแนวคำถามกว้าง ๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลระดับลึกที่เข้าถึงความเป็นจริงมากที่สุดและสามารถให้ผู้ตอบแสดงความคิดเห็นได้ โดยกรอบคำถามสร้างจากกระบวนการแก้ไขปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ในบทบัญญัติตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. การเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) รวบรวมข้อมูลสถานการณ์ป่าไม้ในประเทศไทย เช่น พื้นที่ป่าอนุรักษ์ในประเทศไทย จำนวนพื้นที่ป่าอนุรักษ์ในการครอบครองของประชาชน, สภาพปัญหา สาเหตุ และแนวทางแก้ไขปัญหาการครอบครองที่ในเขตพื้นที่ป่าไม้และกฎหมาย ระเบียบ และนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ เช่น รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พุทธศักราช 2560 ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี และนโยบายป่าไม้แห่งชาติ เป็นต้น

2. การเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) โดยการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) จากผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key informants) ด้วยการสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-structure interview) ซึ่งมีลักษณะคำถามเป็นประเด็นกว้าง ๆ ที่เป็นคำถามปลายเปิด เพื่อให้ผู้ที่ถูกสัมภาษณ์สามารถแสดงความคิดเห็นได้อย่างเต็มที่ โดยกำหนดกรอบคำถามจากกระบวนการในบทบัญญัติมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์สภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์มาทำการวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) เพื่อกำหนดประเด็นหลักและจัดหมวดหมู่ของปัญหา โดยค้นหาข้อสรุปและตีความแล้วจัดกลุ่มของข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ และทำการจัดระเบียบข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลอยู่ในสภาพพร้อมนำไปใช้งาน (ปาริชาต, 2545) โดยได้คัดเลือกประเด็นปัญหาที่หน่วยงานภาครัฐ องค์กรพัฒนาเอกชน/ประชาชน และนักวิชาการ ที่ให้ความคิดเห็นที่ตรงกัน

2. วิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ SWOT (นันทิยา และณรงค์, 2542) ถึงจุดแข็งจุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค เพื่อจำแนกปัจจัยที่มีผลต่อการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562

3. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ ด้วยการวิเคราะห์ TOWS Matrix (สมยศ, 2551) ระหว่างจุดแข็งและโอกาส เป็นกลยุทธ์เชิงรุก จุดแข็งและอุปสรรค เป็นกลยุทธ์เชิงรับ จุดอ่อนและโอกาส เป็นกลยุทธ์เชิงแก้ไข จุดอ่อนและอุปสรรค เป็นกลยุทธ์เชิงป้องกัน เพื่อหาแนวทางแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ.2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562

4. กำหนดข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 โดยนำข้อมูลจากการตรวจเอกสารดังแสดงในส่วนการเก็บรวบรวมข้อมูลข้อ 1และข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ตามข้อ 1–3 มากำหนดข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาและการจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พระราชอุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 แบ่งการนำเสนอเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย 1) สภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ 2) การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ 3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ และ 4) ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ดังนี้

สภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้ที่เกี่ยวข้องจำนวน 19 คน ที่ครอบคลุมหน่วยงานภาครัฐ องค์กรพัฒนาเอกชน/ประชาชน และนักวิชาการ เพื่อให้ทราบถึงสภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดิน

ในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) พบว่า สภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 สามารถจำแนกประเด็นปัญหาได้ 3 ประเด็น ดังนี้

1. ปัญหาที่เกิดจากหน่วยงานที่รับผิดชอบ ได้แก่ อัตรากำลังไม่เพียงพอ การจัดสรรงบประมาณมีความล่าช้า เครื่องมือ และอุปกรณ์ไม่เพียงพอ เจ้าหน้าที่ขาดความรู้ ความเข้าใจ การประชาสัมพันธ์ไม่ทั่วถึง ฐานข้อมูลของประชาชนที่ครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ยังไม่ถูกต้อง ครบถ้วน สมบูรณ์ แนวเขตที่ดินมีการซ้อนทับกับที่ดินของรัฐประเภทอื่น ๆ และที่ดินตามประมวลกฎหมายที่ดิน

2. ปัญหาที่เกิดจากประชาชน ได้แก่ ประชาชนไม่ให้ความร่วมมือ ประชาชนขาดความรู้ ความเข้าใจ การเปลี่ยนมือผู้ครอบครอง ประชาชนบางกลุ่มไม่เห็นด้วยกับแนวทางการแก้ปัญหาเนื่องจากถูกลิดลอนสิทธิ์ และมีเงื่อนไขการใช้ประโยชน์ที่ดิน

3. ปัญหาทางด้านกฎหมายและนโยบาย ได้แก่ กฎหมายและนโยบายยังขาดความชัดเจนในทางปฏิบัติ เช่น มติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 30 มินายน 2541 มติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน 2561 กฎหมายยังมีความขัดแย้งกับนโยบายอื่นของรัฐบาล เช่น มติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 3 สิงหาคม 2553 เรื่องแนวนโยบายในการฟื้นฟูวิถีชีวิตชาวกะเหรี่ยง มติคณะรัฐมนตรีว่าด้วยการ ฟื้นฟูวิถีชีวิตชาวเล 2 มิถุนายน 2553 เป็นต้น

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลสภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ปัญหาในการดำเนินการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ สามารถจำแนกประเด็นปัญหาได้ 3 ประเด็น ดังนี้ 1) ปัญหาที่เกิดจากหน่วยงานที่รับผิดชอบ 2) ปัญหาที่เกิดจากประชาชน 3) ปัญหาทางด้านกฎหมายและนโยบาย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ โสภณ และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาเรื่อง “ปัญหาการอนุรักษ์พื้นที่ป่าไม้และการจัดที่ดินทำกิน: ยุทธศาสตร์ที่ต้องเปลี่ยนแปลงเพื่อความมั่นคงของชาติ” สามารถจำแนกประเด็นปัญหา ดังนี้ 1) การเมือง 2) เงื่อนไขทางสังคม 3) งบประมาณ 4) วิชาการ และ 5) หน่วยงานรัฐ

การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์

จากการตรวจเอกสารและการวิเคราะห์สภาพปัญหาและสาเหตุในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ จึงได้นำมาวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ SWOT Analysis เพื่อจำแนกประเด็น จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค ของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ได้ดังนี้

จุดแข็ง (Strengths) ได้แก่ 1) พื้นที่ป่าอนุรักษ์ที่ประชาชนครอบครอง ได้รับการรับรองจากภาครัฐ และ 2) ชุมชนที่ครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ต้องการเข้ามามีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และจัดการพื้นที่ป่าอนุรักษ์

จุดอ่อน (Weaknesses) ได้แก่ 1) อัตรากำลังไม่เพียงพอ 2) การประชาสัมพันธ์ไม่ทั่วถึง 3) เจ้าหน้าที่ขาดความรู้ ความเข้าใจ 4) ประชาชนไม่ให้ความร่วมมือ 5) ประชาชนขาดความรู้ ความเข้าใจ 6) ประชาชนบางกลุ่มไม่เห็นด้วยกับแนวทางการแก้ปัญหาเนื่องจากถูกลิดลอนสิทธิ และมีเงื่อนไขการใช้ประโยชน์ที่ดิน 7) ฐานข้อมูลของประชาชนที่ครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ยังไม่ถูกต้อง ครบถ้วน สมบูรณ์ และ 8) แนวเขตที่ดินมีการซ้อนทับกับที่ดินของรัฐประเภทอื่นๆ และที่ดินตามประมวลกฎหมายที่ดิน

โอกาส (Opportunities) ได้แก่ 1) รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พุทธศักราช 2560 ส่งเสริมให้ประชาชนมีส่วนร่วม 2) มีคณะกรรมการนโยบายที่ดินแห่งชาติที่บริหารจัดการที่ดินอย่างเป็นเอกภาพและมีกรอบในการดำเนินการให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน 3) นโยบายป่าแห่งชาติที่เป็นกรอบในการบริหารจัดการป่าไม้ มี

คณะทำงานเฉพาะกิจในการขับเคลื่อนนโยบายการแก้ไขปัญหาการอยู่อาศัยและทำกินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ (สบนร.) 4) ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นที่มิตรกับสิ่งแวดล้อม 5) มีกฎหมายที่เป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ และ 6) มีกรอบการดำเนินงานตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน 2561

อุปสรรค (Threats) ได้แก่ 1) การจัดสรรงบประมาณมีความล่าช้า 2) กฎหมายและนโยบายยังขาดความชัดเจนในทางปฏิบัติ และ3) กฎหมายยังมีความขัดแย้งกับนโยบายอื่นของรัฐบาล เช่น มติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 3 สิงหาคม 2553 เรื่องแนวนโยบายในการฟื้นฟูวิถีชีวิตชาวกะเหรี่ยง มติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 2 มิ.ย. 2553 ฟื้นฟูวิถีชีวิตชาวเล เป็นต้น

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์

จากการวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ SWOT Analysis แล้วนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของจุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค ด้วยการวิเคราะห์ TOWS Matrix ระหว่างจุดแข็งและโอกาส เป็นกลยุทธ์เชิงรุก จุดแข็งและอุปสรรค เป็นกลยุทธ์เชิงรับ จุดอ่อนและโอกาส เป็นกลยุทธ์เชิงแก้ไข จุดอ่อนและอุปสรรค เป็นกลยุทธ์เชิงป้องกัน เพื่อหาแนวทางแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ได้ดังนี้

กลยุทธ์เชิงรุก (SO) ได้แก่ พัฒนากลไกการทำงานอย่างมีส่วนร่วม, และพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชน

กลยุทธ์เชิงแก้ไข (ST) ได้แก่ ปรับปรุงกฎหมายและระเบียบที่เป็นอุปสรรคต่อการแก้ปัญหา และส่งเสริมรูปแบบการบริหารจัดการอย่างมีส่วนร่วม

กลยุทธ์เชิงป้องกัน (WO) ได้แก่ พัฒนาระบบฐานข้อมูลของประชาชนให้ถูกต้องและสามารถตรวจสอบได้ ปรับปรุงแนวเขตที่ดินให้ชัดเจนและมีเอกภาพ, และพัฒนาระบบบริหารจัดการกำลังคนและบุคลากร

กลยุทธ์เชิงรับ (WT) ได้แก่ เร่งรัดการตราอนุบัญญัติ และระเบียบให้สอดคล้องกับบริบทของสังคมและความเป็นจริงในปัจจุบัน

ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์

การจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญการครอบครองที่ดินของประชาชนในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ได้พิจารณาข้อมูลจากการตรวจเอกสารดังแสดงในส่วนการเก็บรวบรวมข้อมูลข้อ 1 และการวิเคราะห์ทางวิชาการ ได้แก่ 1) การวิเคราะห์สภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ 2) การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ และ 3) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญการครอบครองที่ดินของประชาชนในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 การจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ด้าน ได้จำนวน 9 ข้อ ดังนี้

1. ด้านพัฒนาและปรับปรุงกฎหมายและนโยบาย ได้แก่ 1.1) เร่งรัดการตราอนุบัญญัติ และระเบียบ ในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินของประชาชนให้มีความเหมาะสมและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ มีความสอดคล้องกับบริบทของสังคมและสภาพความเป็นจริงในปัจจุบัน บนพื้นฐานข้อมูลทางวิชาการเพื่อให้เอื้อต่อการแก้ไขปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ รวมถึงเปิดโอกาสให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ามามีส่วนร่วมในการร่างหรือจัดทำ และ 1.2) ปรับปรุงกฎหมาย ระเบียบ และนโยบายที่เป็นอุปสรรคต่อการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์

2. ด้านพัฒนากลไกและเครื่องมือในการบริหารงาน ได้แก่ 2.1) จัดทำแนวเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ที่ดินของประโยชน์ของประชาชน โดยการมีส่วนร่วมของภาคประชาสังคม และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 2.2) พัฒนาระบบฐานข้อมูลของประชาชนผู้ที่ได้รับการจัดสรรที่ดินให้สามารถติดตาม ตรวจสอบข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และสามารถเชื่อมโยงกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ โดยการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม และ 2.3) สร้างการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และการบริหารจัดการที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยการบูรณาการทั้งภาครัฐ เอกชน และประชาชน ให้มีส่วนร่วมในการกำหนดกรอบแนวทางในการดำเนินงาน และวางแผนร่วมกันในการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อให้เกิดความยั่งยืน

3. ด้านพัฒนาศักยภาพของเจ้าหน้าที่ ได้แก่ พัฒนาศักยภาพเจ้าหน้าที่ให้สามารถทำงานร่วมกับชุมชน หน่วยงานหรือองค์กรอื่น ๆ ได้ ด้วยการปรับทัศนคติและเพิ่มทักษะในการจัดการอย่างมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้

4. ด้านพัฒนาการมีส่วนร่วมและการสร้างความเข้มแข็งให้แก่ชุมชน ได้แก่ 4.1) พัฒนากลไกการติดตามตรวจสอบ การครอบครองที่ดินร่วมกับภาคประชาสังคม และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนมือผู้ครอบครอง และ 4.2) พัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชนให้สอดคล้องกับบริบทของแต่ละพื้นที่และทรัพยากรในท้องถิ่น

5. ด้านส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยรูปแบบการใช้ที่ดินให้เกิดความยั่งยืน ได้แก่ ส่งเสริมและให้การสนับสนุนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบริหารจัดการและรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ให้เกิดความยั่งยืน

สรุป

จากการศึกษาพบว่า สภาพปัญหาในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 สามารถจำแนกประเด็นปัญหาได้ 3 ประเด็น ดังนี้ 1) ปัญหาที่เกิดจากหน่วยงานที่รับผิดชอบ ได้แก่ อัตรากำลังไม่เพียงพอ การจัดสรรงบประมาณมีความล่าช้า เครื่องมือ และอุปกรณ์ไม่เพียงพอ เจ้าหน้าที่ขาดความรู้ ความเข้าใจ การประชาสัมพันธ์ไม่ทั่วถึง ฐานข้อมูลของประชาชนที่ครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ยังไม่ถูกต้อง ครบถ้วน สมบูรณ์ แนวเขตที่ดินมีการซ้อนทับกับที่ดินของรัฐประเภทอื่น ๆ และที่ดินตามประมวลกฎหมายที่ดิน 2) ปัญหาที่เกิดจากประชาชน ได้แก่ ประชาชนไม่ให้ความร่วมมือ ประชาชนขาดความรู้ ความเข้าใจ การเปลี่ยนมือผู้ครอบครอง ประชาชนบางกลุ่มไม่เห็นด้วยกับแนวทางการแก้ปัญหาเนื่องจากถูกลิดลอนสิทธิ์ และมีเงื่อนไขการใช้ประโยชน์ที่ดิน 3) ปัญหาทางด้านกฎหมายและนโยบาย ได้แก่ กฎหมายและนโยบายยังขาดความชัดเจนในทางปฏิบัติ กฎหมายยังมีความขัดแย้งกับนโยบายอื่นของรัฐบาล เช่น มติคณะรัฐมนตรีเมื่อวันที่ 3 สิงหาคม 2553 เรื่องแนวนโยบายในการฟื้นฟูวิถีชีวิตชาวกะเหรี่ยง มติคณะรัฐมนตรีว่าด้วยการฟื้นฟูวิถีชีวิตชาวเล 2 มิถุนายน 2553 เป็นต้น

โดยมีข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 สามารถแบ่งได้เป็น 5 ด้าน ได้จำนวน 9 ข้อ ดังนี้

1. ด้านพัฒนาและปรับปรุงกฎหมายและนโยบาย ได้แก่ 1.1) เร่งรัดการตราอนุบัญญัติ และระเบียบในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินของประชาชนให้มีความเหมาะสมและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ มีความสอดคล้องกับบริบทของสังคมและสภาพความเป็นจริงในปัจจุบัน บนพื้นฐานข้อมูลทางวิชาการเพื่อให้เอื้อต่อการแก้ไขปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ รวมถึงเปิดโอกาสให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ามามีส่วนร่วมในการร่างหรือจัดทำ และ 1.2) ปรับปรุงกฎหมาย ระเบียบ และนโยบายที่เป็นอุปสรรคต่อการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ 2. ด้านพัฒนากลไกและเครื่องมือในการบริหารงาน ได้แก่ 2.1) จัดทำแนวเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ที่ดินของประชาชน โดยการมีส่วนร่วมของภาคประชาสังคม และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 2.2) พัฒนาระบบฐานข้อมูลของประชาชนผู้ที่ได้รับการจัดสรรที่ดินให้สามารถติดตาม ตรวจสอบข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว โดยการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม และ 2.3) สร้างการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และการบริหารจัดการที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยการบูรณาการทั้งภาครัฐ เอกชน และประชาชน ให้มี

ส่วนร่วมในการกำหนดกรอบแนวทางในการดำเนินงาน และวางแผนร่วมกันในการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อให้เกิดความยั่งยืน 3. ด้านพัฒนาศักยภาพของเจ้าหน้าที่ ได้แก่ พัฒนาศักยภาพเจ้าหน้าที่ให้สามารถทำงานร่วมกับชุมชน หน่วยงานหรือองค์กรอื่น ๆ ได้ ด้วยการปรับทัศนคติและเพิ่มทักษะในการจัดการอย่างมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้ 4. ด้านพัฒนาการมีส่วนร่วมและการสร้างความเข้มแข็งให้แก่ชุมชน ได้แก่ 4.1) พัฒนากลไกการติดตาม ตรวจสอบการครอบครองที่ดินร่วมกับภาคประชาสังคม และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนมือผู้ครอบครอง และ 4.2) พัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชนให้สอดคล้องกับบริบทของแต่ละพื้นที่และทรัพยากรในท้องถิ่น 5) ด้านส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยรูปแบบการใช้ที่ดินให้เกิดความยั่งยืน ได้แก่ ส่งเสริมและให้การสนับสนุนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบริหารจัดการและรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ให้เกิดความยั่งยืน

สำหรับการวิจัยครั้งนี้ การจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการแก้ปัญหาการครอบครองที่ดินในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ตามมาตรา 64 พ.ร.บ. อุทยานแห่งชาติ พ.ศ. 2562 และมาตรา 121 พ.ร.บ. สงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2562 ได้มีการพิจารณาข้อมูลจากการตรวจเอกสารดังแสดงในส่วนการเก็บรวบรวมข้อมูลข้อ 1 การเก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้ให้ข้อมูลที่เป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลัก พร้อมทั้งการวิเคราะห์ทางวิชาการด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังแสดงในส่วนการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นข้อเสนอแนะเชิงนโยบายที่จำทำขึ้น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณผู้แทนจากหน่วยงานภาครัฐ องค์กรพัฒนาเอกชน/ประชาชน และนักวิชาการ ที่ให้ข้อมูลและให้การสัมภาษณ์เป็นอย่างดีและขอบคุณห้องปฏิบัติการรุกขกาลวิทยาเขตร้อน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนการปฏิบัติการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2562. แนวทางการแก้ไขปัญหาที่ดินของราษฎรในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ ตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน 2561. สำนักจัดการที่ดินและชุมชนในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ สำนักฟื้นฟูและพัฒนาพื้นที่อนุรักษ์, กรุงเทพฯ.

โสภณ ชมชาญ, กรณิศ นพรัตน์, โสภิณ ทองปาน. 2558. ปัญหาการอนุรักษ์พื้นที่ป่าไม้และการจัดที่ดินทำกิน: ยุทธศาสตร์ที่ต้องเปลี่ยนแปลงเพื่อความมั่นคงของชาติ. (โครงการวิจัย). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ.

นันทิยา หุตานุวัตร, ณรงค์ หุตานุวัตร. 2542. SWOT: การวางแผนกลยุทธ์ธุรกิจชุมชน. สถาบันชุมชนท้องถิ่นพัฒนา, กรุงเทพฯ.

ปาริชาต สถาปิตานนท์. 2545. ระเบียบวิธีวิจัยการสื่อสาร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สมยศ นาวีการ. 2551. การบริหารเชิงกลยุทธ์. สำนักพิมพ์บรรณกิจ 1991, กรุงเทพฯ.

ความสัมพันธ์ของปัจจัยสภาพภูมิอากาศจุลภาคและผลผลิตผักหวานป่า ในสวนผักหวานป่าปลูกร่วมไม้ต้น อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี

The relationship of microclimatic factors and yield of *Melientha sauvis* Pierre at tree-based alley farms in Ban Mo district, Saraburi province

เกศนีย์ เทือกตาทอง[a*], **พฤทธิ์ ราชรักษ์**[b], **วิรงรอง ดวงใจ**[a]

Ketsanee Tuaktatong[a*], Phruet Racharak[b], Wirongrong Duangjai[a]

[a] ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[b] ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[a] Department of Silviculture, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900

[b] Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900

*Corresponding author. E-mail address: ketsanee.tu@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสภาพภูมิอากาศจุลภาค (Microclimate) ในสวนผักหวานป่าที่ปลูกร่วมไม้ต้นและผลผลิตยอดผักหวานป่า ทำการเก็บข้อมูลรูปแบบการจัดการสวน ข้อมูลความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ภายในสวนในช่วงเมษายน-กรกฎาคม 2564 และรวบรวมข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากสถานีอุตุนิยมวิทยาใกล้เคียงย้อนหลัง 1 ปี ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศส่งผลต่อผลผลิตยอดผักหวานป่าทั้งเชิงบวกและเชิงลบค่าอยู่ระหว่าง -0.310 ถึง 0.329 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในเดือนก่อนหน้า ในขณะที่ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ อุณหภูมิในเดือนก่อนหน้า แม้ว่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงของแต่ละสวนแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ชี้ให้เห็นว่าแม้สภาพอากาศจุลภาคและการจัดการองค์ประกอบไม้ต้นปลูกร่วมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญก็ตามผลผลิตผักหวานป่าไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นผักหวานป่ามีศักยภาพเป็นพืชอาหารที่ให้ผลผลิตสม่ำเสมอเหมาะกับผู้ที่ปลูกไม้ต้นผสมผสานให้ได้ผลผลิตหลากหลายต่อไป

คำสำคัญ: ผักหวานป่า, ผลผลิต, ภูมิอากาศจุลภาค

Abstract

This study aims to navigate the relationship of microclimatic factors within tree-based alley farms of *Melientha sauvis* Pierre, with the growth and basal area of the companion trees and management patterns of the tree farms. Data collection were based on field survey and sensors were installed to collect data of light intensity, temperature and relative humidity for 4 months, April-July2021 and collects climate data from nearby meteorological stations of last 1 years. The results indicate that, the climatic factors affected both positive and negative relation on the yields ranging from -0.310 to 0.329. The factors negative correlation were the relative humidity of the previous month and positive correlation were the temperature in the previous month. Even though the temperature, relative humidity, and the light intensity of each alley farm were statistically significant at the 99% confidence level, indicating that *Melientha sauvis* Pierre, a native tree species of Thailand, has the potential to be a tree crop which produces consistent yields, while the microclimate factors are differences and plant composition is variations. Thus, this tree crop is suitable potentially for promoting to farmers who prefer managing variety of tree products.

Keywords: *Melientha sauvis* Pierre, Microclimatic, Yield

คำนำ

ผักหวานป่าจัดอยู่ในวงศ์ Opilaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Melientha Sauvis* Pierre เดิมเป็นไม้พื้นเมืองที่พบกระจายพันธุ์ในป่าธรรมชาติทั้งในพื้นที่ป่าไม้ผลัดใบและป่าดิบแล้งที่ระดับน้ำทะเลต่ำกว่า 600 เมตร พบเห็นได้บริเวณประเทศไทย ลาว เวียดนาม กัมพูชา มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และเกือบทุกภาคของประเทศไทย เช่น ภาคเหนือ ที่จังหวัดเชียงใหม่ ตาก เชียงราย ภาคกลาง ในเขตจังหวัดลพบุรี สระบุรี อุทัยธานี และภาคใต้ ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี (ณัฏฐากร และบัณฑิต, 2552) โดยทั่วไปมักเข้าใจผิดว่าผักหวานป่าเป็นชนิดเดียวกับผักหวานเมา หรือมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Urobotrya siamensis* Hiepko ซึ่งอยู่ในวงศ์ Opilaceae เช่นเดียวกัน และมีลักษณะภายนอกที่คล้ายคลึงกัน แต่ผักหวานเมามีความเป็นพิษ หากบริโภคในปริมาณมากอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ (Bunakkharasawat et al., 2019) อย่างไรก็ตาม ผักหวานป่าได้รับความนิยมบริโภคอย่างกว้างขวางตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูกาลที่มีผลผลิตไข่มดแดง

การปลูกพืชป่าหลายชนิดโดยเฉพาะพืชอาหารสามารถเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้ผู้ปลูกมามากกว่า 20 ปี ในอำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี ซึ่งเป็นแหล่งปลูกผักหวานป่ามากที่สุดในภาคกลาง ปัจจุบันมีรายงานพื้นที่ปลูกผักหวานป่ามากกว่า 2,354 ไร่ ซึ่งสร้างรายได้ให้ผู้ปลูกในแต่ละปีจำนวนมาก ทำให้เกิดแรงจูงใจให้มีผู้สนใจที่จะปลูกผักหวานป่าเพื่อเป็นรายได้เสริม (สำนักงานเกษตรอำเภอบ้านหมอ, 2565) เกษตรกรในประเทศไทยนิยมปลูกผักหวานป่าร่วมกับไม้ต้นหลากหลายชนิด เนื่องจากผักหวานป่าเป็นพืชเติบโตได้ในแสงรำไร ปริมาณแสงประมาณร้อยละ 50 จึงต้องอาศัยร่มเงาของไม้ใหญ่ เพื่อช่วยการเจริญเติบโตในช่วงระยะแรก อย่างไรก็ตาม การปลูกผักหวานป่าให้ได้ผลผลิตที่ดีและส่งเสริมผลประโยชน์ร่วมจากการปลูกไม้ต้นในพื้นที่เกษตรทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม จำเป็นที่จะต้องศึกษาสภาพภูมิอากาศและรูปแบบการจัดการไม้พี่เลี้ยง ซึ่งมีผลต่อการเติบโตทางธุรกิจที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาศักยภาพรูปแบบการจัดการไม้ต้นปลูกผสมผักหวานป่าต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ คือ อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี ตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของจังหวัดสระบุรี มีขนาดพื้นที่ 2,033.58 ตารางกิโลเมตร (กรมการปกครอง, 2565) ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นที่ราบลุ่ม มีความสูงอยู่ระหว่าง 9-17 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2555) มีลักษณะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด 3 ลักษณะ คือบริเวณที่ราบลุ่ม บริเวณเขาหย่อมหรือเขาเตี้ย และบริเวณเขาสูง ลักษณะดินโดยทั่วไปเป็นชุดดินท่าเรือ ซึ่งพบกระจายในจังหวัดสระบุรี ประกอบด้วย ดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายแป้ง ที่มีการระบายน้ำเลว หรือค่อนข้างเลว พื้นที่สวนผักหวานป่าส่วนใหญ่อยู่ในตำบลสร่างโศกและตำบลหนองบัว อำเภอบ้านหมอ มีรูปแบบการจัดการสวนเพื่อส่งขายยอดผักหวานป่าเชิงพาณิชย์ โดยปลูกผสมกับไม้ต้นเพื่อให้ร่มเงาและเป็นไม้พี่เลี้ยงให้กับผักหวานป่าในช่วงเริ่มจัดตั้งสวนผักหวานป่า Fig. 1 แสดงสภาพพื้นที่สวนผักหวานป่าพื้นที่ศึกษา 3 สวน ที่ถือว่าเป็นสวนที่เริ่มมีการปลูกไม้ต้นผสมผสานในสวนผักหวานป่าของอำเภอบ้านหมอ

(A) (B) (C)

Fig. 1 Study sites: (A) Site study 1 (Alley Farm 1); (B) Site study 2 (Alley Farm 2); (C) Site study 3 (Alley Farm 3).

รายงานจากกรมอุตุนิยมวิทยา (2565) ระบุว่า จังหวัดสระบุรีมีอุณหภูมิเฉลี่ย 27-30 องศาเซลเซียส และมีปริมาณน้ำฝนรวมตลอดทั้งปีเฉลี่ยในช่วง 1,200-1,400 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาใกล้เคียงพื้นที่ศึกษา รายงาน ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์รายเดือน ปี พ.ศ.2563-2564 พบว่า ปริมาณน้ำฝนรวม

2 ปีเท่ากับ 904.4 และ 1,282.6 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในปี 2565 ตามลำดับ ปริมาณน้ำฝนมาก ช่วงเดือนมีนาคม-พฤศจิกายน มีความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุดในเดือนกันยายน-ตุลาคม อุณหภูมิสูงที่สุดช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม และลดลงในเดือนมิถุนายน (Fig. 2)

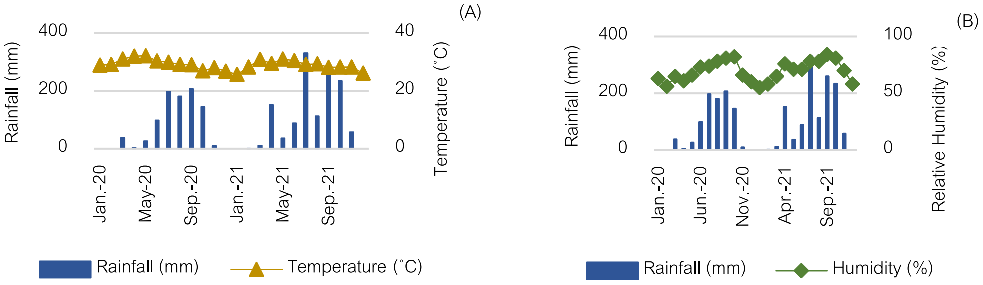


Fig. 2 Climate of Ban Mo district, Saraburi Province: (A) Rainfall and temperature; (B) Rainfall and relative Humidity in year 2020–2021

วิธีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

คัดเลือกแปลงตัวอย่างที่เป็นตัวแทนรูปแบบเฉพาะของการปลูกผักหวานป่าในอำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี 3 แห่ง 3 ทรีทเม้น (Treatments) คือมีรูปแบบการปลูกและการจัดการผักหวานป่าร่วมกับไม้พี่เลี้ยงชนิดและจำนวนที่แตกต่างภายในพื้นที่จัดการสวน 40×40 เมตร (1 ไร่) เพื่อสำรวจพื้นที่ทั้งหมดของแต่ละสวนและจัดทำบัญชีรายชื่อชนิดไม้ต้นที่ปลูกร่วมในสวนผักหวานป่า และภายใน 1 treatment วางแปลงย่อยขนาด 10×10 เมตร จำนวน 3 ซ้ำ (Repeats) เพื่อเก็บยอดผักหวานป่าทุกต้นภายในแปลงย่อยและชั่งน้ำหนัก จำนวน 3 ครั้ง 1 เดือน เก็บข้อมูลปัจจัยภูมิอากาศจุลภาค โดยติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอุณหภูมิและความเข้มแสง (HOBO Pendant Temperature/Light 64K Data Logger) และเครื่องมือตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (HOBO U23 Pro V2 Temperature/Relative Humidity Data Logger) 4 จุดย่อยต่อทรีทเม้น โดยจุดที่ 1 ติดตั้งเครื่องมือบริเวณพื้นที่เปิดโล่งไม่มีไม้ต้นอยู่ภายในรัศมี 5 เมตร จุดที่ 2 ติดตั้งเครื่องมือบริเวณกึ่งกลางระหว่างแถว ไม่มีไม้ต้นอยู่ภายในรัศมี 2 เมตร จุดที่ 3 ติดตั้งเครื่องมือบริเวณระหว่างเรือนยอดของไม้ต้นโดยไม่มีไม้ต้นอยู่ในรัศมี 1 เมตร และจุดที่ 4 ติดตั้งเครื่องมือบริเวณใต้รัศมีเรือนยอดไม่เกิน 0.5 เมตร เก็บข้อมูลต่อเนื่อง 15 วัน และรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำฝน สภาพภูมิอากาศมหภาค (Macroclimate) จากสถานีอุตุนิยมวิทยาใกล้เคียง นำข้อมูลสภาพภูมิอากาศมหภาคและจุลภาค ผลผลิตยอดผักหวานป่ามาวิเคราะห์ค่าทางสถิติทั้งสถิติเชิงพรรณนาในรูปแบบแจกแจงความถี่เป็นค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้สถิติอ้างอิงแบบไม่มีพารามิเตอร์ แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) และวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยภูมิอากาศจุลภาคภายในสวนและการจัดการสวนผักหวานป่าปลูกร่วมไม้ต้นชนิดต่าง ๆ โดยใช้ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA analysis) โดยใช้โปรแกรม R เวอร์ชั่น 4.2.2

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

รูปแบบการจัดการผักหวานป่าปลูกผสมไม้ต้น

รูปแบบการปลูกและการจัดการไม้ต้นในสวนผักหวานป่า 3 สวน มีลักษณะเฉพาะและมีความหลากหลายของสัดส่วนชนิดไม้ที่ปลูกร่วม สวนที่ 1 พื้นที่ 8,000 ตารางเมตร มีจำนวนชนิดและรูปแบบการปลูกไม้ต้นต่อพื้นที่น้อยที่สุด และส่วนใหญ่ปลูกไม้ต้น มะขามเทศ ระยะ 6×10 เมตร มีความหนาแน่น 21 ต้น/ไร่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเฉลี่ย 17.62 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 8.02 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด (Basal area, BA) เท่ากับ 1.31 ตารางเมตร และมีการปลูกผักหวานป่าในระยะ 1×1 เมตร มีความหนาแน่น 1,600 ต้น/ไร่ ในขณะที่สวนที่ 2 พื้นที่ 11,200 ตารางเมตร มีรูปแบบการปลูกไม้ต้นผสมผักหวานป่าแบบเป็นแถวเป็นแนว และมีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ โดยไม้ต้นปลูกที่ระยะห่าง 5x8 เมตร มีความหนาแน่น 40 ต้น/ไร่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเฉลี่ย 21.29 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 7.50 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด (Basal area, BA) เท่ากับ 1.45 ตารางเมตร และปลูกผักหวานป่าในระยะ 1.2×1.2 เมตร ความหนาแน่น 1,089 ต้น/ไร่ และสวนที่ 3 พื้นที่ 14,400 ตารางเมตร มีรูปแบบการปลูกเป็นแถวเป็นแนว โดยปลูกไม้

พี่เลี้ยงหลากหลายชนิด ปลูกไม้ต้นเพื่อเป็นไม้พี่เลี้ยงระยะ 6×6 เมตร มีความหนาแน่น 42 ต้น/ไร่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 17.04 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 7.34 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด (Basal area, BA) เท่ากับ 1.38 ตารางเมตร และ ระยะการปลูกผักหวานป่า 1×1.5 เมตร ความหนาแน่น 1,040 ต้น/ไร่ (Table 1)

Table 1 Management patterns of *Melientha sauvis* Pierre tree-based alley farms

Management Patterns	Alley Farm 1	Alley Farm 2	Alley Farm 3
Area (m^2)	8,000	11,200	14,400
Spacing of Pak Wan Pa (m. × m.)	1x1	1.2x1.2	1x1.5
Spacing of companion tree (m. × m.)	6x10	5x8	6x6
Density of *Melientha sauvis* Pierre (tree/rai)	1,600	1,089	1,040
Density of companion tree (tree/rai)	21	40	42
Variety of companion tree (species)	3	8	8
Average DBH of companion tree (cm.)	17.62	21.29	17.04
Average height of companion tree (m.)	8.02	7.50	7.34
Basal area of companion tree (m^2)	1.31	1.45	1.38

ชนิดไม้ต้นปลูกร่วมกับผักหวานป่า

ไม้ต้น (tree) ที่เกษตรกรผู้ปลูกผักหวานป่าสวนที่ 1 นำมาปลูกร่วมมากที่สุด คือ มะขามเทศ (*Pithecellobium dulce*) คิดเป็นร้อยละ 90 ของชนิดไม้ต้นที่ปลูกทั้งหมด รองลงมาคือ เพกา (*Oroxylum indicum*) และขนุน (*Artocarpus heterophyllus*) ร้อยละ 4.76 เช่นเดียวกับสวนที่ 2 มะขามเทศมีสัดส่วนการปลูกร่วมมากที่สุด ร้อยละ 58 รองลงมา คือ สะเดา (*Azadirachta indica*) ร้อยละ 22.5 และเพกา ร้อยละ 7.5 ในขณะที่สวนที่ 3 ปลูกปอกระสา (*Broussonetia papyrifera*) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 30.95 รองลงมา คือ ผ่าเสี้ยน (*Vitex canescens*) ร้อยละ 28.57 และมะขามเทศ ร้อยละ 26.19 (Fig. 3)

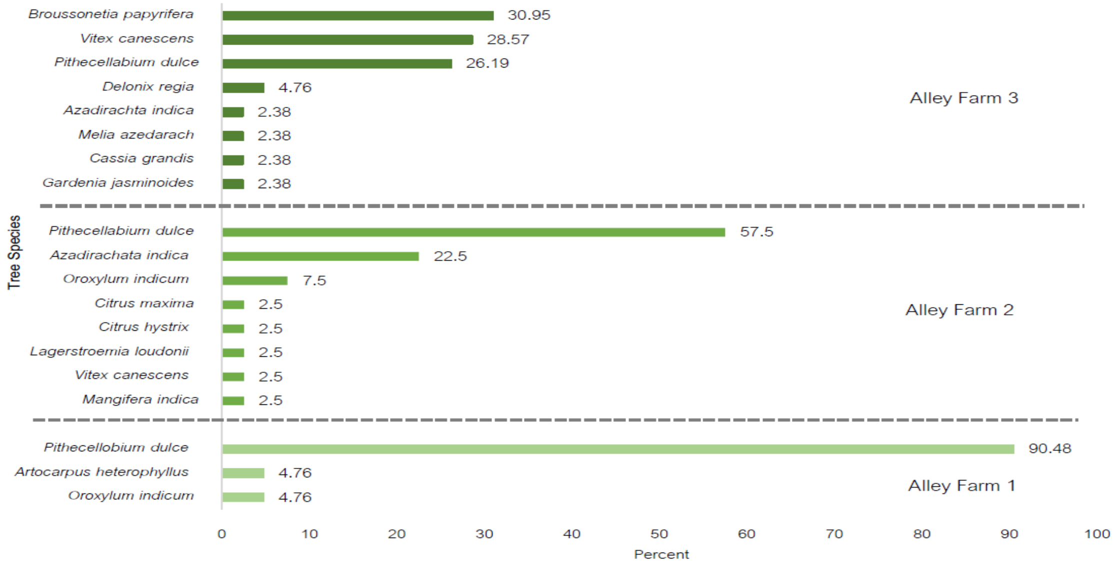


Fig. 3 Comparison of tree species planted in the alley farms of *Melientha sauvis* Pierre

สภาพภูมิอากาศขนาดย่อมในสวนผักหวานป่า

ความเข้มแสง

จากการศึกษาความเข้มแสงบริเวณ 3 สวน พบว่า สวนที่ 1 มีค่าความเข้มแสงเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือ สวนที่ 2 และสวนที่ 3 โดยมีค่าเท่ากับ 2,329±1,984 2,183±1,887 และ 1,684±1,566 (lum/ft²) ตามลำดับ (Table 2) โดยความเข้มแสงของแต่ละสวนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (Fig. 4) จากผลการศึกษานี้น่าจะส่งผลต่อผลผลิตยอดผักหวานป่าและการเจริญเติบโตของไม้ต้นที่ปลูกร่วมกันในสวน ในรูปของ

การเปลี่ยนแปลงทางด้านความสูง ความโต การเปลี่ยนแปลงขนาดของใบและโครงสร้างของลำต้นที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลผลิตใบผักหวานป่า ความเข้มแสงอาจไม่ได้ส่งผลมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ นรากร และสาพิศ (2553) ที่ระบุว่าความเข้มแสงแม้จะมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตและมวลชีวภาพส่วนต่าง ๆ แต่ไม่ส่งผลต่อมวลชีวภาพของใบและรากของกล้าไม้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ความเข้มแสงจะส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างลำต้นต่อราก (shoot/root ratio) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ผลข้อสรุปจากการศึกษาของ Asanok et al. (2019) พบว่า แสงแดด เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความหลากหลายด้านหน้าที่ (Functional) จะส่งผลให้พืชที่มีความต้องการแสงมากทำให้ ขนาดใบ พื้นที่ใบจำเพาะ และความหนาของใบเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิ

อุณหภูมิเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช ตั้งแต่พืชเริ่มงอกจนกระทั่งออกดอกติดผล อุณหภูมิเกี่ยวข้องกับขบวนการงอกของเมล็ด การสังเคราะห์แสง การหายใจ และการพักตัว เป็นต้น พืชแต่ละชนิดมีความต้องการอุณหภูมิที่ใช้ในการเจริญเติบโตแตกต่างกัน อุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช มีทั้งอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิในดิน ผลการศึกษา พบว่า อุณหภูมิในสวนที่ 1 มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงที่สุดคือ 30.60±5.62 รองลงมาคือ สวนที่ 2 และสวนที่ 3 ซึ่งมีอุณภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 29.10±5.01 และ 25.60±1.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Table 2) ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบชนิดไม้ต้นที่ปลูกร่วมผักหวานป่าในแต่ละสวนจะพบว่าสวนที่ 3 ปลูกไม้ต้นผ่าเสี้ยน (*Vitex canescens*) ซึ่งมีขนาดเรือนยอดกว้างและมีความหนาแน่นต่อพื้นที่สูง ทำให้สวนมีร่มเงามากอุณหภูมิเฉลี่ยภายในพื้นที่จึงต่ำกว่า 2 สวนที่มีการปลูกไม้ต้นส่วนใหญ่คือมะขามเทศ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิอาจจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นผักหวานป่าที่แตกต่างกันเมื่อแต่ละสวนที่มีอุณหภูมิสูง-ต่ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (Fig. 4) เมื่อเทียบเคียงผลการศึกษาของ รุ่งนภา และโสระยา (2552) ที่ระบุว่าอุณหภูมิกลางวันที่ต่างกันมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชในช่วงระยะการเจริญทางด้านลำต้นจนกระทั่งระยะออกดอก อุณหภูมิที่สูงกว่าจะทำให้พืชเพิ่มความสูง จำนวนใบต่อต้น ความยาวใบ ความยาวก้านดอก ขนาดดอกช่อ

ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ สวนที่ 3 มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด ร้อยละ 89.50±11.60 รองลงมาคือ สวนที่ 2 และสวนที่ 1 โดยมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ร้อยละ 80.50±14.00 และ 65.90±17.00 ตามลำดับ พบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (Table 2 และ Fig. 4) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ลิลลี่ และคณะ (2552) ระบุว่าความชื้นสัมพัทธ์ ของอากาศในแต่ละช่วงเวลาของวันจะมีความแตกต่างกัน ทำให้อัตราการคายน้ำของพืช และการระเหยน้ำของใบในแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกัน ในกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้ปริมาณน้ำในใบ (Leaf Water Content, LWC) ลดลง เนื่องจากพืชมีการคายน้ำสูงและส่งผลให้การสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความชื้นในดิน คือถ้าดินมีความชื้นสูง พืชสามารถดูดน้ำไปใช้ในการแทนที่ได้ทัน ก็จะทำให้เกิดการคายน้ำได้มาก และปากใบจะเปิด แต่ถ้าดินมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ พืชไม่สามารถดูดน้ำเข้าไปแทนที่ได้ทัน พืชก็จะหรี่หรือปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ จากข้อสรุปดังกล่าวทำให้คาดการณ์ได้ว่าสวนที่ 1 ซึ่งผลการศึกษาพบว่ามีความชื้นสัมพัทธ์ภายในสวนผักหวานป่าต่ำที่สุด น่าจะส่งผลให้มีการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง หากเจ้าของสวนไม่มีการให้น้ำที่สม่ำเสมอ

Table 2 Comparison of microclimatic factors with distinguished *Melientha sauvis* Pierre tree-based alley farms

Microclimatic factors	Alley Farm 1	Alley Farm 2	Alley Farm 3	p-value
		(Mean±S.D.)		
Temperature	30.60±5.62^{a}	29.10±5.01^{b}	25.60±1.58^{c}	<2e-16 ***
Light Intensity	2,329±1,984^{a}	2,183±1,887^{b}	1,684±1,566^{c}	<2e-16 ***
Relative humidity	65.90±17.00^{a}	80.50±14.00^{b}	89.50±11.60^{c}	<2e-16 ***

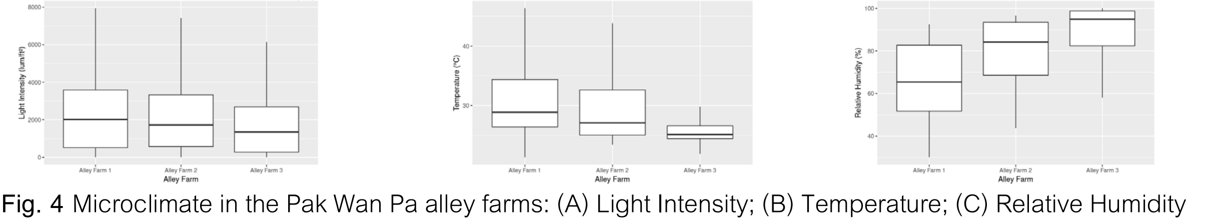
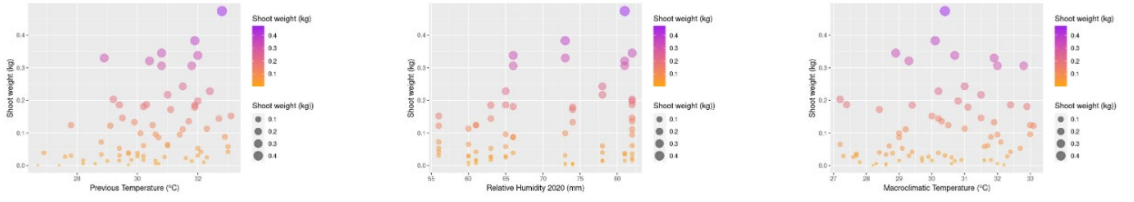


Fig. 4 Microclimate in the Pak Wan Pa alley farms: (A) Light Intensity; (B) Temperature; (C) Relative Humidity

ความสัมพันธ์ของสภาพภูมิอากาศมหภาคและสภาพภูมิอากาศจุลภาคกับผลผลิตยอดผักหวานป่า

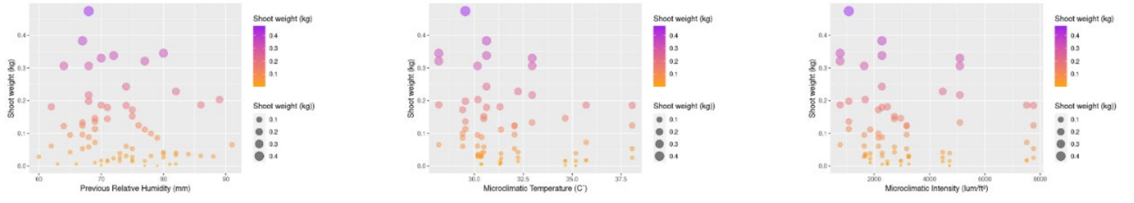
ปัจจัยสภาพภูมิอากาศจุลภาคและมหภาค มีความสัมพันธ์เชิงบวกและเชิงลบกับผลผลิตผักหวานป่า ค่าอยู่ระหว่าง -0.310 ถึง 0.329 โดยปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับผลผลิตผักหวานป่ามากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิในเดือนก่อนหน้า มีค่าเท่ากับ 0.329 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในปีก่อนหน้า (มหภาค) อุณหภูมิในช่วงเวลาที่เก็บผลผลิต (มหภาค) ความชื้นสัมพัทธ์ (จุลภาค) อุณหภูมิในปีก่อนหน้า (มหภาค) และปริมาณน้ำฝนในเดือนก่อนหน้า (มหภาค) มีค่าเท่ากับ 0.255 0.179 0.168 0.064 และ 0.053 ตามลำดับ (Fig. 5A) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหากปัจจัยเหล่านี้มีค่าสูง ค่าน้ำหนักผลผลิตที่เก็บได้จะสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับผลผลิตผักหวานป่ามากที่สุด ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในเดือนก่อนหน้า มีค่าเท่ากับ -0.310 อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือ อุณหภูมิ (จุลภาค) ความเข้มแสง (จุลภาค) ความชื้นสัมพัทธ์ (มหภาค) ปริมาณน้ำฝนในปีก่อนหน้า (มหภาค) และปริมาณน้ำฝนในช่วงเวลาที่เก็บผลผลิต (มหภาค) มีค่าเท่ากับ -0.238 -0.161 -0.154 -0.148 และ -0.056 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหากปัจจัยเหล่านี้มีค่าสูง ค่าน้ำหนักผลผลิตที่เก็บได้จะแปรผกผัน นั่นคือค่าน้ำหนักผลผลิตที่เก็บได้จะมีค่าต่ำ (Fig. 5B)



Coefficients 0.329; p-value 0.004 | Coefficients 0.255; p-value 0.030 | Coefficients 0.179; p-value 0.132

Coefficients 0.168; p-value 0.158 | Coefficients 0.064; p-value 0.592 | Coefficients 0.053; p-value 0.657

(A) Positive relationship



Coefficients -0.310; p-value 0.008 | Coefficients -0.238; p-value 0.044 | Coefficients -0.161; p-value 0.177

Coefficients -0.154; p-value 0.195 | Coefficients -0.148; p-value 0.215 | Coefficients -0.056; p-value 0.640

(B) Negative relationship

Fig. 5 The relationship of young shoots and microclimatic factors: (A) Positive relationship; (B) Negative relationship

ซึ่งในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสภาพภูมิอากาศมหภาคและจุลภาค พบว่า อุณหภูมิอากาศ (จุลภาค) จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอากาศ (มหภาค) ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ (มหภาค) จะแปรผกผันกับอุณหภูมิอากาศ (มหภาค) อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในเรื่องการจัดการสวนผักหวานป่าเพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำหนักดีต้องมีการรักษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ก่อนเริ่มช่วงการเก็บเกี่ยวจนสิ้นสุดช่วงการเก็บเกี่ยว หากมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมากจะส่งผลให้ผลผลิตน้อย (Fig. 6) จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยสภาพภูมิอากาศจุลภาคและมหภาคจะเห็นว่าปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับผลผลิตผักหวานป่าทั้งเชิงบวกและเชิงลบในระดับน้อย จึงต้องศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลปัจจัย

อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม ซึ่งปัจจุบันมีการนำผักหวานป่ามาปลูกทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย ภาคเหนือ ได้แก่ เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ตาก ลำพูน ลำปาง ภาคกลาง ได้แก่ สระบุรี กาญจนบุรี ภาคอีสาน ได้แก่ นครราชสีมา นครพนม อุดรธานี สกลนคร และภาคใต้ ได้แก่ กระบี่ สุราษฎร์ธานี เป็นต้น (สุพรรณษา, 2560)

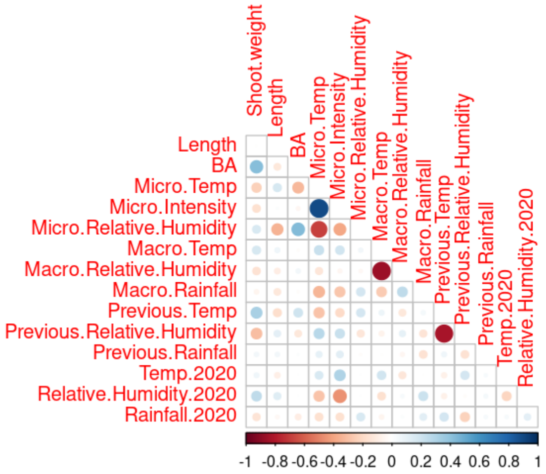


Fig. 6 The relationship of young shoots and microclimatic factors and basal area of companion trees

ทั้งนี้จากข้อมูลการกระจายพันธุ์ของผักหวานป่าตามธรรมชาติ มะโนลม และคณะ (2565) สรุปว่าผักหวานป่ามีการกระจายพันธุ์มากในพื้นที่ป่าเต็งรัง ปัจจัยแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อการกระจายของผักหวานป่า คือ อนุภาคขนาดทราย ทองแดงและแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ นอกจากนี้ ชนิดพันธุ์ที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับต้นแม่พันธุ์ผักหวานป่า ได้แก่ ก่อแพะ (*Quercus kerrii*) และแข้งกวางดง (*Wendlandia paniculata)* และปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงลบ ได้แก่ ความลาดชัน ความห่างไกลจากแหล่งน้ำ และความเป็นกรด-ด่างของดิน นอกจากนี้ปัจจัยด้านมนุษย์ (Anthropogenic factors) เกี่ยวกับรูปแบบการปลูกและการจัดการสวนผักหวานป่า ทั้งในช่วงก่อนฤดูและในฤดูเก็บเกี่ยวผลผลิต การใช้หลักวนวัฒนวิธีจัดการสวนเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดี เช่น การลิดกิ่ง การรูดใบแก่ และการเก็บยอดอ่อน การตัดขยายระยะ และจัดการช่องแสง รวมถึงการดูแลและจัดการสวน เช่น การรดน้ำใส่ปุ๋ยบำรุงเพิ่มธาตุอาหารในดิน เพื่อให้ต้นผักหวานป่าพร้อมสำหรับการแตกยอดอ่อนในฤดูกาลเก็บผลผลิต และวิธีการเก็บข้อมูลผลิตยอดผักหวานป่าสามารถนับจำนวนใบซึ่งจะส่งผลต่อน้ำหนักยอดอ่อนตามผลการศึกษาของ Long et al. (2022) ที่ทำการศึกษาผลผลิตของยอดชา พบว่า จำนวนใบมีความสัมพันธ์อย่างมากกับน้ำหนักต่อยอด โดยยอดชาที่มีใบอ่อน 3 ใบ มีค่ามากกว่า 1 ใบ และ 2 ใบ และในฤดูร้อนและฤดูใบไม้ร่วงมากกว่าในฤดูใบไม้ผลิ ในขณะที่ยอดชาที่มีใบอ่อน 1 ใบ มีความหนาแน่นของยอดอ่อนมากที่สุด และความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงที่สุด ดังนั้นการศึกษาปัจจัยแวดล้อมด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ลักษณะดิน ปริมาณธาตุอาหารในดิน รวมถึงปัจจัยทางด้านมนุษย์ หรือการจัดการสวนผักหวานป่า เช่น การรดน้ำ การใส่ปุ๋ย การลิดกิ่ง การเด็ดใบ การตัดต้นให้เหลือแต่ตอ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทำสาวผักหวานป่า เป็นต้น ทั้งนี้ ควรศึกษาครอบคลุมถึงการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล

สรุป

แม้ว่ารูปแบบการทำสวนผักหวานป่ามีการปลูกไม้ต้นร่วมแตกต่างกันทั้งองค์ประกอบชนิดไม้ต้นและระยะปลูกระหว่างไม้ต้นและผักหวานป่าจะทำให้เกิดสภาพภูมิอากาศจุลภาค ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง และอุณหภูมิ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หากแต่ความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวส่งผลน้อยทั้งทางบวกและทางลบกับผลผลิตผักหวานป่า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณเกษตรกรผู้ปลูกผักหวานป่า ในอำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการศึกษา และสำนักงานเกษตรอำเภอบ้านหมอ สำหรับข้อมูล คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมการปกครอง. 2565.ข้อมูลพื้นที่อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี. https://www.amphoe.com/dods/front/base/html/page-unit.php?catm=19060000, 19 พฤศจิกายน 2565.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2555. เขตการใช้ที่ดิน ตำบลสร่างโศก อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี. http://r01.ldd.go.th/data/รายงานตำบล/สระบุรี/อ.บ้านหมอ/ต.สร่างโศก.pdf, 12 พฤศจิกายน 2565.

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2565. ภูมิอากาศจังหวัดสระบุรี. http://climate.tmd.go.th/data/province/กลาง/ภูมิอากาศสระบุรี.pdf, 12 พฤศจิกายน 2565.

ณัฏฐากร เสมสันทัด, บัณฑิต โพธิ์น้อย. 2552. ผักหวานป่า (*Melientha Sauvis* Pierre). กลุ่มงานวนวัฒนวิจัย สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้, กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

นรากร ศรีเลิศ,สาพิศ ดิลกสัมพันธ์. 2553. การเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยาของกล้าไม้ยูคาลิปตัส 4 สายต้นภายใต้ความเข้มแสงที่แตกต่างกัน. วารสารวนศาสตร์ 30(2): 15–26.

มะโนลม วงแสนแก้ว, สุธีระ เหิมฮึก, วิชญ์ภาส สังพาลี, เกรียงศักดิ์ ศรีเงินยวง, ขนิษฐา เสถียรพีระกุล. 2565. การประเมินศักยภาพถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่า ตามปัจจัยแวดล้อมบางประการในพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 14(2): 513–528.

รุ่งนภา ช่างเจรจา,โสระยา ร่วมรังษี. 2552. ผลของอุณหภูมิกลางวันและกลางคืนต่อการเจริญเติบโตและการออกดอกของปทุมมา. วารสารเกษตร 25(1): 1–7.

ลิลลี่ กาวีต๊ะ,มาลี ณ นคร, ศรีสม สุวรรณวงศ์สุรียา ตันติวิวัฒน์. 2552. สรีรวิทยาของพืชม พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 261 น.

สำนักงานเกษตรอำเภอบ้านหมอ. 2565. ข้อมูลพื้นฐานด้านการเกษตร อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี. http://banmo.saraburi.doae.go.th/database%20banmo.html, 19 พฤศจิกายน 2565.

Asanok, L., Kamyo, T., Marod, D. 2019. Environmental factors related to community-level functional traits in limestone hill forests along an altitudinal gradient: A case study in northern Thailand. Forestry Studies. 71(1): 86–99. doi.org/10.2478/fsmu-2019-0014

Bunakkharasawat, W., Panok, L., Panvisavas, N. 2019. Genetic discrimination of the poisonous *Urobotrya siamensis* from the Greenleaf vegetable 'Pak-wan'. Forensic Sci. Int.: Genet. 7(1): 730–731. doi.org/10.1016/j.fsigss.2019.10.154

Long, L., Shi, Y., Ma, L., Ruan, J. 2022. Characterization of young shoot population, yield, and nitrogen demands of tea (*Camellia sinensis* L.) harvested under different standards. Horticulturae 8(4): 275. doi.org/10.3390/horticulturae8040275

การพัฒนากูเกิลแอปพลิเคชันสำหรับระบบรายงานสภาพอากาศ ณ สถานีควบคุมไฟป่าห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง

Development of google applications for weather report system at Huai Hong Krai-Khun Mae Kuang Forest Fire Control Station

ศุภกิตติ์ โก่งเกศร*, **ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล**

Supakit Kongkasorn*, Laddawan Rianthakool

ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. Email address: supakit.ko@ku.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาระบบในการรายงานข้อมูลสภาพอากาศของสถานีควบคุมไฟป่าห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงในครั้งนี้ ได้นำกูเกิลแอปพลิเคชันมาใช้ในการนำเข้า จัดการ และนำเสนอข้อมูล ซึ่งสามารถทำงานผ่านระบบอินเทอร์เน็ตบนโทรศัพท์มือถือได้ โดยการนำเข้าข้อมูลสภาพอากาศจากพื้นที่จริงผ่านการกรอกแบบฟอร์มของ Google Form แล้วจัดเก็บข้อมูลใน Google Drive ซึ่งสามารถจัดการข้อมูลได้ผ่าน Google Sheets จากนั้นนำเสนอข้อมูลด้วยภาพใน Google Data Studio มีการประเมินความพึงพอใจของเจ้าหน้าที่ผู้นำเข้าข้อมูลและผู้ใช้งานที่ได้ทดสอบการใช้งานการแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศด้วยภาพ ผลการศึกษาพบว่าระบบรายงานสภาพอากาศใช้งานได้ สามารถนำเข้าข้อมูลและแสดงผลข้อมูลด้วยภาพได้ ช่วยลดขั้นตอนการทำงานของเจ้าหน้าที่และผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย โดยมีผลการประเมินความพึงพอใจต่อระบบของเจ้าหน้าที่ผู้บันทึกข้อมูลอยู่ในระดับที่ 5 (ดีมาก) และผู้ใช้งานมีภาพรวมความพึงพอใจต่อการนำเสนอข้อมูลด้วยภาพอยู่ในระดับที่ 4.51 (ดีมาก)

คำสำคัญ: การนำเสนอข้อมูลด้วยภาพ, กูเกิลแอปพลิเคชัน, ข้อมูลสภาพอากาศ, แดชบอร์ด

Abstract

The development of a system for reporting the weather data at Huai Hong Krai-Khun Mae Kuang Forest Fire Control Station this time brought Google applications to import, manage and present the data. That can work through the internet on mobile phones by importing weather data from Google Form filling, storing data in Google Drive, that can manage in Google Sheets, and then visually presenting the data in Google Data Studio. Assessment of satisfaction in this weather reporting system from the staff who import data and user that test this weather reporting system. The result is weather reporting system works. Data can be imported and displayed visually. This reduces the workflow of staff and users can access information easily. The result from staff who recorded the system was at 5 (very satisfied). And users are overall satisfied to the presentation of information with images at 4.51 (very satisfied).

Keywords: Dashboard, Data visualization, Google applications, Weather data

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกส่งผลให้อุณหภูมิและสภาพอากาศแต่ละพื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ในพื้นที่ป่าไม้เองข้อมูลสภาพอากาศในแต่ละแห่งก็มีความแตกต่างกันและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศด้วยเช่นเดียวกัน (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2560) การบันทึกข้อมูลสภาพอากาศจึงมีความสำคัญเพราะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรวมถึงเห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง หน่วยงานทางป่าไม้หลายหน่วยงาน เช่น สถานีควบคุมไฟป่า หน่วยต้นน้ำ อุทยานแห่งชาติ และหน่วยพิทักษ์ป่าไม้ เป็นต้น ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากข้อมูลสภาพอากาศในบริเวณสถานีควบคุมไฟป่า สามารถใช้เป็นปัจจัยคาดการณ์การเกิดไฟป่า และการวางแผนควบคุมไฟป่า ซึ่งหลายสถานีควบคุมไฟป่าได้มีการติดตั้งสถานีตรวจวัดอากาศมีการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และการระเหยสุทธิ เป็นต้น หลายหน่วยงานดังกล่าวยังใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพอากาศแบบเดิม คือ ให้เจ้าหน้าที่อ่านหรือวัดค่าจากอุปกรณ์แล้วจดบันทึกข้อมูลลงกระดาษหรือคอมพิวเตอร์ในช่วงเวลาที่กำหนด เช่น บางหน่วยงานจดบันทึกข้อมูลทุกวันในเวลา 16:00 น. เป็นต้น และแสดงผลข้อมูลโดยจัดทำรายงานเป็นรูปเล่มหรือนำเสนอเป็นภาพกราฟข้อมูล ซึ่งมีขั้นตอนในการนำเข้าและจัดการข้อมูลหลายขั้นตอน รวมถึงมีข้อจำกัดในการนำเสนอและเผยแพร่ข้อมูลที่เป็นประโยชน์นี้

กูเกิล เป็นบริษัทผู้พัฒนาซอฟแวร์ที่มีผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมายทั้งที่ให้บริการฟรี หรือแบบมีค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่สามารถใช้งานออนไลน์ผ่านอินเทอร์เน็ตโดยเก็บข้อมูลไว้ในระบบคลาวด์ (Cloud) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของกูเกิล เช่น Gmail, Youtube, Google Docs และ Google Sheets เป็นต้น (Google, 2022) มีการนำซอฟแวร์ของกูเกิลมาประยุกต์ใช้ในหลายงาน เช่น การบันทึกข้อมูลผ่าน Google form เพื่อลดการใช้กระดาษและสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์หรือจัดการข้อมูลต่อได้ทันทีหลังการนำเข้าข้อมูล (จิราณัฏฐ์, 2562; บัวพรรณ และศศิวรรณ, 2564) การแสดงผลข้อมูลด้วยภาพ (Data visualization) ผ่าน Google Data Studio ที่สามารถแสดงผลได้อย่างรวดเร็วผ่านโทรศัพท์มือถือและอัปเดตข้อมูลให้เป็นปัจจุบันได้อยู่เสมอ (กมลชนก และคณะ, 2563; บัวพรรณ และศศิวรรณ, 2564)

จากข้อดีของผลิตภัณฑ์จากกูเกิล ผู้วิจัยจึงได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาระบบรายงานสภาพอากาศ ณ สถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง ตั้งอยู่ในพื้นที่ต้นน้ำ และในบริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยฮ่องไคร้อันเนื่องมาจากพระราชดำริ การรายงานสภาพอากาศจากสถานีควบคุมไฟป่าแห่งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการคาดการณ์การเกิดไฟป่ารวมถึงเป็นข้อมูลให้กับสถานที่โดยรอบ เพื่อการจัดการพื้นที่ บริการ หรือการวางแผนต่าง ๆ ซึ่งสถานีควบคุมไฟป่าห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงมีการจดบันทึกข้อมูลสภาพอากาศ ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิ (°C) ปริมาณน้ำฝน (มม.) ความชื้นสัมพัทธ์ (%) ค่าระเหยสุทธิ และข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) และยังใช้วิธีการจดบันทึกแบบเดิมคือ จดบันทึกลงกระดาษ และนำเข้าข้อมูลในโปรแกรม Microsoft Excel แล้วจัดทำรายงานเป็นรูปเล่ม งานวิจัยนี้จะใช้ Google Form, Google Sheets, Google Drive และ Google Data Studio ในการนำเข้า จัดการ และแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศเพื่อให้เกิดความสะดวก และรวดเร็วกับเจ้าหน้าที่ และเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลสภาพอากาศของสถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง นอกจากนี้ระบบการรายงานสภาพอากาศนี้จะเป็นต้นแบบในการนำเสนอข้อมูลสภาพอากาศในพื้นที่ป่าไม้ เพื่อให้ตระหนักถึงภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก อีกทั้งยังเป็นข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการวางแผนพัฒนาพื้นที่ป่าไม้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือที่ใช้

จากการทดลองเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์ของกูเกิล ได้แก่ Google Form, Google Sheets, Google Drive และ Google Data Studio เครื่องมือตรวจวัดสภาพอากาศและค่าฝุ่นละอองที่ทำการสถานีควบคุมไฟป่า เครื่องมือตรวจวัดสภาพอากาศที่หน่วยดับไฟป่า และโทรศัพท์มือถือและเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถเชื่อมต่อกับสัญญาณอินเทอร์เน็ตได้

วิธีการ

การพัฒนาระบบรายงานสภาพอากาศมีขั้นตอนการดำเนินงานดัง Fig. 1 มีรายละเอียดดังนี้

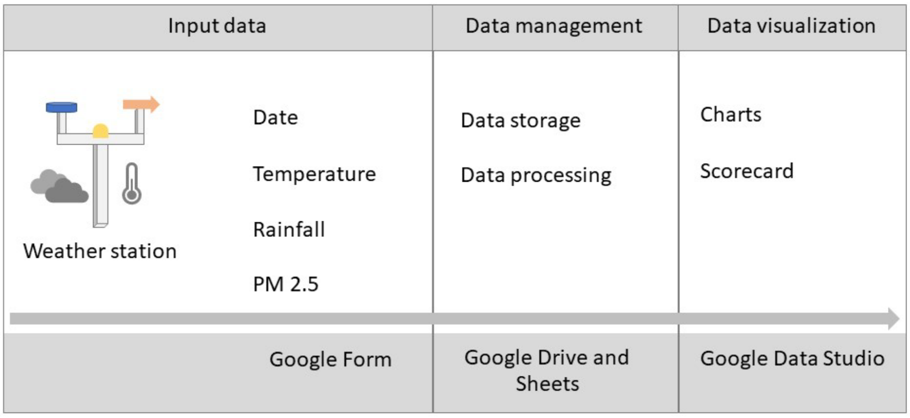


Fig. 1 Weather data workflow

การนำเข้าข้อมูล

การนำเข้าข้อมูลโดยเจ้าหน้าที่ส่งข้อมูลเข้าระบบด้วย Google Form (Fig. 2) ซึ่งการบันทึกข้อมูลแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) ส่วนผู้บันทึกข้อมูล บันทึกชื่อผู้บันทึกข้อมูล วันที่ และเลือกสถานที่บันทึกข้อมูล เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีสถานีตรวจวัดอากาศ 2 จุด คือ ที่ทำการสถานีควบคุมไฟป่าห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง และหน่วยดับไฟป่าเคลื่อนที่ป่าสักงาม 2) ส่วนของที่ทำการสถานีควบคุมไฟป่าห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง ข้อมูลสภาพอากาศที่บันทึกคือ ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร) อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส) อุณหภูมิต่ำสุด (องศาเซลเซียส) ค่า PM 2.5 (ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ค่า PM 10 (ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร) และค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) และ 3) ส่วนของหน่วยดับไฟป่าเคลื่อนที่ป่าสักงาม ข้อมูลสภาพอากาศที่บันทึกคือ ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร) อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิต่ำสุด (องศาเซลเซียส)

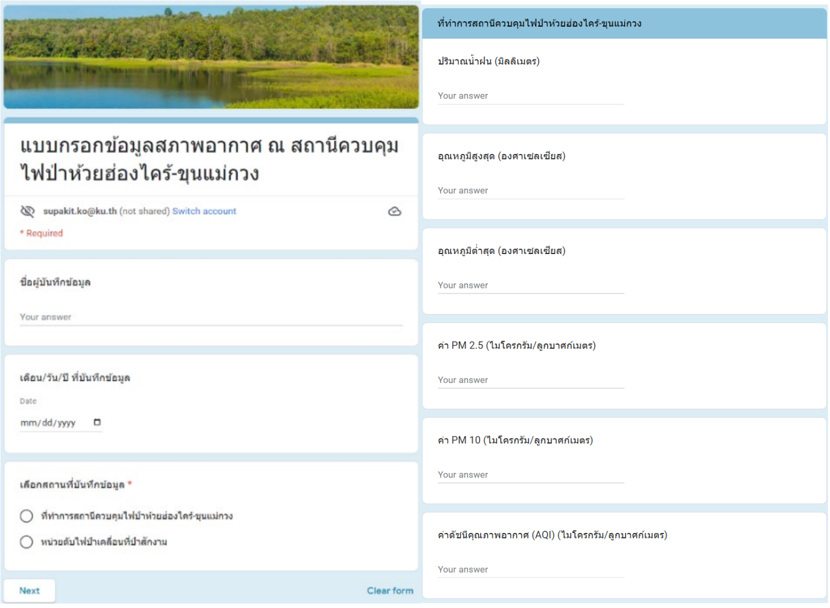


Fig. 2 Google Form for weather data input

การจัดการข้อมูล

จากข้อมูลนำเข้าผ่าน Google Form แล้ว ข้อมูลสภาพอากาศจะถูกจัดเก็บไว้ใน Google Drive ซึ่งสามารถเปิดดูข้อมูลทั้งหมดได้ทาง Google Sheets ในส่วนนี้ผู้พัฒนาจะจัดการข้อมูลก่อนการส่งข้อมูลไปยังขั้นตอนถัดไป ได้แก่ การจัดการรูปแบบของวันที่ การคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละวัน เป็นต้น ซึ่งการใช้งานจริงเจ้าหน้าที่จะไม่ต้องทำในส่วนนี้อีก ข้อมูลที่ถูกนำเข้าผ่าน Google Form จะถูกจัดการอัตโนมัติที่พร้อมส่งต่อข้อมูลไปยังขั้นตอนถัดไป

การแสดงผลข้อมูลด้วยภาพ

การออกแบบการแสดงผลข้อมูลด้วยภาพใน Google Data Studio โดยการเชื่อมต่อข้อมูลจาก Google Sheets แล้วสร้างรายงานการนำเสนอ เลือกรูปแบบการแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศ เช่น วันที่ ตาราง และแผนภูมิ เป็นต้น ซึ่งจะจัดทำโดยผู้พัฒนาหลังจากนั้นการแสดงผลข้อมูลด้วยภาพจะปรับปรุงให้เป็นข้อมูลล่าสุดแบบอัตโนมัติ

การทำแบบสอบถามเพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้

ระบบรายงานสภาพอากาศนี้ถูกนำไปใช้งานจริงโดยเจ้าหน้าที่สถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง ซึ่งผู้วิจัยได้ประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบของเจ้าหน้าที่ผู้ใช้งาน และได้ประชาสัมพันธ์รายงานการแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศของสถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงเพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ที่เข้าถึงรายงานสภาพอากาศผ่านการแสดงผลข้อมูลด้วยภาพจาก Google Data Studio ดังหัวข้อต่อไปนี้ การเข้าถึงรายงานการแสดงผลข้อมูล การจัดเรียงข้อมูลในรายงาน ความสวยงาม ประโยชน์ที่ได้รับ และภาพรวมความพึงพอใจ โดยให้คะแนนความพึงพอใจ 5 ระดับ คือ ระดับ 5 = ดีมาก ระดับ 4 = ดี ระดับ 3 = ปานกลาง ระดับ 2 = พอใช้ ระดับ 1 = ควรปรับปรุง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาการพัฒนาระบบข้อมูลสภาพอากาศ ณ สถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง จังหวัดเชียงใหม่ มีการรายงานสภาพอากาศจากข้อมูลสถานีตรวจวัดอากาศ 2 จุด คือ จุดที่ 1 ที่ทำการสถานีควบคุมไฟป่า ข้อมูล

ที่วัดประกอบด้วยปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด ค่า PM 2.5 ค่า PM 10 และค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI และจุดที่ 2 หน่วยดับไฟป่า ข้อมูลที่วัดประกอบด้วยปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิต่ำ การทดสอบใช้ระบบโดยเจ้าหน้าที่ระหว่างวันที่ 1 มกราคม ถึง 23 มีนาคม พ.ศ. 2565 ได้ผลการศึกษาดังนี้

ผลการพัฒนาระบบรายงานสภาพอากาศ

จากการจัดการข้อมูลรายงานสภาพอากาศเดิมของสถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวง จะจดบันทึกข้อมูลลงกระดาษแล้วนำมากรอกเข้าคอมพิวเตอร์อีกครั้งหนึ่ง และมีการรายงานสภาพอากาศทุกวันผ่าน Facebook ของสถานีควบคุมไฟป่า (Fig. 3) ด้วยข้อความและภาพซึ่งผู้ใช้จะไม่ทราบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและไม่สามารถเลือกช่วงวันที่ต้องการทราบข้อมูลสภาพอากาศได้เอง

ผลการพัฒนาระบบรายงานสภาพอากาศได้การออกแบบการนำเข้าข้อมูลด้วย Google Form เจ้าหน้าที่ผู้บันทึกข้อมูลสามารถบันทึกข้อมูลสภาพอากาศที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดอากาศในพื้นที่ลงในระบบผ่านโทรศัพท์มือถือได้โดยตรง ส่วนแสดงผลสำหรับผู้ใช้หรือผู้สนใจสามารถเข้าดูรายงานสภาพอากาศได้ผ่านคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือซึ่งแบ่งการแสดงผลเป็น 2 ส่วน คือส่วนแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศของที่ทำการสถานีควบคุมไฟป่า และส่วนแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศของหน่วยดับไฟป่า โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้ (Fig. 3)

Fig. 3 Traditional weather reporting on Facebook

1. ส่วนแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศของที่ทำการสถานีควบคุมไฟป่า

หน้าต่างแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศของที่ทำการสถานีควบคุมไฟป่าแสดงวันที่เก็บข้อมูลมุมบนขวาสามารถเลือกวันที่และช่วงเวลาได้ ข้อมูลปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด ค่า PM2.5 ค่า PM10 และค่าดัชนีคุณภาพอากาศโดยใช้ Scorecard เพื่อให้แสดงค่าของข้อมูลอากาศในวันที่เลือก และแสดงปริมาณน้ำฝนในช่วงเวลาที่กำหนดโดยใช้ Bar Chart แสดงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในช่วงเวลาที่กำหนดด้วย Bar Chart และแสดงข้อมูล PM2.5 ด้วย Time Series Chart ในช่วงเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถเลือกช่วงเวลาหรือวันที่ต้องการทราบข้อมูลย้อนหลังได้ (Fig. 4)

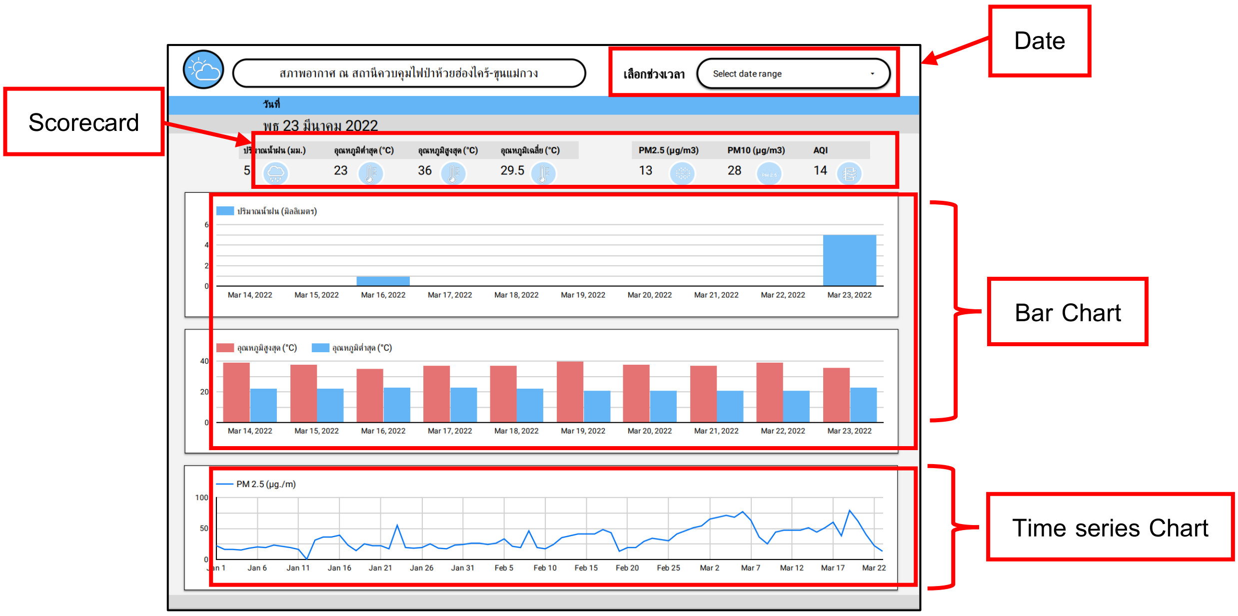


Fig. 4 The dashboard of the weather data at the fire control station office

2. ส่วนแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศของหน่วยดับไฟป่า

หน้าต่างแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศของหน่วยดับไฟป่าแสดงวันที่เก็บข้อมูลมุมบนขวาสามารถเลือกวันที่และช่วงเวลาได้ ข้อมูลปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิสูงสุดของวันที่นั้นโดยใช้ Scorecard เพื่อให้แสดงค่าของข้อมูลอากาศในวันที่เลือก และแสดงปริมาณน้ำฝนในช่วงเวลาที่กำหนดโดยใช้ Bar Chart และแสดงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในช่วงเวลาที่กำหนดด้วย Bar Chart ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถเลือกช่วงเวลาหรือวันที่ต้องการทราบข้อมูลย้อนหลังได้ (Fig. 5)

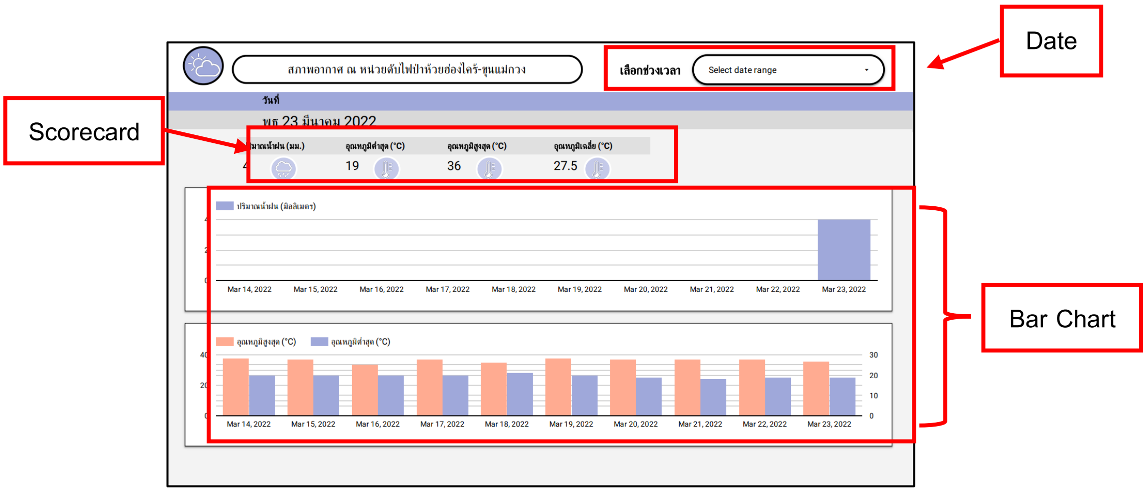


Fig. 5 The dashboard of the weather data at the fire brigade

เมื่อเทียบกับการรายงานสภาพอากาศแบบเดิมที่คนทั่วไปเข้าถึงได้ผ่าน Facebook จะทราบเพียงแค่ค่าของวันที่วัด แต่ไม่ทราบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสภาพอากาศในแต่ละเดือน

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้

การนำเสนอข้อมูลหน้าต่างที่สามเป็นส่วนการประเมินความพึงพอใจผู้ใช้ ผลการประเมินแบ่งเป็น ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบของเจ้าหน้าที่ผู้ใช้งาน และผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ที่เข้าถึงรายงานสภาพอากาศผ่านการแสดงผลข้อมูลด้วยภาพจาก Google Data Studio มีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบของเจ้าหน้าที่ผู้ใช้งาน

เจ้าหน้าที่ของสถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการบันทึกข้อมูลสภาพอากาศมีเพียงหนึ่งคนโดยแสดงความพึงพอใจและความคิดเห็นต่อระบบ ดังนี้

- ความสะดวกในการกรอกข้อมูล มีคะแนนความพึงพอใจเท่ากับ 5
- ความยากง่ายในการดูข้อมูลเมื่อเทียบกับแบบเดิม มีคะแนนความพึงพอใจเท่ากับ 5
- ภาพรวมความพึงพอใจต่อระบบกรอกข้อมูล มีคะแนนความพึงพอใจเท่ากับ 5

คะแนนเฉลี่ยความพึงพอใจต่อระบบในภาพรวมของเจ้าหน้าที่ อยู่ในระดับที่ดีมาก

2. ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบของผู้ใช้ที่เข้าถึงรายงานสภาพอากาศผ่านการแสดงผลข้อมูลด้วยภาพจาก Google Data Studio

ผู้ใช้ที่ได้ทดสอบการใช้งานการแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศผ่าน Google Data Studio และแสดงความคิดเห็นมีจำนวน 35 คน แบ่งเป็นผู้ใช้งานเพศหญิงจำนวน 23 คน คิดเป็นร้อยละ 65.7 ของผู้ใช้ที่ตอบแบบประเมินทั้งหมด เพศชายจำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 34.3 ของผู้ใช้ที่ตอบแบบประเมินทั้งหมด โดยแบ่งเป็นช่วงอายุ 20–30 ปี จำนวน 4 คน คิดเป็นร้อยละ 11.4 ของผู้ใช้ที่ตอบแบบประเมินทั้งหมด ช่วงอายุ 31–40 ปี จำนวน 11 คน คิดเป็นร้อยละ 31.4 ของผู้ใช้ที่ตอบแบบประเมินทั้งหมด ช่วงอายุ 41–50 ปี จำนวน 11 คน คิดเป็นร้อยละ 31.4 ของผู้ใช้ที่ตอบแบบประเมินทั้งหมด และช่วงอายุ 51 ปีขึ้นไปมีจำนวน 9 คน คิดเป็นร้อยละ 25.8 ของผู้ใช้ที่ตอบแบบประเมินทั้งหมด พบว่ามีผู้ประเมินที่อยู่ในช่วงอายุ 31–40 ปี และ 41–50 ปี เป็นจำนวนมากเนื่องจากเป็นช่วงอายุที่ผู้ใช้ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับงานและระบบของงานมากกว่าช่วงอายุอื่นมีความพึงพอใจและความคิดเห็นต่อระบบดัง Table 1

Table 1 Satisfaction assessment results to visualization of weather data

Topics	Mean	SD	Level of satisfy
Access data visualization reports.	4.37	0.65	Very satisfied
Sort the data in the report.	4.40	0.73	Very satisfied
The beauty of the report.	4.34	0.84	Very satisfied
Benefits from the report.	4.37	0.77	Very satisfied
Overall satisfaction with the report.	4.51	0.74	Very satisfied

จากผลการศึกษาการพัฒนาระบบรายงานสภาพอากาศ ณ สถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงด้วยกูเกิลแอปพลิเคชันช่วยให้เจ้าหน้าที่สามารถนำเข้าข้อมูลการตรวจวัดจากสถานีตรวจวัดอากาศได้อย่างเป็นระบบ ข้อมูลถูกจัดเก็บในรูปแบบตารางเอกสารทันทีในระบบออนไลน์ ซึ่งเจ้าหน้าที่ที่บันทึกข้อมูลสามารถเข้าถึงตารางข้อมูลเพื่อตรวจสอบเอกสารได้อย่างรวดเร็วและเป็นปัจจุบัน สอดคล้องกับการศึกษาของ จิราณัฏฐ์ (2562) ที่ได้นำ Google Form มาใช้ในการส่งข้อมูลการดำเนินกิจกรรมทางการก่อสร้างของโครงการวางท่อก๊าซกรณีศึกษาและโอนถ่ายข้อมูลไปยัง Google Sheets ซึ่งผู้ใช้งานมีความพึงพอใจสูงต่อการใช้งานดังกล่าว และผลการพัฒนาการนำเสนอข้อมูลสภาพอากาศในรูปแบบการแสดงผลข้อมูลด้วยภาพใน Google Data Studio ที่ผู้คนที่สนใจสภาพอากาศของสถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงสามารถเข้าดูได้ผ่านระบบออนไลน์ มีการนำเสนอด้วยภาพ และสามารถเลือกช่วงเวลาที่ต้องการทราบข้อมูลได้ ซึ่งข้อมูลที่นำเสนอผ่าน Google Data Studio จะเป็นปัจจุบันจากการโอนถ่ายข้อมูลจากในระบบช่วยลดขั้นตอนการจัดทำรายงานของเจ้าหน้าที่ ทำให้ผู้ใช้มีความพึงพอใจต่อระบบสูง สอดคล้องกับการศึกษาบัวพรรณ และศศิวรรณ

(2564) ที่ได้ใช้ Google Form ในการสนับสนุนการให้คะแนนในการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงาน สาขาช่างไฟฟ้าภายในอาคาร และแสดงผลการทดสอบด้วย Google Data Studio พบว่าการประยุกต์ใช้กูเกิลแอปพลิเคชันมีความเหมาะสมในการจัดการข้อมูลดังกล่าวโดยได้รับความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญในระดับมาก จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้กูเกิลแอปพลิเคชันช่วยพัฒนาขั้นตอนการดำเนินงานนำเข้าข้อมูล จัดเก็บ และแสดงผลของข้อมูลได้อย่างเห็นระบบ เพิ่มความสะดวกและเข้าถึงได้ง่ายสำหรับผู้ใช้

สรุป

การพัฒนาระบบรายงานสภาพอากาศ ณ สถานีควบคุมไฟป่า ห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงในการศึกษานี้ได้นำกูเกิลแอปพลิเคชันได้แก่ Google Form, Google Sheets, Google Drive และ Google Data Studio มาประยุกต์ใช้ในการนำเข้า จัดเก็บ จัดการ และนำเสนอข้อมูลซึ่งเจ้าหน้าที่สามารถตรวจวัดข้อมูลสภาพอากาศแล้วบันทึกข้อมูลลงระบบผ่านทาง web browser บนโทรศัพท์มือถือได้ทันที ลดขั้นตอนการจดข้อมูลลงกระดาษแล้วนำมาบันทึกลงคอมพิวเตอร์ และยังสามารถนำเสนอข้อมูลด้วยแผนภาพได้ทันที ซึ่งสามารถเข้าถึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์นี้ได้ง่ายและเป็นปัจจุบัน เจ้าหน้าที่ผู้บันทึกข้อมูลเข้าสู่ระบบมีความพึงพอใจต่อระบบในภาพรวมอยู่ในระดับที่ดีมาก นอกจากนี้ผู้ใช้งานที่ได้ทดสอบการใช้งานการแสดงผลข้อมูลสภาพอากาศผ่าน Google Data Studio มีความพึงพอใจต่อการนำเสนอข้อมูลด้วยภาพในภาพรวมอยู่ในระดับที่ดีมาก การนำกูเกิลแอปพลิเคชันมาประยุกต์ใช้ในการนำเข้า จัดการและนำเสนอข้อมูลในลักษณะนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆได้ เช่น การจัดเก็บข้อมูลนักท่องเที่ยวที่มาใช้บริการของอุทยานแห่งชาติ การจัดเก็บข้อมูลการซื้อขายสินค้า เป็นต้น ประโยชน์ที่จะได้รับคือลดขั้นตอนการนำเข้าและจัดการข้อมูล ลดการใช้กระดาษ และสามารถนำเสนอข้อมูลด้วยแผนภาพที่เข้าใจง่ายรวมถึงเห็นแนวโน้มหรือทิศทางของข้อมูลที่สามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อพัฒนาปรับปรุงงานด้านนั้น ๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์แบบได้เพราะได้รับความช่วยเหลือหัวหน้าและเจ้าหน้าที่สถานีควบคุมไฟป่าห้วยฮ่องไคร้-ขุนแม่กวงที่ให้ข้อมูลสภาพอากาศ และผู้ที่เข้ามาทดลองใช้งานระบบในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กมลชนก เสนา, ชวิศา ธรรมพากรณ์, ภัทธิรา ธีรสวัสดิ์. 2563. การศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้การสร้างภาพข้อมูล (Data Visualization) ของเฟซบุ๊กแฟนเพจในประเทศไทย. วารสารวิจัยเพื่อการปฏิรูปการเรียนรู้ 3(1): 53–66.

จิราณัฏฐ์ วัฒนภัทราภรณ. 2562. การประยุกต์ใช้ระบบการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการประสานงานในโครงการวางท่อส่งก๊าซ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

บัวพรรณ คำเฉลา, ศศิวรรณ ส่งต่าย. 2564. การพัฒนารูปแบบการประยุกต์ใช้กูเกิลแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนให้คะแนนการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงาน สาขาช่างไฟฟ้าภายในอาคาร ระดับ 1. วารสารการบริหารนิติบุคคลและนวัตกรรมท้องถิ่น 7: 336–348.

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2560. งานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย. https://www.tei.or.th/thaicityclimate/public/research-47.pdf, 9 ธันวาคม 2565.

Google. 2022. ผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์สำหรับทุกคน. https://about.google/products/, 4 เมษายน 2565.

แบบจำลองสามมิติของซุงไม้สัก คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน

3D model of teak log at Faculty of Forestry, Kasetsart university using terrestrial laser scanner survey

ณภัทร พึ่งพงษ์, **จิรวัฒน์ ยิ่งดี**, **ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล**, **ธีระพงษ์ ชุมแสงศรี***
Naphat Phungphong, Jirawat Yingdee, Laddawan Rianthakool, Theerapong Chumsangsri*
ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: ffortpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ซุงไม้สัก ที่คณะวนศาสตร์เป็นซุงไม้สักขนาดใหญ่ มีความสำคัญและเป็นสัญลักษณ์หนึ่งของคณะวนศาสตร์ ซึ่งตั้งอยู่ภายนอกอาคาร อาจเสื่อมโทรมผุพังเนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศ ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ในการสร้างแบบจำลองสามมิติโดยการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถจัดเก็บข้อมูล ณ ปัจจุบันในรูปแบบดิจิทัลที่สามารถวัดขนาด และสร้างเป็นข้อมูลในโลกเสมือน งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์เทคโนโลยีดังกล่าวจัดทำแบบจำลองสามมิติของซุงไม้สักและประเมินมิติต่างๆ ของซุงไม้สักจากข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับการประเมินแบบดั้งเดิม ผลการศึกษาพบว่าจากข้อมูลของกลุ่มของข้อมูลจุดซุงไม้สักมีพูพอน ไม่กลม มีความโตที่ระดับความสูงเพียงอกจากการวัดด้วยโปรแกรม Faro scene เท่ากับ 1.726 เมตร สูงจากพื้นดินเท่ากับ 5.267 เมตร ปริมาตรซุงไม้สักส่วนเหนือพื้นดินจากการประมาณด้วยสมการ Newton มีค่าเท่ากับ 9.764 ลูกบาศก์เมตร ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ที่ใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของซุงไม้สักที่อาจมีการผุพังไปตามการเวลา และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการวัดขนาดของไม้ยืนต้นได้
คำสำคัญ: กลุ่มของข้อมูลจุด, เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน, ซุง, แบบจำลองสามมิติ, ปริมาตรไม้

Abstract

The teak log at the Faculty of Forestry is one of the symbols. Teak is of economic importance and the beginning of the Faculty of Forestry. The teak log was located outside the building and may have decayed due to weathering. Modern technology in 3D modeling by ground-based laser scanner surveys can store current data in digital form that can be measured and reconstructed in a virtual world. This research has applied such technology to create a 3D model of teak logs and evaluate the various dimensions of teak logs from the data compared with the traditional assessment. The results revealed that from the point cloud data of the teak log, there is a buttress, not a round. The diameter at breast height measuring by the Faro Scene program is 1.726 meters, and the height from the ground is 5.267 meters. The volume of the teak log above ground calculated by the Newton equation is 9.764 cubic meters. The data obtained from this study will be useful for monitoring the changes in teak logs that may have decayed over time and as a guide for applying the technology to measure the size of woody trees.
Keywords: 3D model, Log, Log volume, Point clouds, Terrestrial laser scanner

คำนำ

ซุงไม้สักบริเวณหน้าตึกเทียมคมกฤส คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีประวัติความเป็นมาตามป้ายระบุไว้ว่ามีอายุ 364 ปี ได้จากห้วยผา อ.เมือง จ.ตาก แดงป่าแม่ท้อ เมื่อวันที่ 1 เมษายน 2523 เป็นซุงไม้สักที่ถูกลักตัดทิ้งไว้ในป่าเกือบ 20 ปี คาดว่าสักต้นนี้งอกในสมัยสมเด็จพระนเรศวรมหาราช โดยได้รับความเอื้อเฟื้อจากดร.ชำนิ บุณโยภาส อดีตป่าไม้เขตตาก ขนาดของซุงไม้สักจากป้ายบอกไว้ว่า ขนาดเส้นรอบวง 5.72 เมตร ยาว 5.70 เมตร มีปริมาตร 12.29 ลูกบาศก์เมตร ซุงไม้สักถูกเคลื่อนย้ายและมาตั้งไว้ที่บริเวณด้านหน้าตึกเทียมคมกฤสตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2524 เป็นต้นมา จนกลายเป็นสัญลักษณ์หนึ่งของคณะวนศาสตร์ จากการสืบค้นข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อให้ทราบที่มาของการวัดขนาดของซุงไม้สักนี้ไม่พบหลักฐานปรากฎแน่ชัด ปัจจุบันซุงไม้สักตั้งอยู่นอกอาคารมีโอกาสเสื่อมโทรมเนื่องจากสภาพอากาศและกาลเวลาหากไม่ได้รับการดูแลรักษาที่ดี (เรืองศักดิ์, 2529)

การวัดขนาดของต้นไม้ในงานทางป่าไม้ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการประเมิน ติดตาม การเจริญเติบโตของต้นไม้ในป่า ข้อมูลที่วัดได้แก่ ความโตของต้นไม้วัดเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงของต้นไม้ (ชิงชัย, 2563) เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอก (Diameter at Brest Hight, DBH) เป็นความโตของต้นไม้ที่ระดับสูงจากพื้นที่ 1.30 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สามารถยืนวัดได้ง่าย และสะดวก (ชิงชัย, 2563) จึงเป็นที่นิยมใช้ในการวัดความโตของต้นไม้ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความโตของต้นไม้ เช่น คาลิเปอร์ (Caliper) หรือก้ามปูใช้วัดความกว้างของวัตถุ เทปวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter tape) ซึ่งใช้สมการวงกลมในการกำหนดสเกลบนเทป (ชิงชัย, 2563) และ Manual band dendrometer เป็นเครื่องมือที่ติดตั้งไว้ที่ลำต้นเป็นเวลานานเพื่อวัดการเติบโตของต้นไม้ (ภูรินทร์ และคณะ, 2557) ส่วนการวัดความสูงของต้นไม้จะวัดจากโคนต้นไปยังปลายยอดของต้นไม้ที่สูงที่สุด เครื่องมือที่ใช้วัดความสูง เช่น แท่งวัดความสูง (Height measuring rod) เป็นโพลวัดความสูงที่ยืดออกได้ยาวเสมอยอดไม้เป็นเครื่องมือที่วัดความสูงได้แม่นยำแต่มีข้อจำกัดคือวัดต้นไม้ที่มีความสูงไม่เกิน 15 เมตร เครื่องวัดความสูงด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค (Hypsometer) เป็นเครื่องมือวัดความสูงแบบดิจิทัลโดยใช้หลักการเดินทางของคลื่นอัลตร้าโซนิคเล็งไปยังยอดไม้และวัดระยะห่างของผู้ใช้กับต้นไม้ก็จะสามารถคำนวณความสูงของต้นไม้ได้ตามหลักของตรีโกณมิติซึ่งมักจะแสดงค่าความสูงให้ทราบเลย คลีโนมิเตอร์ (Clinometer) จะใช้วัดมุมเอียงเมื่อเล็งไปยังยอดไม้และโคนต้นแล้ววัดระยะห่างของผู้ใช้เพื่อนำมาคำนวณตามหลักของตรีโกณมิติเช่นเดียวกัน (ชิงชัย, 2563) นอกจากนี้การประมาณค่าปริมาตรไม้ในทางป่าไม้มีสมการที่นิยมใช้ 3 สมการ คือ สมการ Huber สมการ Smalian และสมการ Newton ซึ่งค่าความโตและความสูงของต้นไม้ในตำแหน่งต่าง ๆ จะถูกนำมาใช้คำนวณในสมการดังกล่าว (ปัสสี และขวัญชัย, 2548) ปัจจุบันมีเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวัดมิติต่างๆ ของต้นไม้ที่มีความละเอียดและถูกต้องมากขึ้น การสร้างแบบจำลองสามมิติโดยการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner, TLS) ถูกนำมาใช้ในการวัดต้นไม้และหมู่ไม้เพิ่มมากขึ้น (Stanley, 2013; Bournez et al., 2020; Åkerblom and Kaitaniemi, 2021) เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินจะให้ข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุด (Point clouds) ซึ่งเป็นข้อมูลในรูปแบบสามมิติที่มีความละเอียดสูงสามารถวัดขนาดมิติต่าง ๆ ของวัตถุได้อย่างแม่นยำ

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินมาใช้ในการเก็บข้อมูลซุงไม้สัก หน้าตึกเทียมคมกฤส คณะวนศาสตร์ เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติของซุงไม้สัก ณ ปัจจุบันจัดเก็บในรูปแบบข้อมูลสมัยใหม่ และเพื่อวัดมิติต่าง ๆ ของซุงไม้สักจากแบบจำลองสามมิตินี้ รวมถึงเปรียบเทียบการวัดข้อมูลกับวิธีดั้งเดิม ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลตั้งต้นที่ใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของซุงไม้สักได้ในอนาคตที่อาจมีการเสื่อมโทรมหรือผุพัง และเป็นแนวทางในการศึกษาเทคโนโลยีสมัยใหม่ในการวัดขนาดของไม้ยืนต้นได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial laser scanner) รุ่น Faro S150 ลูกบอลทรงกลม (Spheres target) 6 ลูก ขาตั้งกล้อง คอมพิวเตอร์ Notebook กล้องถ่ายรูป โปรแกรม 3D Forest พัฒนาโดย Silva Tarouca Research Institute และ Department of Geoinformation Technologies of Mendel University in Brno และ Faro Scene พัฒนาโดย FARO Technologies เทปวัดระยะทาง และกล้องประมวลผลรวม (Total station)

วิธีการ

การดำเนินงานแบ่งเป็นการเก็บข้อมูลภาคสนามและการประมวลผลข้อมูลแสดงดัง Fig. 1 มีรายละเอียดดังนี้

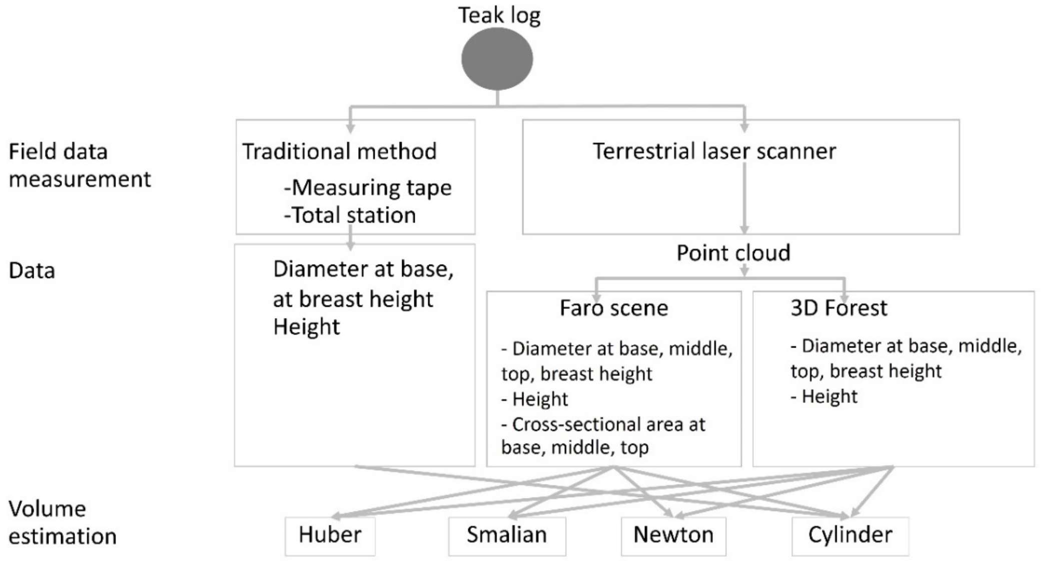


Fig. 1 Research methodology workflow

การเก็บข้อมูลภาคสนาม

1. การเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน โดยกำหนดตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและตำแหน่งของลูกบอลทรงกลมให้ครอบคลุมทุกด้านของซุงไม้สัก ซึ่งมีตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน 4 ตำแหน่ง เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้รอบวัตถุตามวิธี Central Object of Interest (Faro, 2020) ตำแหน่งอ้างอิงลูกบอลทรงกลม 6 ตำแหน่ง โดยลูกบอลทรงกลมนี้จะไม่เคลื่อนย้ายเมื่อมีการย้ายตำแหน่งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ลูกบอลทรงกลมทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการประมวลผลข้อมูลจากการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินหลายตำแหน่งเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลเข้าด้วยกัน (Fig. 2) ตำแหน่งของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินจะต้องเห็นลูกบอลทรงกลม 3 ลูก

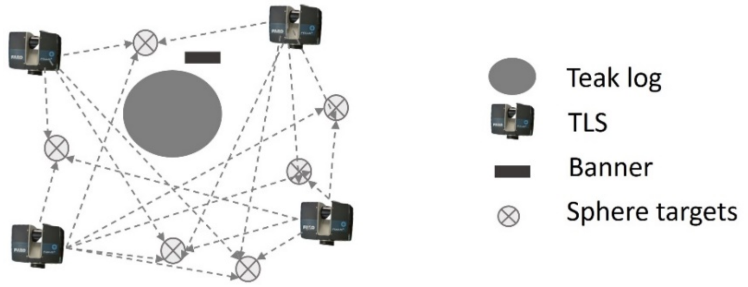


Fig. 2 Scanner (TLS) and sphere target locations

2. ตั้งค่าของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินดังนี้ resolution เท่ากับ ¼ ค่า quality เท่ากับ 3x ซึ่งในระยะที่ห่างจากตำแหน่งตั้งเครื่อง 10 เมตร จะมีความละเอียดของจุดภาพเท่ากับ 6.1 มิลลิเมตร เลือกสแกนภาพสี (Scan with color) โดยวัดแสงแบบ horizon weighted metering บันทึกข้อมูลจนครบทุกการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Fig. 3)

Fig. 3 Field data collection

3. เก็บข้อมูลความสูงของซุงไม้สักด้วยกล้องประมวลผลรวม และวัดขนาดเส้นรอบวงของซุงไม้สักที่ระดับความสูงเพียงอกด้วยเทปวัดระยะทางให้เป็นวิธีการวัดแบบดั้งเดิมหรือการวัดแบบทั่วไป

การประมวลผลข้อมูล

1. ข้อมูลที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินถูกนำมาประมวลผลข้อมูลในโปรแกรม Faro Scene จนได้กลุ่มของข้อมูลจุด (Point clouds) ในรูปแบบแบบจำลองสามมิติของซุงไม้สัก และใช้เครื่องมือภายในโปรแกรมวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของซุงไม้สักที่โคนท่อน ที่ระดับความสูงเพียงอก ที่กลางท่อน และที่ปลายท่อน ใช้เครื่องมือวัดพื้นที่หน้าตัดที่โคนท่อน กลางท่อน และปลายท่อน และความสูงของซุงไม้สัก จากนั้นครอบตัดกลุ่มของข้อมูลจุดมาเฉพาะซุงไม้สัก เพื่อนำแบบจำลองสามมิติของซุงไม้สักมาวิเคราะห์ขนาดของซุงไม้สักในลำดับถัดไป (Faro, 2020)

2. การประมวลผลข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุดด้วยโปรแกรม 3D Forest ซึ่งเป็นโปรแกรมรหัสเปิด (Open source software) พัฒนาโดย Silva Tarouca Research Institute และ Department of Geoinformation Technologies of Mendel University in Brno (Trochta et al., 2017) สามารถประมวลผลข้อมูลจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินเพื่อตรวจวัดข้อมูลของหมู่ไม้หรือต้นไม้โดยเฉพาะ ในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม 3D Forest เพื่อวัดขนาดของซุงไม้สัก ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของซุงไม้สักที่โคนท่อน ที่ระดับความสูงเพียงอก ที่กลางท่อน และที่ปลายท่อน และความสูงของซุงไม้สัก

3. คำนวณปริมาตรของซุงไม้สัก จากรูปร่างของซุงไม้สักมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปทรงกระบอก เมื่อวัดขนาดของซุงไม้สักเหนือพื้นดินจากโปรแกรม Faro scene โปรแกรม 3D Forest และจากข้อมูลกล้องประมวลผลรวมและเทปวัดระยะทางซึ่งเป็นการวัดแบบดั้งเดิม สามารถแบ่งการประมาณปริมาตรของซุงไม้สักตามสมการประมาณปริมาตรไม้และรูปแบบการวัดข้อมูล คือ 1) สมการ Huber (Equation 1) 2) สมการ Smalian (Equation 2) 3) สมการ Newton (Equation 3) (ปัสสี และขวัญชัย, 2548) และ 4) สมการทรงกระบอกโดยคำนวณพื้นที่หน้าตัดจากค่า DBH (Equation 4)

การประมาณปริมาตรจากกลุ่มของข้อมูล (Point clouds) จาก Equation 1–3 ด้วยการประมวลผลจากโปรแกรม Faro scene ที่สามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดตามรูปร่างของหน้าตัดใด ๆ ได้จากค่าพิกัด และการคำนวณพื้นที่หน้าตัดแบบวงกลมด้วยค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของบริเวณที่ต้องการทราบค่า (Equation 5) ส่วนการประมวลผลด้วยโปรแกรม 3D Forest จะไม่สามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดตามรูปร่างของหน้าตัดใด ๆ ได้จากค่าพิกัด แต่สามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดได้จากการแทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของบริเวณที่ต้องการทราบค่าด้วยสมการพื้นที่หน้าตัดวงกลม

Huber	$V = B_{\frac{1}{2}} * h$	(1)
Smalian	$V = (B + b)/2 * h$	(2)
Newton	$V = (B + 4B_{\frac{1}{2}} + b)/6 * h$	(3)
Cylinder	$V = B_{DBH} * h$	(4)
Area of a circle	$Area = \pi r^2$	(5)

เมื่อ V คือ ปริมาตรทั้งหมดของซุงไม้สัก (ลบ.ม.)

B_{DBH} คือ พื้นที่หน้าตัดที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1.3 เมตร ของซุงไม้สัก (ตร.ม.)

B คือ พื้นที่หน้าตัดที่โคนของซุงไม้สัก (ตร.ม.)

$B_{\frac{1}{2}}$ คือ พื้นที่หน้าตัดที่กลางท่อนของซุงไม้สัก (ตร.ม.)

b คือ พื้นที่หน้าตัดที่ปลายท่อนของซุงไม้สัก (ตร.ม.)

h คือ ความสูงของซุงไม้สักทั้งหมด (เมตร)

r คือ รัศมีของซุงไม้สัก (เมตร)

การวิเคราะห์ผลข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลองสามมิติของซุงไม้สักจากการวัดความโต ความสูง พื้นที่หน้าตัด และปริมาตร และการวัดโดยทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวมและเทปวัดระยะทาง คำนวณค่าร้อยละความแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดซุงไม้สัก และสรุปผล

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

แบบจำลองสามมิติของซุงไม้สัก

จากผลการประมวลผลข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุด (Point clouds) จะได้แบบจำลองสามมิติและภาพตัดขวางบริเวณโคนท่อนของซุงไม้สักดัง Fig. 4 รูปร่างของซุงไม้สักคล้ายทรงกระบอก จากภาพตัดขวางแสดงให้เห็นว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกันมีเส้นหนึ่งยาวกว่าอีกเส้นหนึ่ง ลำต้นไม่เรียบมีลักษณะเป็นพูพอน ซึ่งทำให้บริเวณลำต้นบางส่วนมีกลุ่มของข้อมูลจุดไม่สมบูรณ์

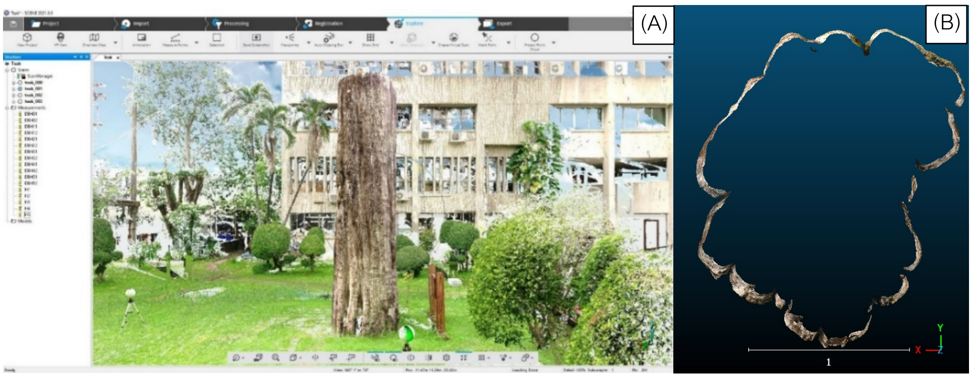


Fig. 4 (A) 3D model of teak log and (B) cross section of teak log

การวัดขนาดของซุงไม้สัก

การวัดมิติของซุงไม้สักด้วยโปรแกรม Faro scene และโปรแกรม 3D Forest มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และการวัดแบบทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวมและเทปวัดระยะทาง เท่ากับ 1.726, 1.568 และ 1.723 เมตร ตามลำดับ โดยการวัดแบบทั่วไปด้วยเทปวัดระยะทางจะวัดได้เส้นรอบวงของซุงไม้สักแล้วจึงคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายหลัง ความสูงของซุงไม้สักวัดจากจุดต่ำสุดที่พื้นดินถึงตำแหน่งที่สูงที่สุดของซุงไม้สักมีค่าเท่ากับ 5.267, 5.290 และ 5.107 เมตร ตามลำดับ (Table 1)

Table 1 Teak log parameters

Parameters	Tools		
	Point cloud – Faro scene	Point cloud – 3D Forest	Total station and Tape
DBH, m	1.726	1.568	1.723
Height, m	5.267	5.290	5.107
Diameter at base, m	1.836	2.026	2.030
Diameter at middle, m	1.528	1.606	NA
Diameter at top, m	1.193	1.494	NA
Cross-sectional area at base, m^2	2.362	NA	NA
Cross-sectional area at middle, m^2	1.828	NA	NA
Cross-sectional area at top, m^2	1.449	NA	NA

ค่ามิติของซุงไม้สักที่ได้จากข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุด (Point clouds) ในโปรแกรม Faro Scene วัดโดยใช้เครื่องมือวัดขนาด สามารถวัดได้ทั้งค่า DBH ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดของซุงไม้สักที่โคน ที่กลางท่อน และที่ปลายท่อน ส่วนค่ามิติของซุงไม้สักจากโปรแกรม 3D Forest ซึ่งมีคำสั่งเฉพาะในการคำนวณมิติของต้นไม้โดยตรง เช่น ค่า DBH นี้คำนวณจากข้อมูลจุดที่ความสูง 1.25–1.35 เมตรจากระดับพื้นดินด้วยวิธี Hough Transformation และคำสั่งในการคำนวณความสูงโดยกำหนดจุดต่ำสุดของซุงไม้สักซึ่งโปรแกรมจะคำนวณความสูงตั้งแต่จุดนี้จนถึงจุดสูงสุดของซุงไม้สัก แต่โปรแกรม 3D Forest ไม่มีคำสั่งในการคำนวณพื้นที่หน้าตัดในตำแหน่งที่ต้องการ ส่วนข้อมูลจากการวัดแบบทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวมและเทปวัดระยะทางสามารถวัดความสูง ความโตที่โคน และความโตที่ระดับความสูงเพียงอกได้

ผลการคำนวณพื้นที่หน้าตัด และปริมาตรของซุงไม้สัก

จากข้อมูลการวัดมิติของซุงไม้สักผ่านกลุ่มของข้อมูลจุด (Point clouds) และการวัดแบบทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวมและเทปวัดระยะทาง ซึ่งสามารถวัดขนาด DBH และความสูงของซุงไม้สักได้ นอกจากนี้ข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุด (Point clouds) สามารถวัดส่วนต่าง ๆ ของซุงไม้สักได้ผ่านโปรแกรมประมวลผล เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัด จากรูปร่างของซุงไม้สัก ที่คำนวณจากค่าพิกัดของกลุ่มของข้อมูลจุด (Point couds) ผ่านโดยแกรม Faro Scene เปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดคำนวณจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยซึ่งประเมินพื้นที่หน้าตัดด้วยสมการพื้นที่วงกลมผ่านโปรแกรม 3D Forest โดยนำพื้นที่หน้าตัดของแต่ละวิธีมาคำนวณเปรียบเทียบผ่านสมการของ Huber, Smalian และ Newton พบว่าพื้นที่หน้าตัดที่ได้จากจากรูปร่างของซุงมีค่าน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดรูปทรงกลมที่มาจากค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 3 สมการ (Table 2) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหากต้องการความละเอียดของข้อมูลจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่สามารถเก็บข้อมูลเพื่อให้สามารถวัดขนาดของรูปร่างจริงของวัตถุได้ ก็จะทำให้ข้อมูลจากการวัดมีความแม่นยำสูงตามไปด้วย และหากต้องการความละเอียดของข้อมูลสูงควรพิจารณาสมการที่ใช้ดังนี้คือ Newton, Samlian และ Huber ตามลำดับ และจากภาพตัดขวางของซุงไม้สักที่โคน กลาง และปลายท่อน และรูปวงกลม มีขนาดพื้นที่หน้าตัดตามการคำนวณด้วย 3 สมการ

ดังกล่าว แสดงดัง Fig. 5 และเมื่อประมาณปริมาตรซุงไม้สักเหนือพื้นดินทั้งหมดจากสมการประมาณปริมาตรไม้จะได้ปริมาตรซุงไม้สักแบ่งตามสมการและตัวแปรที่ใช้ดัง Table 3

Table 2 Average cross-sectional area of teak log based on log volume formula from point cloud processing in Faro Scene program and 3D Forest program

Cross-sectional area based on formula	Cross-sectional area (m^2)		
	Shape of x-section (Faro Scene)	Diameter (3D Forest)	Difference
Huber	1.828	2.027	-10.89%
Smalian	1.906	2.489	-30.59%
Newton	1.854	2.181	-17.64%

แบบจำลองสามมิติของซุงไม้สัก โดยการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถวัดมิติต่าง ๆ ของซุงไม้สักได้ทุกบริเวณที่ต้องการ แม้ในตำแหน่งที่สูงจากพื้นดินเกินมือเอื้อมได้อย่างแม่นยำ ทำให้ทราบมิติที่วัดได้ยากจากวิธีทั่วไป เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางที่กลางท่อน และปลายยอด ดังนั้นการประเมินปริมาตรซุงไม้สักจากข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุด (Point clouds) จึงทำได้ทุกสมการ แต่จากภาพตัดขวางจะเห็นว่าซุงไม้สักมีรูปร่างแตกต่างจากวงกลม ดังนั้นการคำนวณพื้นที่หน้าตัดแบบวงกลมเพื่อเป็นตัวแทนในการประเมินปริมาตรไม้ตามสมการดังกล่าวอาจได้ปริมาตรที่มากกว่าหรือน้อยกว่าความเป็นจริง (Eto et al., 2020) ส่วนความสูงของซุงไม้สักที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันอาจเกิดจากการกำหนดจุดอ้างอิงต่ำสุดไม่ตรงกัน ดังนั้นหากพิจารณาปริมาตรซุงไม้สักที่ความสูงเดียวกับของการวัดจากโปรแกรม Faro Scene ปริมาตรจากสมการ Newton มีค่าเท่ากับ 9.764 ลูกบาศก์เมตร ข้อมูลจากแบบจำลองสามมิตินี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติให้กับต้นไม้ยืนต้นเพื่อประโยชน์ในการประเมินส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้โดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสหรือโค่นต้นไม้ (Stanley, 2013; ธนิสร และชัยโชค, 2561; Bournez et al., 2020; Åkerblom and Kaitaniemi, 2021)

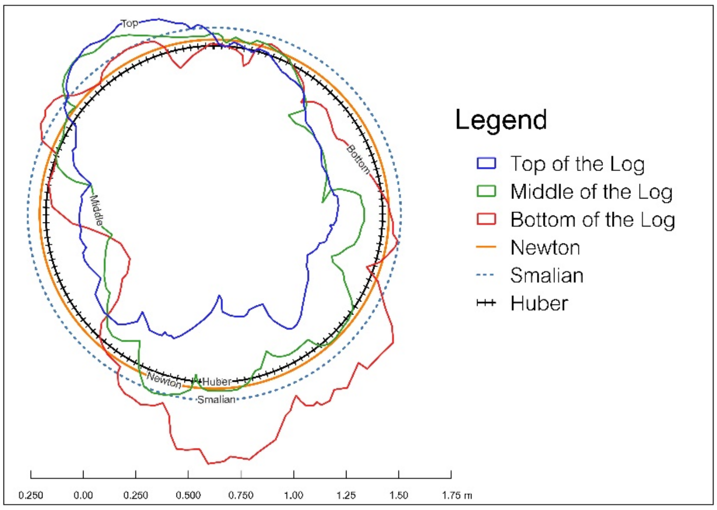


Fig. 5 Cross-sectional shape and cross-sectional area based on log volume formulas

Table 3 Teak log volume

Log volume formula	Parameter	Tool		
		Point cloud – Faro scene	Point cloud – 3D Forest	Total station and Tape
Huber, m^3	Cross-sectional area, Height	9.628	NA	NA
	Diameter, Height	9.662	10.720	NA
Smalian, m^3	Cross-sectional area, Height	10.036	NA	NA
	Diameter, Height	9.920	13.169	NA
Newton, m^3	Cross-sectional area, Height	9.764	NA	NA
	Diameter, Height	9.748	11.537	NA
Cylinder, m^3	DBH, Height	12.328	10.219	11.912

สรุป

การศึกษาแบบจำลองสามมิติของซุงไม้สักด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติของซุงไม้สักที่มีพูพอนเหมือนกับซุงไม้สักจริง มีมาตรส่วนที่สามารถวัดขนาดได้ และเมื่อวัดความโตที่ระดับความสูงเพียงอกเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุดและการวัดด้วยเทปมีค่าใกล้เคียงกัน แต่พื้นที่หน้าตัดที่คำนวณได้จากสมการพื้นที่วงกลมมีค่ามากกว่าความเป็นจริงเพราะซุงไม้สักมีพูพอน หากประมาณปริมาตรไม้จากพื้นที่หน้าตัดวงกลมจะทำให้ได้ปริมาตรซุงไม้สักที่มากกว่าความเป็นจริงตามไปด้วย นอกจากนี้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินยังให้ข้อมูลที่สามารถวัดความโตในตำแหน่งที่สูงเกินเอื้อมได้อย่างละเอียดทำให้สามารถประเมินปริมาตรซุงไม้สักได้จากทุกสมการปริมาตรไม้ โดยปริมาตรซุงไม้สักส่วนเหนือพื้นดินจากการประมาณด้วยสมการ Newton มีค่าเท่ากับ 9.764 ลูกบาศก์เมตร ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ที่ใช้เป็นฐานข้อมูลตั้งต้นของซุงไม้สักนี้เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของซุงไม้สักที่อาจมีการผุพังไปตามการเวลาได้ในอนาคต และการศึกษานี้ยังเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการวัดขนาดของไม้ยืนต้นให้มีความละเอียดแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ชิงชัย วิริยะบัญชา. 2563. คู่มือการวางแปลงตัวอย่างถาวรและการเก็บข้อมูลภาคสนาม. สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

ธนิสร อินทรัตน์ ,ชัยโชค ไวภาษา. 2561. การทดลองประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลเบื้องต้นด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน. Thai Journal of Science and Technology. 7(3): 307–318.

ปัสสี ประสมสินธ์ ,ขวัญชัย ดวงสถาพร. 2548. คู่มือการศึกษาและฝึกปฏิบัติงานภาคสนาม การคณิตป่าไม้ I. ภาควิชาการจัดการปาไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภูรินทร์ สิขรีไพศาล, ขวัญชัย ดวงสถาพร, Omule, Y., ปัสสี ประสมสินธ์, พิชิต ลำใย. 2557. การเปรียบเทียบการวัดการเติบโตของต้นไม้ด้วยเทปวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และ Manual Band Dendrometer. Sci. & Tech. RMUTT J. 4(2): 51–58.

เรืองศักดิ์ กันตะบุตร. 2529. เทคนิคการใช้ไม้ในการก่อสร้าง. วารสารหน้าจั่ว ว่าด้วยสถาปัตยกรรม การออกแบบ และสภาพแวดล้อม. 6: 192–225.

Åkerblom, M., Kaitaniemi, P. 2021. Terrestrial laser scanning: A new standard of forest measuring and modelling?. Ann. Bot. 128(6): 653–661. doi.org/10.1093/aob/mcab111

Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Najjar G. 2020. From TLS point clouds to 3D models of trees: A comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction, 3d Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS). INT., Mar 2017, Nafplio, Greece, pp.113–120.

Eto, S., Masuda, H., Hiraoka, Y., Matsushita, M., Takahashi M. 2020. Precise calculation of cross sections and volume for tree stem using point clouds. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLIII-B2-2020, 205–210. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-205-2020

Faro. 2020. Scene 2019 Faro focus laser scanners training workbook. Faro Technologies.

Stanley, T. 2013. Assessment of the FARO 3D Focus laser scanner for forest inventory. Research Project Bachelor of Spatial Science Surveying, Faculty of Health, Engineering and Sciences, University of Southern Queensland.

Trochta, J., Krucek, M., Vrška, T., Král, K. 2017. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. PLoS ONE 12(5): e0176871. doi.org/10.1371/journal.pone.0176871

การวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับจุดรวมพลในพื้นที่อุทยานแห่งชาติตาดหมอก จังหวัดเพชรบูรณ์

Analysis of suitability area for assemble point at Tat Mok National Park, Phetchabun

ปัณสิตา พรมเสนะ*, **ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล**

Punsita Promsena*, Laddawan Rianthakool

ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Punsita.p@ku.th

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับจุดรวมพลในพื้นที่อุทยานแห่งชาติตาดหมอก จังหวัดเพชรบูรณ์ ในครั้งนี้ได้นำเอาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ ซึ่งมี 4 ปัจจัยพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ความลาดชัน ถนน ตำแหน่งอาคาร และสัญญาณโทรศัพท์ โดยข้อมูลที่ได้จะถูกจำแนกตามความเหมาะสมแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ เหมาะสมมาก เหมาะสม และไม่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กรณีไม่นำปัจจัยสัญญาณโทรศัพท์มาพิจารณา และกรณีที่ 2 กรณีนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยมาพิจารณา ผลจากการศึกษาพบว่าพื้นที่ที่เหมาะสมมากในกรณีที่ 1 มีเนื้อที่ 44,641.29 ตารางเมตร และในกรณีที่ 2 มีเนื้อที่ 135,443.58 ตารางเมตร เป็นพื้นที่มีความลาดชันเหมาะสม ใกล้ถนนเส้นหลัก ห่างจากตัวอาคาร และมีสัญญาณโทรศัพท์ ซึ่งขนาดของพื้นที่ที่จะจัดตั้งควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 242 ตารางเมตรหรือรองรับได้ไม่น้อยกว่า 968 คน จึงจะทำให้การอพยพหรือเคลื่อนย้ายในกรณีฉุกเฉินเป็นไปได้โดยง่าย

คำสำคัญ: ความปลอดภัย, จุดกู้ภัย, จุดรวมพล, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

Analysis of suitability area for assemble point at Tat Mok national park used geographic information system as a main tool for analysis. There were four foundation factors for analysis, i.e. slope, roads, building and phone signals. Each factor was classified into three levels namely very suitable, suitable, and not suitable. There were two cases to analyze: first case including three factors except phone signals, second case including all factors. The results showed that very suitable area in first case = 44,641.29 m^2 and second case = 135,443.58 m^2. It's area with a low slope, near road, far from building and phone signal available. The capacity area that should be accommodate, no less than 242 m^2 or no less than 968 persons, making it possible to evacuate or rescue in emergency easily.

Keywords: Assembly point, Geographic information system, Rescue point, Safety

คำนำ

อุทยานแห่งชาติตาดหมอก จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นอุทยานที่มีความอุดมสมบูรณ์ทางธรรมชาติ เป็นที่พักผ่อนทางธรรมชาติกับนักท่องเที่ยว มีกิจกรรมภายในอุทยานฯ ที่หลากหลาย เช่น เส้นทางศึกษาธรรมชาติ น้ำตก ดูนก/ดูผีเสื้อ/ส่องสัตว์ มีลานกางเต็นท์ เช่น ลานชมดาว ที่สามารถดูดาวในยามค่ำคืนได้ จึงมีนักท่องเที่ยวเดินทางมาอย่างต่อเนื่อง (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2565)

อุทยานแห่งชาติตาดหมอกได้ให้ความสำคัญด้านความปลอดภัยในการบริการนักท่องเที่ยวที่เข้ามาใช้บริการอุทยานฯ ทางอุทยานฯ จึงมีแนวทางกำหนดพื้นที่ปลอดภัยหรือจุดรวมพลเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่นักท่องเที่ยวและเจ้าหน้าที่ โดยจุดรวมพลถือเป็นจุดนัดหมายที่ปลอดภัยเป็นพื้นที่โล่ง ใกล้ชิดถนน เป็นพื้นที่ที่ใช้ในการรองรับผู้คนหากเกิดเหตุอันตรายหรือเหตุฉุกเฉิน (ราชกิจจานุเบกษา, 2559) จากแนวคิดการกู้ภัยที่เป็นมาตรฐานหากเกิดอุบัติเหตุ สิ่งที่สำคัญอันดับแรกคือความปลอดภัยของสถานที่และการดูแลผู้ป่วย ซึ่งสามารถโทรศัพท์ฉุกเฉินเพื่อติดต่อประสานงานได้ และอยู่ใกล้เส้นทางขนส่งเพื่อการเคลื่อนย้ายคนเจ็บหรือรอการช่วยเหลือได้ทันท่วงที (Purfürst, 2022) จากแนวคิดดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงปัจจัยสำคัญในการจัดตั้งจุดรวมพล ได้แก่ ปัจจัยโทรศัพท์ ปัจจัยความลาดชัน และปัจจัยระยะห่างจากถนน เป็นต้น โดยการวิเคราะห์หาพื้นที่ที่เหมาะสมสามารถใช้ปัจจัยพื้นฐานดังกล่าวมาวิเคราะห์โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic information system, GIS) ในการซ้อนทับชั้นข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะสมเพื่อกำหนดจุดรวมพล

การศึกษาเพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับจุดรวมพลโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดที่ตั้งของจุดรวมพล และเพื่อยกระดับความปลอดภัยในพื้นที่อุทยาน ประโยชน์ที่จะได้รับคือจุดรวมพลที่เหมาะสมเมื่อเกิดเหตุอันตรายหรือเหตุฉุกเฉิน ซึ่งทำให้นักท่องเที่ยวและเจ้าหน้าที่สามารถทราบเมื่อเกิดเหตุว่าอยู่บริเวณส่วนไหนของพื้นที่ และการเข้าถึงในการช่วยเหลือเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 1) ชุดชั้นข้อมูล ได้แก่ ความลาดชัน, เส้นทางคมนาคม, ตัวอาคาร/สถานที่ในพื้นที่อุทยาน, สัญญาณโทรศัพท์ และขอบเขตอุทยาน 2) เครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม GPS Garmin 3) โทรศัพท์มือถือ 4) แอปพลิเคชัน Network Cell info 5) คอมพิวเตอร์/โน้ตบุ๊ค และ 6) โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

วิธีการ

การเก็บรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูล

การเก็บรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลปฐมภูมิที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ ข้อมูลจุดรวมพลเดิม, ข้อมูลสัญญาณโทรศัพท์และข้อมูลความจุของแต่ละพื้นที่บริเวณอุทยานฯ โดยการเก็บข้อมูลดังกล่าวจะมีการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมด 3 ข้อมูล คือ 1) การวัดสำรวจพื้นที่โดยใช้เทปวัดระยะ โดยการนำเทปวัดระยะมาวัดบริเวณพื้นที่ที่จุดรวมรวมพลเดิมเพื่อคำนวณหาพื้นที่ โดยใช้สูตร พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า = ด้านกว้าง x ด้านยาว เนื่องจากพื้นที่จุดรวมพลเดิมมีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากนั้นใช้เทปวัดระยะทำการวัดระยะห่างจากจุดรวมพลเดิมถึงตัวอาคารในพื้นที่จุดรวมพลเดิม เพื่อนำไปหาความจุของพื้นที่ 2) การวัดค่าการกระจายของสัญญาณโทรศัพท์

เนื่องจากการเก็บการกระจายของสัญญาณโทรศัพท์อาจถูกลดทอนจากสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น ต้นไม้ อาคาร จึงทำให้การกระจายสัญญาณไม่สามารถกำหนดเป็นระยะทาง หรือรัศมีจากเสาสัญญาณได้ (Powertec, 2014) ในการศึกษานี้จึงได้ประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันในโทรศัพท์มือถือเก็บข้อมูลดังกล่าวเพราะเป็นวิธีที่เข้าถึงพื้นที่ได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อย โดยใช้แอปพลิเคชัน Network Cell info โดยทำการกำหนดเส้นทางที่นักท่องเที่ยวใช้บริการ บริเวณถนนเส้นหลัก และเส้นทางศึกษาธรรมชาติ โดยวัดสัญญาณโทรศัพท์ทั้ง 3 เครือข่าย ได้แก่ DTAC AIS และ TRUE ในระยะทุก ๆ 100 เมตร หน่วยวัดค่าสัญญาณ คือ หน่วย dBm วัดค่าสัญญาณซ้ำตำแหน่งละ 3 ครั้ง ระยะเวลาห่างกัน 1 นาที/ครั้ง และใช้เครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม GPS Garmin เพื่อเก็บข้อมูลพิกัดของตำแหน่งที่วัดค่าสัญญาณ (ปลื้มปิติ และคณะ, 2564) 3) การสัมภาษณ์และสอบถามเจ้าหน้าที่อุทยานฯ โดยข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลค่าความจุของแต่ละบริเวณของพื้นที่อุทยานฯ (Table 1) ข้อมูลที่ใช้อีกประเภทคือข้อมูลทุติยภูมิ ได้แก่ ข้อมูลความลาดชัน, ข้อมูลเส้นทางคมนาคม, ข้อมูลตัวอาคาร/สถานที่ในพื้นที่อุทยานฯ และข้อมูลขอบเขตอุทยานฯ

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยมาจัดลำดับชั้นคะแนนตาม Table 2 ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขและระดับความเหมาะสมของแต่ละชั้นข้อมูล มีดังต่อไปนี้ 1) ปัจจัยความลาดชัน หมายถึง สภาพภูมิประเทศที่มีระดับความสูงต่ำที่แตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ ซึ่งหากตำแหน่งจุดรวมพลอยู่ในพื้นที่ที่มีความลาดชันน้อยจะเหมาะสมแก่การเป็นพื้นที่รองรับผู้คนเมื่อเกิดภัยพิบัติหรือเกิดอุบัติเหตุ 2) ปัจจัยเส้นทางคมนาคม หมายถึง จุดรวมพลจะต้องอยู่ใกล้ถนนสายหลักเพราะมีความจำเป็นเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินหรือภัยพิบัติ 3) ปัจจัยตัวอาคาร หมายถึง หากเกิดกรณีภัยพิบัติอาจส่งผลให้ตัวอาคารถล่มลงมาจึงจำเป็นต้องเว้นระยะออกไปให้ห่างไกลจากตัวอาคารเพื่อป้องกันการได้รับความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจากตัวอาคาร 4) ปัจจัยสัญญาณโทรศัพท์ หมายถึง หากตำแหน่งจุดรวมพลมีสัญญาณโทรศัพท์อยู่ในช่วงคลื่นที่ดีจะทำให้สามารถติดต่อสื่อสารกับหน่วยกู้ภัยหรือโรงพยาบาลเพื่อให้ได้รับการช่วยเหลือได้อย่างทันท่วงที ส่วนสองจะนำชั้นคะแนนของแต่ละปัจจัยที่จัดลำดับชั้นคะแนนมาซ้อนทับโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกจำแนกตามความเหมาะสมแบ่งเป็นช่วงชั้นที่เหมาะสม 3 ระดับ คือ เหมาะสมมาก เหมาะสม และไม่เหมาะสม ดังนั้นการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี เนื่องจากพื้นที่อุทยานฯ มีสัญญาณโทรศัพท์ที่ไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่และบางจุดไม่มีสัญญาณ โดยระดับค่าคะแนนความเหมาะสมของพื้นที่ต่อการจัดตั้งจุดรวมพล กรณีไม่นำปัจจัยสัญญาณโทรศัพท์มาพิจารณาจะแบ่งเกณฑ์ตาม Table 3 และกรณีนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยพิจารณาจะแบ่งชั้นความเหมาะสมตาม Table 4

Table 1 The capacity of each area at Tat Mok National Park

Place	Capacity (Person)
1. Tourist Accommodation	28
2. Conservation camp	80
3. Huai Bong camping ground	200
4. Conservation camp camping ground	500
5. Lan dao camping ground	100
Total	908

Table 2 Suitable levels and score of the four factors

Factors	Criteria	Point	Suitable levels	Source
1. Slope (%)	>10%	0	Not Suitable	Sentürk and Erener (2017)
	8–10	1	Suitable	
	0–8	2	Very Suitable	
2. Distance from roads (Meter)	>1500	0	Not Suitable	Ünal and Uslu (2016)
	500–1500	1	Suitable	
	0–500	2	Very Suitable	
3. Distance from building (Meter)	0–30	0	Not Suitable	Baradran-Shoraka (2009)
	>30	2	Very Suitable	
4. Phone signals (dBm)	<–110	0	Not Suitable	Thaimobilecenter (2558)
	(-85)–(-110)	1	Suitable	
	0–(-85)	2	Very Suitable	

โดยจำแนกระดับความเหมาะสมคำนวณอันตรภาคชั้นของคะแนนความเหมาะสมรวมจากสูตร (Equation 1):

$$\text{อันตรภาคชั้น} = \frac{\text{คะแนนสูงสุด} - \text{คะแนนต่ำสุด}}{\text{จำนวนชั้นความเหมาะสม}} \quad (1)$$

โดยทั้ง 2 กรณี จะจำแนกระดับความเหมาะสมช่วงความเหมาะสมในช่วงอันตรภาคชั้นที่ไม่เท่ากัน

Table 3 Suitable levels and score in case of including 3 factors without phone signal factor

Score	Suitable levels
< 2.00	Not Suitable
2.00–4.00	Suitable
> 4.00	Very Suitable

Table 4 Suitable levels and score in case of including all factors

Score	Suitable levels
≤ 3.00	Not Suitable
3.00–5.00	Suitable
> 5.00	Very Suitable

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับจุดรวมพลในพื้นที่อุทยานแห่งชาติตาดหมอก จังหวัดเพชรบูรณ์ จากการอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัย เมื่อนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยความลาดชัน ปัจจัยระยะห่างจากถนน ปัจจัยระยะห่างจากตัวอาคาร และปัจจัยสัญญาณโทรศัพท์ มาจัดลำดับคะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัยเพื่อใช้ในการพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะสมในการตั้งจุดรวมพล ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีเกณฑ์ในการจัดลำดับคะแนนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงผลออกมาใน

รูปแบบแผนที่การแบ่งเกณฑ์ความเหมาะสมของข้อมูลปัจจัยพื้นฐานทั้ง 4 ปัจจัย (Fig. 1) และเมื่อนำข้อมูลทั้ง 4 ปัจจัยมาวิเคราะห์รวมกันเพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสม ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีไม่นำปัจจัยสัญญาณโทรศัพท์มาพิจารณาในการหาพื้นที่ที่เหมาะสม และกรณีนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยมาหาพื้นที่ที่เหมาะสมเนื่องจากพื้นที่อุทยานฯ มีสัญญาณโทรศัพท์ที่ไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่และบางจุดไม่มีสัญญาณ ซึ่งจะแสดงผลออกมาในรูปแบบแผนที่แสดงผลการวิเคราะห์ระดับคะแนนความเหมาะสมของพื้นที่ในพื้นที่อุทยานฯ ต่อการจัดตั้งจุดรวมพล (Fig. 2)

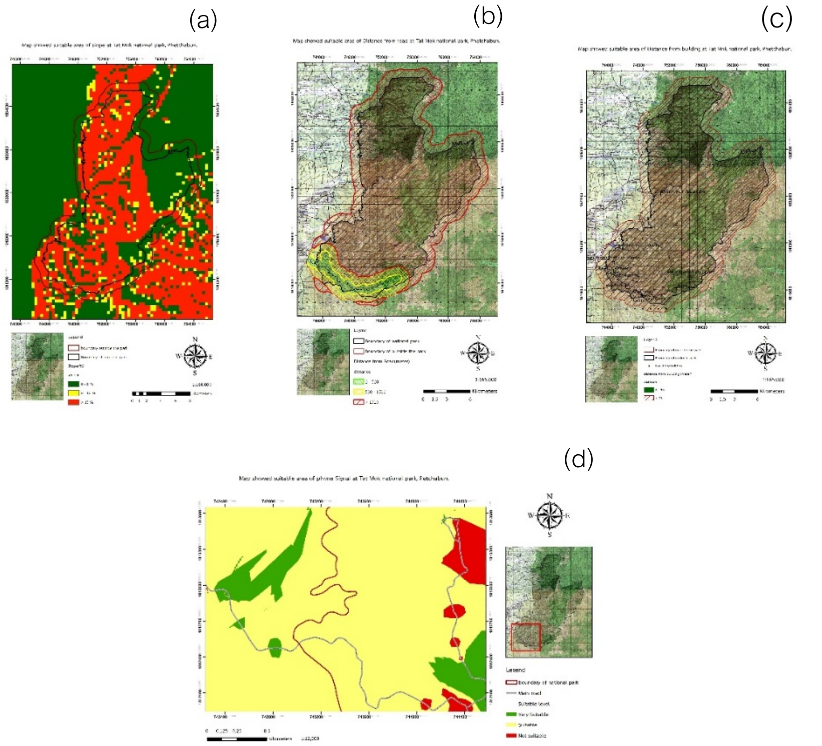


Fig. 1 Maps shown suitable area each factor: (a) Slope, (b) Distance from roads, (c) Distance from building, (d) Phone signals

จากการวิเคราะห์ปัจจัยพื้นฐานโดยแบ่งการวิเคราะห์พื้นที่ออกเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 คือกรณีไม่นำปัจจัยสัญญาณโทรศัพท์มาพิจารณา ผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมาก มีเนื้อที่ทั้งหมด 44,641.29 ตารางเมตร หรือ 27.90 ไร่ ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณบ้านพักนักท่องเที่ยว บริเวณที่ทำการอุทยานฯ กม. 3 บริเวณบ้านพักข้าราชการ บริเวณลานจอดเฮลิคอปเตอร์ บริเวณโรงไฟฟ้าพลังน้ำและบริเวณลานชมดาว

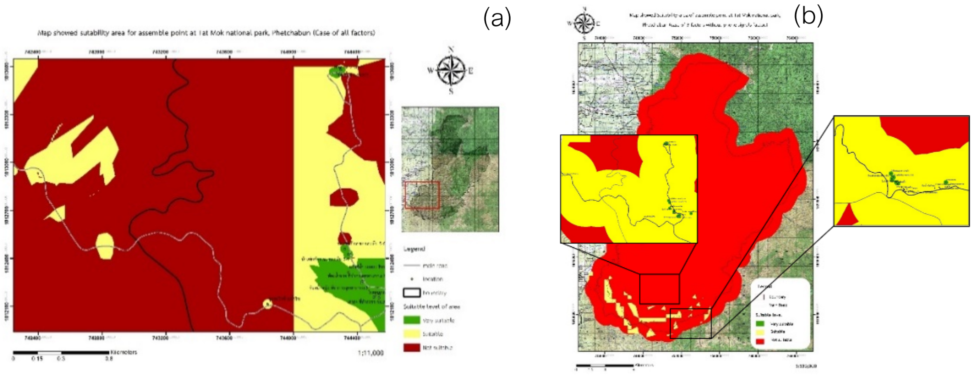


Fig. 2 Maps shown suitable area: (a) In case of all factors, (b) In case of 3 factors without phone signals factor

กรณีที่ 2 คือกรณีนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยมาพิจารณา ผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมาก มีเนื้อที่ทั้งหมด 135,443.58 ตารางเมตร หรือ 84.65 ไร่ ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณจุดกางเต็นท์ลานดาว และบริเวณที่ทำการอุทยานฯ กม. 3 ข้อมูลเจ้าหน้าที่อุทยานฯ ทำให้ทราบถึงข้อมูลจุดรวมพลเดิม ขนาดความจุจากการคำนวณมีพื้นที่เพียง 220 ตารางเมตรหรือรองรับผู้คนได้ 880 คน และทราบจำนวนคนที่ใช้ประโยชน์ในพื้นที่อุทยานฯ ได้แก่ เจ้าหน้าที่อุทยานฯ และนักท่องเที่ยว (Table 1) ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 968 คน แสดงให้เห็นว่าพื้นที่จุดรวมพลเดิมไม่เพียงพอในการรองรับผู้คนเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน เกณฑ์มาตรฐานการจัดตั้งจุดรวมพลของชมรมวิศวกรออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัย (2016) กล่าวคือ “จุดรวมพลต้องมีขนาดพื้นที่เพียงพอกับจำนวนคนทั้งหมด อย่างน้อย 0.25 ตารางเมตรต่อคน” ดังนั้นหากต้องการจัดตั้งจุดรวมพลในบริเวณพื้นที่ที่เหมาะสมมากกรณีที่ 1 และ 2 ควรมีพื้นที่รองรับคนในกรณีฉุกเฉินไม่น้อยกว่า 242 ตารางเมตร และรองรับได้ไม่น้อยกว่า 968 คน พื้นที่ที่อยู่ในระดับเหมาะสมมากคือพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการจัดตั้งจุดรวมพล ซึ่งในกรณี 1 พื้นที่บริเวณนั้นถือเป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันอยู่ในช่วง 0–8% ห่างจากถนนไม่เกิน 500 เมตร และห่างจากตัวอาคารในระยะไม่น้อยกว่า 30 เมตร กรณี 2 จะมีลักษณะเพิ่มเติมจากกรณี 1 คือเป็นพื้นที่ ที่มีสัญญาณโทรศัพท์สามารถติดต่อสื่อสารได้

สรุป

การวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับจุดรวมพลในพื้นที่อุทยานแห่งชาติตาดหมอก จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้นำปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นต่อการเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับจุดรวมพล ได้แก่ ปัจจัยความลาดชัน ปัจจัยระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม ปัจจัยระยะห่างจากตัวอาคาร และปัจจัยสัญญาณโทรศัพท์ โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า เมื่อนำปัจจัยมาวิเคราะห์โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ สามารถวิเคราะห์และคำนวณหาพื้นที่ที่จะจัดตั้งเป็นจุดรวมพลได้เป็นอย่างดี ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเจ้าหน้าที่อุทยานฯ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับพื้นที่จริงเพื่อหาพื้นที่สำหรับจัดตั้งจุดรวมพลเพิ่มเติมจากจุดเดิมได้ อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการจัดตั้งจุดรวมพลในพื้นที่อุทยานฯ นอกจากนี้การเลือกใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เข้ามาช่วยในการศึกษาวิจัยส่งผลให้การวิเคราะห์หาพื้นที่ที่เหมาะสมเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้ เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือจากหัวหน้าอุทยานฯ และเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติตาดหมอก จังหวัดเพชรบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2565. อุทยานแห่งชาติตาดหมอก. https://portal.dnp.go.th/, 2 พฤศจิกายน 2565.

ชมรมวิศวกรออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัย. 2565. มาตรการพื้นที่จุดรวมพล. https://www.facebook.com/Fireprotectionacademy/posts/1063464100393013/, 2 พฤศจิกายน 2565.

ราชกิจจานุเบกษา. 2559. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ข้อกำหนดในการป้องกันอัคคีภัย เล่ม 7 ศูนย์สั่งการดับเพลิง. (2559,14 ธันวาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 133.

ปลื้มปิติ งิ้มนันใจ, ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล, ธีระพงษ์ ชุมแสงศรี. 2564.ระดับความแรงของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่บนเส้นทางศึกษาธรรมชาติ ณ อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่. ใน: การประชุมการป่าไม้ประจำปี พ.ศ. 2564 “84 ปี วิชาการป่าไม้ไทยเพื่อปวงชน”. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 173.

Baradran-Shoraka, M. 2009. Site selection of temporary shelter for municipality district No.1 of Tehran based on damage assessment (in Persian). M.Sc. Thesis, Science in Natural Disaster Management, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran.

Purfürst, T. 2022. The permanent German forest rescue point system—Concept, geographical analysis, and optimisation. Forests 13: 197. doi.org/10.3390/f13020197

Powertec. 2014. Improving mobile signal. Powertec Telecommunications Pty Ltd., Australia.

Sentürk, E., Erener, A. 2017. Determination of temporary shelter areas in natural disasters by GIS a case study for Gölcük/Turkey. International J. Eng. Geosci. 2(3): 84–90. doi.org/10.26833/ijeg.317314

Thaimobilecenter. 2558. Criteria standard of phone signal. https://www.thaimobilecenter.com/tips-2558/how-to-check-and-boost-your-phone-signal.asp, 3 พฤศจิกายน 2565.

Ünal, M., Uslu, C. 2016. GIS-based accessibility analysis of urban emergency shelters: The case of Adana city. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, International GeoAdvances Workshop, Istanbul, Turkey, pp. 95–101.

การวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ บริเวณอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

Analysis of forest encroachment risk at Kaeng Krung National Park, Surat Thani province

สุขุม จันทโชติ[a,*], **วันชัย อรุณประภารัตน์**[b], **นันทชัย พงศ์พัฒนานุรักษ์**[b]
Sukhum Chanthachot[a,*], Wanchai Arunpraparat[b], Nantachai Pongpattananurak[b]
[a]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[a]The Graduate School, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: Khum5561@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบุกรุกและวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้บริเวณอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยนำปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ เส้นชั้นความสูงและจุดความสูงของพื้นที่ ความลาดชันของพื้นที่ ระยะห่างจากแหล่งน้ำ ระยะห่างจากแหล่งชุมชน ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ การใช้ประโยชน์ที่ดิน และรายได้เฉลี่ยระดับตำบล มาวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก ผลการศึกษาพบว่า ความสูงของพื้นที่ ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ การใช้ประโยชน์ที่ดิน รายได้เฉลี่ยระดับตำบล เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการบุกรุกพื้นที่ป่า พื้นที่มีความเสี่ยงต่อการบุกรุกสูงมาก สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก คิดเป็นร้อยละ 26.83, 28.07, 18.94, 15.58 และ10.58 ตามลำดับ และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ความเสี่ยงที่จะเกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ มีค่าความถูกต้องร้อยละ 97.30 ดังนั้นในการป้องกันและแก้ไขปัญหาการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ควรนำปัจจัยที่มีผลต่อการบุกรุกมาใช้ประโยชน์สำหรับการกำหนดมาตรการ และการเพิ่มการลาดตระเวนพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง เพื่อเป็นการป้องปรามการบุกรุกทำลายทรัพยากรป่าไม้ในอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง
คำสำคัญ: พื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่า, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง

Abstract

The objectives of this study aimed to investigate the factor affecting forest encroachment and analyze forest encroachment risk at Kaeng Krung National Park, Surat Thani Province. Eight factors composed of altitude, slope, distance from stream, distance from community, distance from transportation route, distance from forest ranger unit, land use and income of sub district level was analyzed using the logistic regression. The results indicated that there were five factors related to forest encroachment such as altitude, distance from transportation, distance from forest ranger unit, land use and income. Forest area with very high risk, high risk, moderate risk, low risk and very low risk of forest encroachment were 26.83%, 28.07%, 18.94%, 15.58%, and 10.58% respectively. In addition, the percentage of accuracy by using point overlay technique was 97.30. These results can be used for supporting forest protection and planning of surveillance in Kaeng Krung National Park.
Keywords: Forest encroachment risk area, Geographic information system, Kaeng Krung National Park

คำนำ

ทรัพยากรป่าไม้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีค่าอย่างมากต่อเศรษฐกิจและสังคม รวมทั้งความมั่นคงของชาติ จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้ในหลาย ๆ พื้นที่ปรากฏว่าพื้นที่ป่ามีแนวโน้มลดลง (อาภาภรณ์ และคณะ, 2561; สุภาภรณ์, 2559) การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าของประเทศไทย ช่วงปี พ.ศ. 2516 ถึง พ.ศ. 2543 พื้นที่ป่าลดลงจาก 139 ล้านไร่ เหลือ 81 ล้านไร่ หรือคิดเป็นอัตราการลดลงของพื้นที่ป่าประมาณ 2.2 ล้านไร่ต่อปี และช่วงปี พ.ศ. 2543 ถึงปี พ.ศ. 2559 พื้นที่ป่าลดลงจากประมาณ 106.32 ล้านไร่ เหลือ 102.17 ล้านไร่ หรือคิดเป็นอัตราการลดลงของพื้นที่ป่าประมาณ 2.4 แสนไร่ต่อปี (คณะกรรมาธิการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) และในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีพื้นที่ป่าทั้งหมด 102.35 ล้านไร่ หรือ ร้อยละ 31.58 ของพื้นที่ประเทศไทย (กรมป่าไม้, 2563) จากการลดลงของพื้นที่ป่าในอดีตทำให้ทรัพยากรป่าไม้และถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าถูกทำลาย พืชพรรณและสัตว์ป่าหลายชนิดถูกรุกราน ระบบนิเวศป่าไม้เสื่อมโทรม รวมถึงเป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดภัยธรรมชาติของประเทศ เช่น ภัยแล้ง และอุทกภัย (ราชกิจจานุเบกษา, 2561) ตามแผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) และร่างแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 13 พ.ศ. 2566–2570 ประเมินสถานการณ์ของทุนทรัพยากรทางธรรมชาติที่สำคัญของประเทศ พบว่าทรัพยากรป่าไม้ของไทยมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ โดยมีสัดส่วนพื้นที่ป่าไม้อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 31–33 ของพื้นที่ทั้งหมด จากการปลูกป่าไม้ทดแทนได้ใกล้เคียงกับพื้นที่ที่สูญเสียไปในแต่ละปี เมื่อพิจารณาแนวโน้มในระยะยาวพบว่าในอดีตการบุกรุกทำลายป่าเป็นสาเหตุสำคัญที่สุดของการสูญเสียพื้นที่ป่าไม้ไทย ทว่าในปัจจุบันปัญหาไฟป่าทั้งที่เกิดจากเหตุการณ์ทางธรรมชาติและฝีมือมนุษย์ได้กลายมาเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียพื้นที่ป่าไม้ที่มากที่สุดของประเทศไทย และมีแนวโน้มที่สถานการณ์ไฟป่าจะมีความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่นำมาซึ่งภาวะโลกร้อนจะส่งผลให้ภัยคุกคามต่อพื้นที่ป่าไม้และความหลากหลายทางชีวภาพทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นในอนาคต ซึ่งได้มีการกำหนดหมุดหมายที่ 10 ประเทศไทยมีเศรษฐกิจหมุนเวียนและสังคมคาร์บอนต่ำ มีเป้าหมายในการอนุรักษ์ ฟื้นฟูและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน โดยมีพื้นที่ป่าไม้เพิ่มขึ้นเป็นป่าไม้ธรรมชาติร้อยละ 33 และพื้นที่ป่าเศรษฐกิจเพื่อการใช้ประโยชน์ ร้อยละ 12 ของพื้นที่ประเทศภายในปี 2570 ซึ่งที่ผ่านมาการป้องกันการบุกรุกทำลายทรัพยากรป่าไม้มีการดำเนินการตามมาตรการในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การลาดตระเวนตรวจป่าเพื่อตรวจสอบการบุกรุก การประชาสัมพันธ์และส่งเสริมกิจกรรมต่าง ๆ ให้เกิดความรู้ความเข้าใจ มีจิตสำนึกในการดูแลรักษาทรัพยากรป่าไม้ ปัจจุบันการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศได้มีความสำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้ในการดูแลรักษาป่า การสำรวจทรัพยากรป่าไม้และการจัดทำแผนมาตรการในการป้องกันพื้นที่ป่า เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย ใช้เวลาน้อย และลดค่าใช้จ่าย (ธิดารัตน์, 2559; สุภาภรณ์, 2559; อาภาภรณ์ และคณะ, 2561)

อุทยานแห่งชาติแก่งกรุงตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีสภาพเป็นเทือกเขาสูงและเป็นพื้นที่หนึ่งที่ยังคงมีความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ เนื่องจากเป็นพื้นที่เป็นป่าดิบชื้นที่อุดมสมบูรณ์ มีพันธุ์ไม้มีค่าหลายชนิดและสัตว์ป่าชุกชุม อย่างไรก็ตามบริเวณโดยรอบมีชุมชนตั้งอยู่ใกล้กับพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการบุกรุกพื้นที่ป่า ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์จึงมีความจำเป็นเพื่อใช้การตัดสินในการวางแผนการป้องกันการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ โดยวิเคราะห์จากปัจจัยต่าง ๆ ทั้งด้านกายภาพ เศรษฐกิจ และสังคมที่มีผลต่อการบุกรุกพื้นที่ป่า เปรียบเทียบกับสถิติคดีการบุกรุกพื้นที่ของอุทยานแห่งชาติแก่งกรุงที่ผ่านมา วิเคราะห์ความเสี่ยงที่จะเกิดการบุกรุกพื้นที่ป่าและจัดทำแผนที่แสดงความเสี่ยงในการบุกรุกเพื่อสำหรับการเฝ้าระวัง ป้องกัน การบุกรุกทำลายทรัพยากรป่าไม้ในอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีเนื้อที่ประมาณ 541 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็น 338,125 ไร่ ครอบคลุมพื้นที่อำเภอท่าชนะ อำเภอไชยา อำเภอท่าฉาง กิ่งอำเภอวิภาวดี (Fig. 1) ลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูง สภาพพื้นที่เป็นป่าดิบชื้น พันธุ์ไม้เด่นที่พบในพื้นที่ ได้แก่ หลุมพอ (*Intsia palembanica* Miq.) จำปาป่า (*Michelia champaca* L.) ยางมันหมู (*Dipterocarpus kerrii* King) ไข่เขียว (*Parashorea stellata* kurz) และไม้วงศ์ยางอื่น ๆ (*Dipterocarpus* spp.) สัตว์ป่าที่อาศัยอยู่ในอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ที่พบประกอบด้วย ช้างป่า (*Elephas maximus*) เสือ (*Panthera tigris*) หมี (*Ursus thibetanus*) กระทิง (*Bos gaurus*) วัวแดง (*Bos javanicus*) (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช, 2563)

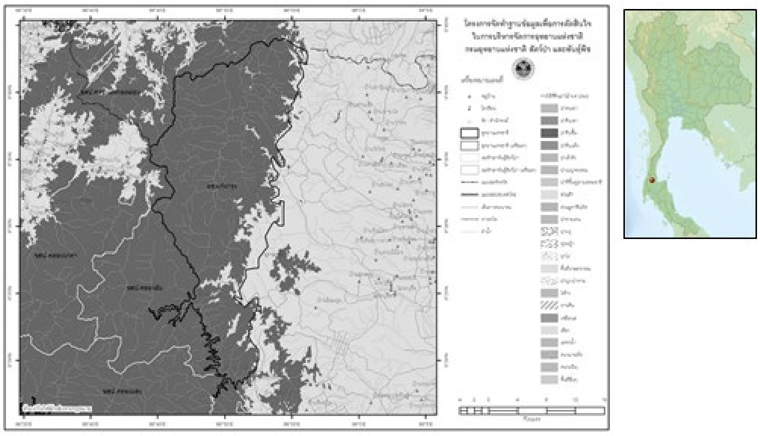


Fig. 1 Map of Kaeng Krung National Park, Surat Thani Province
ที่มา: กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช (2563)

การรวบรวมข้อมูลและจัดเตรียมข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์

1. รวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ ข้อมูลทุติยภูมิ ข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงบรรยาย รวมไปถึงข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่เป็นปัจจัยมีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุก เพื่อนำมาออกแบบสร้างฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

2. จัดเตรียมข้อมูลเชิงพื้นที่ทั้งหมดจำนวน 8 ชั้นข้อมูล ได้แก่ ความสูงจากระดับน้ำทะเล ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม ระยะห่างจากแหล่งน้ำ ระยะห่างจากชุมชน ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ ความลาดชัน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และรายได้เฉลี่ยรายตำบลที่อยู่ติดกับพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง

3. นำเข้าข้อมูลทั้งหมดสู่ฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ArcGIS โดยแปลงข้อมูลเชิงพื้นที่ให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ในลักษณะจุด (Point) เส้น (Line) และพื้นที่ (Polygon) ให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข (Digital) ที่คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถอ้างอิงพิกัดทางภูมิศาสตร์ได้

4. ทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) ของแผนที่ร่วมกับข้อมูลเชิงบรรยาย (attribute data) ซึ่งแสดงคุณลักษณะของข้อมูลเพื่อให้ได้เชิงพื้นที่มีรายละเอียดกำกับ (Table 1)

Table 1 Variable, spatial data and sources data

Variables	Category		Sources data
	Spatial data	Attribute data	
1. Altitude (X_1)	Line/Point	Mean sea level	Royal Thai Survey Department
2. Transportation (X_2)	Line	Type of transportation	Kaeng Krung National Park
3. Water stream (X_3)	Line	Name, Type of water resource	Kaeng Krung National Park
4. Community (X_4)	Point	Name, Location, Boundary	Kaeng Krung National Park
5. Forest ranger unit (X_5)	Point	Name, Location	Kaeng Krung National Park
6. Slope (X_6)	Polygon	Percentage of slope	Digital Elevation Model
7. Land used (X_7)	Polygon	Type of land used	Kaeng Krung National Park
8. Income of subdistrict level (X_8)	Polygon	Mean income of subdistrict	Kaeng Krung National Park

การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุก

รวบรวมข้อมูลตำแหน่งตามจุดพิกัด (X,Y) ที่เกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ของอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ปี พ.ศ. 2548–2563

1. เลือกและกำหนดจุดในพื้นที่ศึกษา จำนวน 364 จุด ให้ครอบคลุมและกระจายทั่วพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง โดยใช้ขนาดตัวอย่างในการวิเคราะห์ Logistic Regression (กัลยา, 2549)

2. ใช้ข้อมูลตำแหน่งของการบุกรุกตามสถิติคดีป่าไม้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับปัจจัยแวดล้อม ร้อยละ 80 หรือ จำนวน 292 จุด

3. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับปัจจัยแวดล้อม 8 ปัจจัย ที่เกี่ยวข้องจากจุดตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มทั้งหมด โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางสถิติ สร้างสมการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้วยวิธี Logistic Regression (Equation 1)

$$E(Y) = \frac{e^{\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+\beta_4x_4+\beta_5x_5+\beta_6x_6+\beta_7x_7+\beta_8x_8}}{1+e^{\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+\beta_4x_4+\beta_5x_5+\beta_6x_6+\beta_7x_7+\beta_8x_8}} \quad (1)$$

โดย E (Y) คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ (การเกิดคดีป่าไม้)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2 \ldots \beta_8$ คือ สัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้จากข้อมูล

e คือ ล็อคธรรมชาติ (Natural logarithms) มีค่าเท่ากับ 2.718

$X_1, X_2, \ldots, X_8$ คือ ตัวแปรอิสระจำนวน 8 ปัจจัย

4. นำสมการที่ได้ไปวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0–1 ด้วยโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แล้วนำมาจัดระดับความเสี่ยงใหม่ แบ่งเป็นอันตรภาคชั้นและความถี่เท่ากัน โดยแบ่งช่วงระดับความเสี่ยงออกเป็น 5 ระดับ คือ

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำมาก ค่า E(Y) = 0.00–0.20

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำ ค่า E(Y) = 0.21–0.40

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกปานกลาง ค่า E(Y) = 0.41–0.60

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกสูง ค่า E(Y) = 0.61–0.80

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกสูงมาก ค่า E(Y) = 0.81–1.00

5. ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่พื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง โดยใช้จุดตำแหน่งที่เหลือ จำนวน 72 จุด (ร้อยละ 20) เป็นตัวแทนในการสำรวจความถูกต้องมาทำการซ้อนทับกับแผนที่ความเสี่ยงต่อการบุกรุกที่ได้จากการวิเคราะห์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

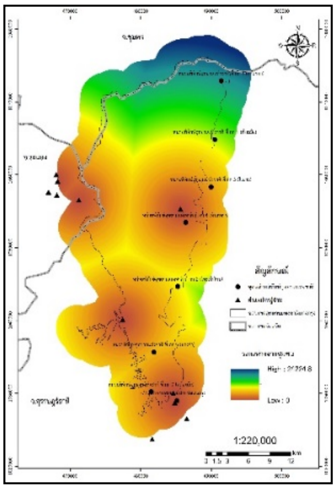
การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี Logistic Regression จากปัจจัยแวดล้อมทั้งหมด 8 ปัจจัย (Fig. 2) พบว่าปัจจัยแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์ที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการบุกรุกที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ เส้นชั้นความสูงและจุดความสูงของพื้นที่ ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ การใช้ประโยชน์ที่ดิน และรายได้เฉลี่ยระดับตำบล (Table 1) โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรกับพื้นที่เสี่ยงการบุกรุก มีสมการความสัมพันธ์ (Equation 2) ดังนี้

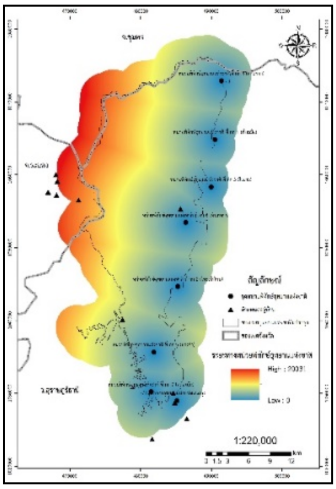
$$Y = 10.324 - 0.010(X_1) - 0.005(X_2) + 0.001(X_5) - 3.088(X_7) + 0.000(X_8) \quad (2)$$

Table 2 Variables in the equation

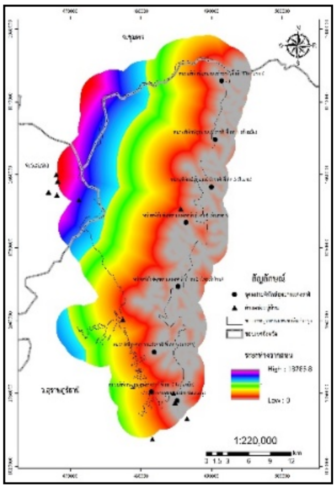
Variable	β	*p*-value	Exp(B)
Altitude (X_1)	-0.010	0.002	0.990
Distance from transportation (X_2)	-0.005	0.000	0.995
Distance from forest ranger unit (X_5)	0.001	0.003	1.001
Land use (X_7)	-3.088	0.003	0.046
Mean income of subdistrict (X_8)	0.000	0.000	1.000
Constant	10.324	0.001	30445.545



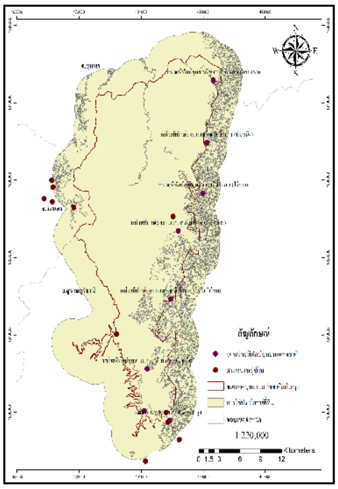
a) Distance from village



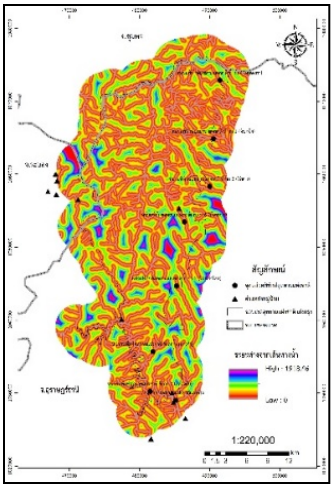
b) Distance from ranger unit



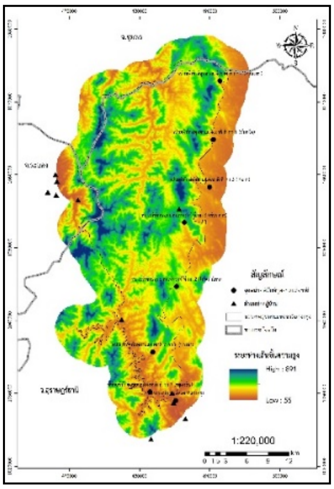
c) Distance from road



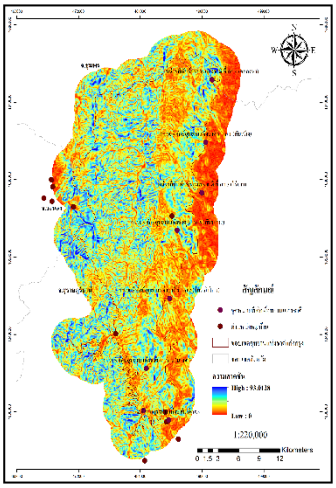
d) Landuse



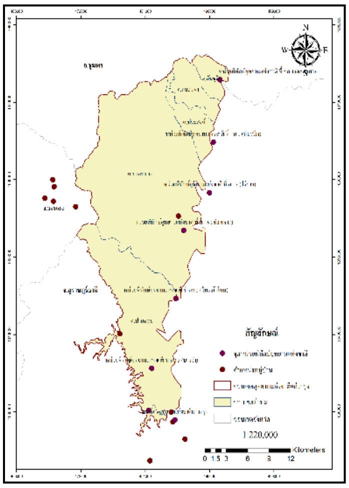
e) Distance from water bodies



f) Elevation from sea level



g) Slope



h) Average income by sub-district

Fig. 2 Factors for analysis of risk for forest encroachment at Kaeng Krung National Park

การวิเคราะห์และกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง

การกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกที่มีค่าอยู่ในช่วง 0–1 นำมาจัดชั้นระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุก 5 ระดับ คือ เสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำมาก เสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำ เสี่ยงต่อการบุกรุกปานกลาง เสี่ยงต่อการบุกรุกสูง และเสี่ยงต่อการบุกรุกสูงมาก โดยสามารถแสดงเป็นแผนที่พื้นที่ความเสี่ยง (Fig. 2) และผลการศึกษาการวิเคราะห์พื้นที่ความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ได้ดังนี้

1. เส้นชั้นความสูงและจุดความสูงของพื้นที่ จากการศึกษาพบว่า พื้นที่เกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ จะเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ที่มีระดับความสูงในช่วง 150–350 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ซึ่งในระดับความสูงของพื้นที่ที่มีระดับต่ำจะมีโอกาสเกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ได้สูงกว่าพื้นที่ที่อยู่ในระดับสูง เนื่องจากพื้นที่ที่อยู่ในระดับต่ำสามารถเข้าถึงได้ง่าย มีความเหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตร และที่อยู่อาศัย

2. เส้นทางคมนาคม โดยเส้นทางการคมนาคมในพื้นที่และบริเวณแนวเขตอุทยานฯ สามารถเข้าถึงพื้นที่ได้ง่าย เนื่องจากบริเวณโดยรอบส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ทำเกษตรและที่อยู่อาศัย ดังนั้นจึงมีโอกาสเกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้มากกว่าพื้นที่ที่ไม่มีเส้นทางสัญจร

3. ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ พื้นที่ที่อยู่ไกลจากหน่วยพิทักษ์อุทยานจะมีโอกาสเกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้สูง เนื่องด้วยข้อจำกัดในการลาดตระเวนให้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ การลอบเข้ากระทำผิดจึงยังคงปรากฏอยู่

4. การใช้ประโยชน์ที่ดิน การใช้ประโยชน์ที่ดินแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ คือ สิ่งปลูกสร้าง ไม้ยืนต้น ป่าไม้ พื้นที่น้ำ และทุ่งหญ้าสลับไม้พุ่ม/ไม้ละเมาะ จากการศึกษาพบว่าการเกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ทำการเกษตรหรือในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่จากพื้นที่ป่าเป็นพื้นที่เกษตรกรรม เนื่องจากพื้นที่ติดกับพื้นที่เกษตรง่ายต่อการเข้าถึงและบุกรุกพื้นที่ป่าธรรมชาติเพิ่มเติม

5. รายได้เฉลี่ยระดับตำบล ตำบลที่อาศัยอยู่โดยรอบพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง มี 10 ตำบล ซึ่งรายได้เฉลี่ยต่อครัวเรือนจะส่งผลต่อการเกิดคดีบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ เนื่องจากครัวเรือนที่มีรายได้น้อยจะมีโอกาสในการบุกรุกแผ้วถางพื้นที่เพื่อเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่ป่าเพื่อทำการเกษตรสำหรับการเพิ่มรายได้ให้กับครอบครัว

ผลการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง

ผลการจำแนกระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกป่าที่แบ่งออกเป็น 5 ระดับ ตามเกณฑ์ที่กำหนดขึ้นแสดงใน Figure 3 พื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกสูง มีพื้นที่มากที่สุด 94,903 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 28.07 ของพื้นที่อุทยานฯ โดยพบอยู่ใกล้กับพื้นที่ชุมชนและมีเส้นทางการสัญจรเข้าถึง รองลงมาเป็นพื้นที่เสี่ยงสูงมากมีพื้นที่ 90,719 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 26.83 ของพื้นที่อุทยานฯ โดยพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการ บุกรุกสูงมากจะอยู่บริเวณแนวเขตด้านทิศตะวันออกของอุทยานฯ ท้องที่ตำบลละแม จังหวัดชุมพร ตำบลคลองพา ตำบลประสงค์ ตำบลปากหมาก ตำบลปากฉลุย ตำบลตะกุกเหนือ พื้นที่เสี่ยงปานกลางมีจำนวน 64,045 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 18.94 ของพื้นที่อุทยานฯ เสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำมีจำนวน 52,675 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 15.58 ของพื้นที่อุทยานฯ และเสี่ยงบุกรุกต่ำมากมีจำนวน 37,783 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 10.58 ของพื้นที่อุทยานฯ (Table 3)

Table 3 Forest encroachment risk area at Kaeng Krung National Park

Risk level	Area (rai)	%
Very low	35,783	10.58
Low	52,675	15.58
Moderate	64,045	18.94
High	94,903	28.07
Very high	90,719	26.83

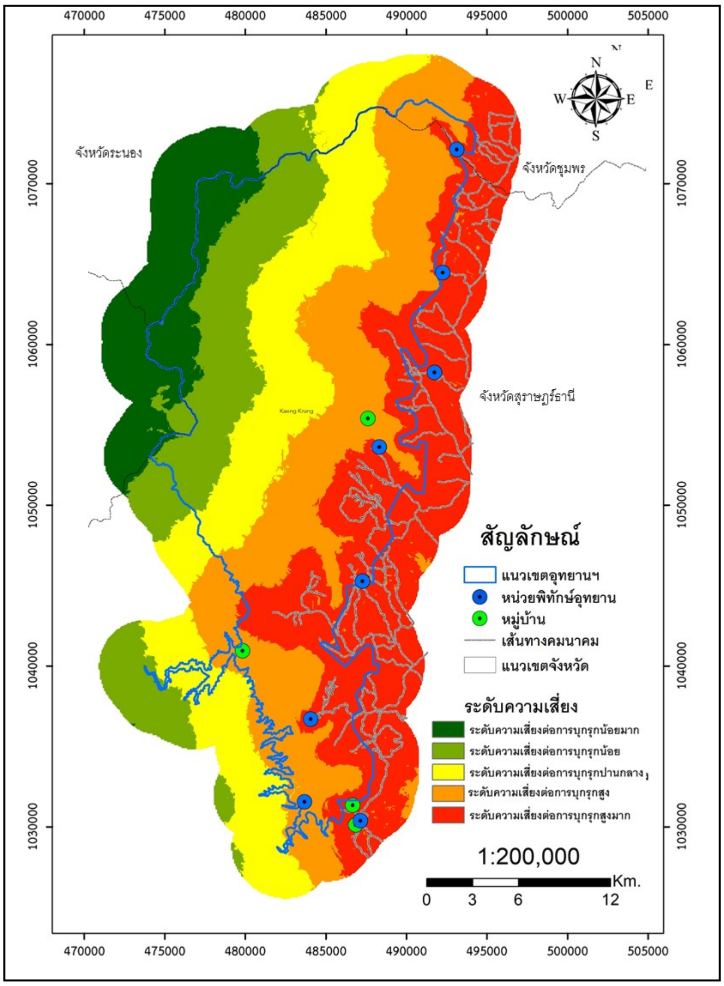


Fig. 3 Map of forest encroachment risk area at Kaeng Krung National Park

จากการตรวจสอบความถูกต้องโดยการซ้อนทับจุดตัวอย่าง ร้อยละ 20 ของข้อมูลทั้งหมด กับแผนที่ความเสี่ยงและเปรียบเทียบความถูกต้องของแผนที่ความเสี่ยงต่อการบุกรุกป่าในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง พบว่ามีค่าความถูกต้องร้อยละ 97.30 ดังนั้นผลการศึกษาที่ได้นี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกป่าของอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง

โดยภาพรวมจะเห็นได้ว่าพื้นที่เสี่ยงสูงของอุทยานแห่งชาติแก่งกรุงจะพบในพื้นที่ระดับต่ำ เดินทางเข้าถึงได้เนื่องจากมีถนนสามารถเดินทางเข้าถึงได้สะดวก มีชุมชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่และบางหมู่บ้านอยู่ติดกับพื้นที่อุทยานฯ จึงเป็นสาเหตุหลักในความเสี่ยงต่อการลักลอบตัดไม้ ล่าสัตว์ป่าและกระทำความผิดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ปัญหารายได้ของครัวเรือนเป็นอีกประเด็นที่สำคัญต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าเพื่อเปลี่ยนเป็นพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อต้องการเพิ่มผลผลิตด้านการเกษตร โดยเฉพาะการบุกรุกพื้นที่เพื่อปลูกยางพารา ซึ่งประเด็นเหล่านี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกป่าในหลาย ๆ พื้นที่ของประเทศไทย เช่น วิภพ และจันธิมา (2564) พบว่าระยะห่างจากถนนและชุมชน ความสูงของพื้นที่ และความชันของพื้นที่ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสี่ยงสูงในการบุกรุกพื้นที่ป่า เช่นเดียวกับ สมนิมิตร และคณะ (2560) พบว่าพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จะเป็นพื้นที่สูงและมีความลาดชันต่ำ ใกล้กับถนน ซึ่งง่ายต่อการแอบลักลอบตัดไม้มีค่าในพื้นที่ป่า จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าในการศึกษานี้ จึงควรนำไปเป็นแนวทางในการจัดการพื้นที่ให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันและการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าในเขตอุทยานแห่งชาติแก่งกรุงต่อไป

สรุป

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติด้วยสมการ Logistic Regression พบว่าปัจจัยแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์ที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าในอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง มีทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ เส้นชั้นความสูงและจุดความสูงของพื้นที่ ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ การใช้ประโยชน์ที่ดิน และรายได้เฉลี่ยระดับตำบล พื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการบุกรุกสูงมาก มีจำนวน 90,719 ไร่ หรือ ร้อยละ 26.83 ของพื้นที่อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง โดยพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการบุกรุกสูงมากจะอยู่บริเวณแนวเขตด้านทิศตะวันออกของอุทยานฯ ท้องที่ตำบลละแม จังหวัดชุมพร ตำบลคลองพา ตำบลประสงค์ ตำบลปากหมาก ตำบลปากฉลุย ตำบลตะกุกเหนือ และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่เสี่ยงต่อการบุกรุกมีค่า ร้อยละ 97.30 แสดงให้เห็นว่าผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกป่าของอุทยานแห่งชาติแห่งนี้ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วันชัย อรุณประภารัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร.นันทชัย พงศ์พัฒนานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำจนงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ คุณผดุงศักดิ์ เสือแก้ว นักวิชาการป่าไม้ชำนาญการพิเศษ อดีตหัวอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง สำหรับการสนับสนุนข้อมูลในการทำวิจัย และขอบคุณ ดร.เจษฎา วงพรม ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

กรมป่าไม้. 2563. โครงการจัดทำข้อมูลสภาพพื้นที่ป่าไม้ ปี พ.ศ. 2563. กรมป่าไม้. กรุงเทพฯ.

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช. 2563. อุทยานแห่งชาติแก่งกรุง. http://nps.dnp.go.th/parksdetail.php?id=22&name=อุทยานแก่งชาติแก่งกรุง, 7 สิงหาคม 2563.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2549. สถิติเพื่องานวิจัย. ภาควิชาสถิติ, คณะพาณิชยศาสตร์และบัญชี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

คณะกรรมาธิการการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. การแก้ไขปัญหาที่ดินป่าไม้ของชาติ. สภานิติบัญญัติแห่งชาติสำนักเลขาธิการวุฒิสภา, กรุงเทพฯ.

ธิดารัตน์ คำล้อม. 2559. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้ ตำบลต้นยวน อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี ประเทศไทย. ใน การประชุมทางวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 1 วันที่ 22 มิถุนายน 2559. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, หน้า 265–273.

ราชกิจจานุเบกษา. 2561. ประกาศสำนักนายกรัฐมนตรี เรื่องการประกาศแผนการปฏิรูปประเทศ. เล่ม 135 ตอนที่ 24 ก, หน้า 13. กรุงเทพฯ.

วิภพ แพงวังทอง, จันธิมา ศรนารายณ์. 2564. การกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกป่าและวิเคราะห์ความอ่อนไหว: กรณีศึกษาป่าสงวนแห่งชาติในจังหวัดพะเยา. วารสารวิชาการเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่ 2(1): 16–27.

สุภาภรณ์ ผ่องศาลา. 2559. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝางขวา จังหวัดลำปาง. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54 ระหว่างวันที่ 2–5 กุมภาพันธ์ 2559. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 1038–1045.

สมนิมิตร พุกงาม, ประสงค์ สงวนธรรม, สุภาภรณ์ ผ่องศาลา. 2560. การวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปาง. วารสารวนศาสตร์ 36(1): 123–128.

อาภาภรณ์ ทองเสงี่ยม, กาญจน์เขจร ชูชีพ, รัชนี โพธิแท่น. 2561. การประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกป่าในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่แจ่มตอนล่าง จังหวัดเชียงใหม่. วารสารวนศาสตร์ 27(2): 108–117.

ความหลากชนิดของไม้ต้นในป่าพรุน้ำจืดของอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย

Tree diversity in freshwater swamp forest of Tham Luang-Khun Nam Nang Non National Park, Chiang Rai province

พลอยวรีย์ นิทโน , กฤตวิชญ์ สุขอึ้ง* , กิตติชัย จันธิมา, สฤทธิ์พร วิทยผดุง

Ploywaree Nitano, Krittawit Suk-ueng*, Kittichai Chantima, Saritporn Vittayapadung

โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เชียงราย 57100

Environmental Science and Technology Program, Faculty of Science and Technology, Chiang Rai Rajabhat University, Chiang Rai 57100, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: nsukung@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจไม้ต้นในระหว่างเดือนเมษายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563 บริเวณป่าพรุน้ำจืด (8 ไร่) ของอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย โดยวางแปลงศึกษาชั่วคราวขนาด 50×20 เมตร จำนวน 1 แปลง โดยแบ่งเป็น 10 แปลง ขนาด 10×10 เมตร และวิเคราะห์องค์ประกอบของสังคมพืช ผลจากการสำรวจพบพืชทั้งหมด 8 ชนิด ได้แก่ ดีหมี (*Cleidion javanicum*) ปันแถ (*Albizia lucidior*) ประดู่ส้ม (*Bischofia javanica*) สารภี (*Mammea siamensis*) ตองเต่า (*Pterospermum cinnamomeum*) ทองหลางน้ำ (*Erythrina fusca*) ตองเต๊า (*Mallotus barbatus*) และ ไม่ทราบชนิด มีดัชนีความหลากชนิด (Shannon - Wiener index) เท่ากับ 1.74 ซึ่งแสดงถึงความหลากชนิดค่อนข้างน้อย และชนิดที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด (IVI) คือ ดีหมี (123.90) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (66.81), ตองเต๊า (26.34) และ ประดู่ส้ม (24.13) ตามลำดับ

คำสำคัญ: ประเทศไทย, ป่าพรุ, พืช

ABSTRACT

This study aimed to survey tree species between April to July 2020 in the freshwater swamp forest (8 Rai) in Tham Luang-Khun Nam Nang Non National Park, Chiang Rai province. The temporary plot (20×50 m.) with 10 study plots (10×10 m.) was created to survey tree species. Plant community composition was analyzed. The survey result showed that seven species of plants, namely *Cleidion javanicum*, *Albizia lucidior*, *Bischofia javanica*, *Mammea siamensis*, *Pterospermum cinnamomeum*, *Erythrina fusca*, *Mallotus barbatus* and Unknown#1 were found in which Shannon - Wiener index showed species diversity in quite low level (1.74). *Cleidion javanicum* had the highest importance value index (IVI) with the value of 123.90, followed by *Erythrina fusca* (66.81), *Mallotus barbatus* (26.34) and *Bischofia javanica* (24.13), respectively.

Keywords: Plant, Swamp forest, Thailand

คำนำ

ป่าพรุน้ำจืด (Freshwater swamp forest) เป็นป่าไม่ผลัดใบชนิดหนึ่งที่อยู่ในพื้นที่ราบลุ่ม เกิดจากแอ่งน้ำจืดที่ขังตัวติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน มีการสะสมของชั้นดินอินทรีย์วัตถุ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ เศษซากของต้นไม้ ใบไม้ต่าง ๆ แล้วย่อยสลายช้า ๆ กลายเป็นดินพีตหรือดินอินทรีย์ที่มีลักษณะหยุ่นยวบเหมือนฟองน้ำที่มีความหนาแน่นน้อย อุ้มน้ำได้มาก ระบบนิเวศในป่าพรุนั้นมีความหลากหลาย และเกี่ยวเนื่องกัน ไม้ต้นจะมีรากแขนงแข็งแรงแผ่ออกไปเพื่อช่วยพยุงลำต้น และให้ยืนตัวทรงอยู่ได้ (สืบพงศ์, 2560) การศึกษาสัณฐานวิทยาของพืชหรือโครงสร้างภายนอกของพืช (เช่น ราก ลำต้น ใบ ดอก และผล) มีความจำเป็นต่อการศึกษาด้านอนุกรมวิธานพืชซึ่งต้องอาศัยข้อมูลทั้งในด้านถิ่นที่อยู่อาศัย และสัณฐานวิทยาของพืช (วรดลต์, 2558) เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชได้ พรรณไม้ในป่าพรุส่วนใหญ่มีรากแก้วค่อนข้างสั้น รากแขนงแผ่กว้าง มีรากค้ำยัน โคนต้นมีพูพอน และมีรากหายใจ ป่าพรุที่สมบูรณ์และมีพื้นที่ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย คือ ป่าพรุโต๊ะแดง อยู่ในพื้นที่อำเภอเมือง อำเภอตากใบ และอำเภอสุไหงโกลก จังหวัดนราธิวาส โดยพบพันธุ์ไม้ดอก 109 วงศ์ 437 ชนิด และเฟิร์น 15 วงศ์ 33 ชนิด เช่น ตังหน (*Calophyllum tetrpterum*) ระไมป่า (*Baccaurea bracteata*) อ้ายบ่าว (*Stemonurus malaccensis*) และหลุมพี (*Eleiodoxa conferta*) เป็นต้น นอกจากนี้ป่าพรุยังเป็นที่อาศัยของสัตว์น้ำ แพลงก์ตอน ปู และปลาหลายชนิด (เช่น ปลาดุกลำพัน ปลาช่อน ปลาชะโด เป็นต้น) และเป็นแหล่งกักเก็บน้ำจืดขนาดใหญ่ตามธรรมชาติ (การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.; ดอกรัก และอุทิศ, 2552)

อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน มีพื้นที่ในความรับผิดชอบทั้งหมด 9.45 ตารางกิโลเมตร หรือ 5,965 ไร่ และมีพื้นที่ป่าพรุน้ำจืด 8 ไร่ สังคมพืชเด่นของอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน แบ่งออกเป็น 2 ชนิดป่า ได้แก่ ป่าเบญจพรรณซึ่งกระจายตามไหล่เขาตั้งแต่ระดับ 300–900 เมตร โดยมีพรรณไม้หลายชนิดผสมกันโดยพบไม้ต้น 28 วงศ์ 53 สกุล 82 ชนิด และป่าดิบเขา พบตั้งแต่ระดับ 800 เมตร ขึ้นไป โดยเป็นที่ราบบนภูเขาสูงโดยสำรวจพบไม้ยืนต้น 35 วงศ์ 48 สกุล 68 ชนิด (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, ม.ป.ป.; สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 15, ม.ป.ป.; องค์การบริหารส่วนตำบลโป่งผา, ม.ป.ป.) นอกจากนี้ยังมีสังคมป่าพรุน้ำจืดขนาดเล็กซึ่งอยู่ในขุนน้ำนางนอน และเป็นที่อยู่อาศัยของปูดอกข้อแดงซึ่งเป็นสัตว์อนุรักษ์ท้องถิ่นแห่งเดียวในประเทศไทย และอาจจะมีชนิดพืชที่สำคัญหรือหายาก (สำนักอุทยานแห่งชาติ, 2558; เชียงใหม่นิวส์, 2560; สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี, 2563) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาชนิดพืชในบริเวณป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ด้วยเหตุนี้จึงศึกษาชนิดพืชบริเวณป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการอนุรักษ์พืชและเป็นแหล่งเรียนรู้ของประชาชนในท้องถิ่น และผู้ที่สนใจเพื่อให้ประชาชนได้เห็นคุณค่าและสร้างจิตสำนึกในการอนุรักษ์พื้นที่ป่าพรุน้ำจืดในอนาคตต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

ป่าพรุน้ำจืดของอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน มีเนื้อที่รวมประมาณ 8 ไร่ อยู่ระหว่าง 2252000–2253000 องศาเหนือ และ 590000-591000 องศาตะวันออก โซน 47Q ในระบบพิกัด UTM (Universal Transverse Mercator) หรืออยู่ระหว่างเส้นลองจิจูดที่ 99 องศา 52 ลิปดา 18.9602 ฟิลิปดา ถึง เส้นลองจิจูดที่ 99 องศา 52 ลิปดา 19.1429 ฟิลิปดา เหนือ และเส้นละติจูด 20 องศา 21 ลิปดา 50.4625 ฟิลิปดา ถึง 20 องศา 22 ลิปดา 22.8181 ฟิลิปดาตะวันออก (QGIS Development Team, 2020) (Fig. 1)

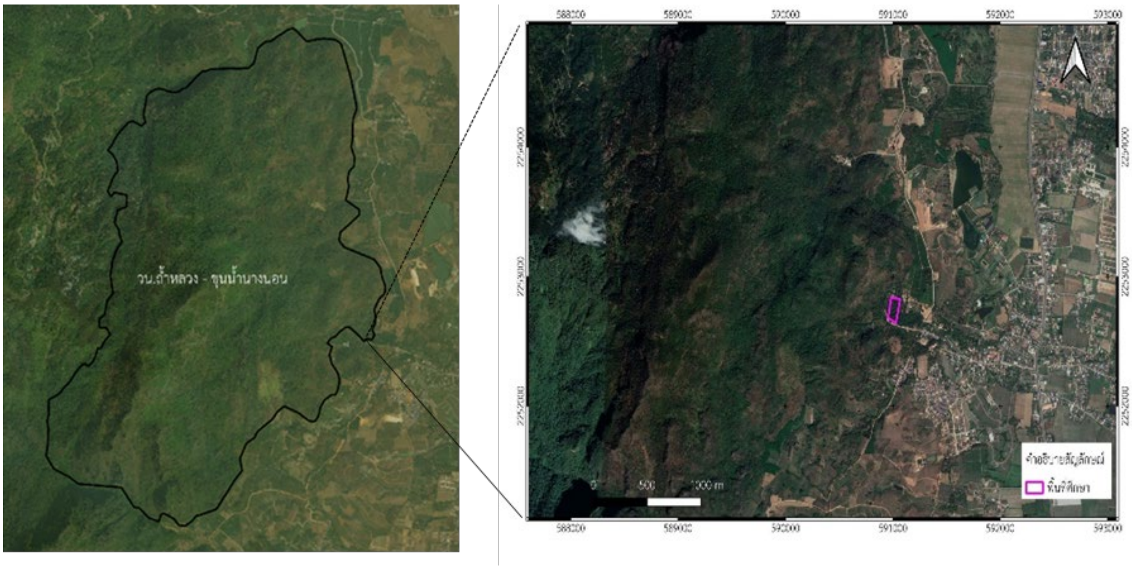


Fig. 1 The freshwater swamp forest in Tham Luang-Khun Nam Nang Non National Park, Chiang Rai Province

การสำรวจและการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการสำรวจไม้ต้นในพื้นที่ศึกษาในระหว่างเดือนเมษายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563 โดยการเดินสำรวจร่วมกับเจ้าหน้าที่ของอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน และใช้ระบบดาวเทียมนำร่องของโลก (Global Navigation Satellite System: GNSS) เพื่อกำหนดตำแหน่งของแปลงศึกษาตามคำแนะนำของเจ้าหน้าที่ของอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน โดยวางแปลงที่เป็นตัวแทนที่ดีซึ่งแสดงถึงสังคมพืชเพียง 1 แปลง (สมชญา, 2559) (Fig. 2) โดยวางแปลงตัวอย่างชั่วคราว (Temporary plot) ขนาด 20×50 เมตร จำนวน 1 แปลง โดยในแปลงตัวอย่างแบ่งเป็น 10 แปลงย่อย แต่ละแปลงย่อยมีขนาด 10×10 เมตร เพื่อสำรวจไม้ต้นที่มีเส้นรอบวงตั้งแต่ 30 เซนติเมตรขึ้นไป (Alder and Synnott, 1992; สามารถ และพัชรี, 2560) โดยวัดไม้ต้นที่มีเส้นรอบวงที่ความสูงระดับอก จากนั้นจัดทำบัญชีรายชื่อไม้ต้น ได้แก่ ชื่อวงศ์ ชื่อวิทยาศาสตร์ และชื่อสามัญ โดยอ้างอิงจากหนังสือที่เกี่ยวข้องกับสัณฐานวิทยาและชื่อพรรณไม้ ได้แก่ ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย (ราชันย์ และสมราน, 2557) และ A field guide to forest trees of northern Thailand (Gardner et al., 2000) รวมทั้งประเมินค่าดัชนีความหลากชนิด (Species diversity) โดยใช้ดัชนีของ Shannon – Wiener และค่าดัชนีความสำคัญของพรรณไม้ในสังคมพืช (Importance Value Index: IVI) ที่ได้จากการผลรวมของค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density: RD) ค่าความเด่นสัมพัทธ์ (Relative Dominance: RDo) ค่าความถี่สัมพัทธ์ (Relative Frequency: RF) (สุรชาติ และณัฐบดี, 2557)

Fig. 2 Study plot along natural trail (A and B)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการสำรวจในแปลงศึกษาทั้ง 10 แปลง (Fig. 3) พบพืชจำนวน 5 วงศ์ 7 สกุล 8 ชนิด 19 ต้น (Table 1) ได้แก่ ดีหมี (*Cleidion javanicum*) (8 ต้น), ปันแถ (*Albizia lucidior*) (1 ต้น), ประดู่ส้ม (*Bischofia javanica*) (2 ต้น), สารภี (*Mammea siamensis*) (1 ต้น), ตองเต่า (*Pterospermum cinnamomeum*) (1 ต้น), ทองหลางน้ำ (*Erythrina fusca*) (3 ต้น) และ ตองเต๊า (*Mallotus barbatus*) (2 ต้น) และ ไม่ทราบชนิด (1 ต้น) (Fig. 3 และ Fig. 4) โดยพืชทั้งหมดในแปลงศึกษาไม่อยู่ในสถานะที่ถูกคุมคามตามสหภาพสากลว่าด้วยการอนุรักษ์ (International Union for Conservation of Nature and Natural Resource: IUCN) (Chamchumroon et al., 2007)

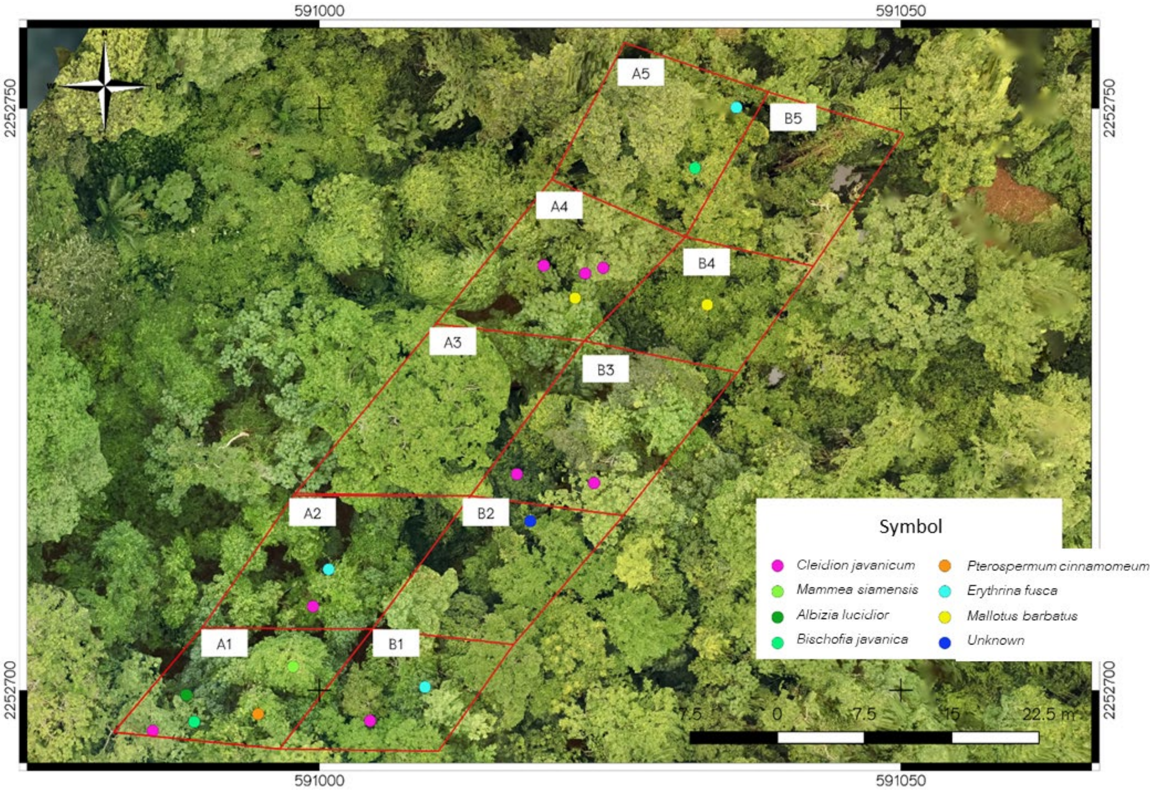


Fig. 3 Plant positions in study area

Fig. 4 Tree species pictures archived from the study area

ความหนาแน่นของไม้ต้นที่มากที่สุด คือ ดีหมี (0.008 ต้น/ตารางเมตร) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (0.003 ต้น/ตารางเมตร), ประดู่ส้ม (0.002 ต้น/ตารางเมตร และตองเต๊า (0.002 ต้น/ตารางเมตร) ความถี่ของไม้ต้นที่พบมากที่สุด คือ ดีหมี (50.00) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (30.00), ประดู่ส้ม (20.00) และตองเต๊า (20.00) และ ความเด่นของไม้ต้นที่มากที่สุด คือ ดีหมี (3.65) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (2.33) และ ไม่ทราบชนิด (0.65) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของไม้ต้นที่มากที่สุด คือ ดีหมี (ร้อยละ 42.10) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (ร้อยละ 15.79), ประดู่ส้ม (ร้อยละ 10.52) และตองเต๊า (ร้อยละ 10.52) ความเด่นสัมพัทธ์ของไม้ต้นที่มากที่สุด คือ ดีหมี (ร้อยละ 50.55) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (ร้อยละ 32.27) และ ไม่ทราบชนิด (ร้อยละ 9.00) และความถี่สัมพัทธ์ของไม้ต้นที่มากที่สุด คือ ดีหมี (ร้อยละ 31.25) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (ร้อยละ 18.75) ประดู่ส้ม (ร้อยละ 12.50) และตองเต๊า (ร้อยละ 12.50)

ชนิดไม้ที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด คือ ดีหมี (123.90) รองลงมา ได้แก่ ทองหลางน้ำ (66.81), ตองเต๊า (26.34), ประดู่ส้ม (24.13), Unknown#1 (20.93), สารภี (13.17), ตองเต่า (13.03) และ ปันแถ (12.06) (Table 1) และค่าความหลากชนิดโดยใช้สมการของ Shannon - Wiener Index มีค่าเท่ากับ 1.74 ซึ่งแสดงว่ามีค่าความหลากชนิดค่อนข้างน้อย

Table 1 Important Value Index of tree species

Species	D	F	Do	RD	RDo	RF	IVI
Cleidion javanicum	0.008	50.00	3.65	42.10	50.55	31.25	123.90
Erythrina fusca	0.003	30.00	2.33	15.79	32.27	18.75	66.81
Mallotus barbatus	0.002	20.00	0.24	10.52	3.32	12.50	26.34
Bischofia javanica	0.002	20.00	0.08	10.52	1.11	12.50	24.13
Mammea siamensis	0.001	10.00	0.12	5.26	1.66	6.25	13.17
Pterospermum cinnamomeum	0.001	10.00	0.11	5.26	1.52	6.25	13.03
Albizia lucidior	0.001	10.00	0.04	5.26	0.55	6.25	12.06
Unknown	0.001	10.00	0.65	5.26	9.00	6.67	20.93

D (Density), F (Frequency), Do (Dominance), RD (Relative density), RDo (Relative Dominance); RF (Relative frequency).

จากการสำรวจไม้ต้นบริเวณป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ) พบพรรณไม้ในพื้นที่ศึกษาได้ทั่วไปในป่าเบญจพรรณ ป่าดิบเขา ป่าดิบแล้ง และป่าดิบชื้น (อานุช และคณะ, 2556; กลุ่มงานพฤกษศาสตร์ป่าไม้, 2566) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นสังคมป่าผสม ทำให้พรรณไม้ที่พบในพื้นที่ศึกษาจึงแตกต่างจากพรรณไม้ที่พบในป่าพรุในจังหวัดนราธิวาสโดยพบกระเปรียะ ย่านลำเท็ง คมบาง และกะท้อแดง เป็นต้น (ชรินทร์, 2532) แต่พบสังคมพืชที่พบในป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติภูซางซึ่งเป็นสังคมป่าผสมเช่นเดียวกับสังคมพืชในพื้นที่ศึกษา เช่น โมกใหญ่ ตาเสือ มะหวด หว้า กะเจียน เม่าไข่ปลา และทุ่งฟ้า เป็นต้น (กฤตวิชญ์ และคณะ, 2562) จากการวิเคราะห์ข้อมูลไม้ต้นเชิงปริมาณ (ความหนาแน่น, ความถี่, ความเด่น, ความหนาแน่นสัมพัทธ์, ความเด่นสัมพัทธ์, ความถี่สัมพัทธ์ และค่าดัชนีความสำคัญ) พบว่าดีหมีมีค่าเหล่านั้นมากที่สุด แสดงว่าดีหมีมีความสำคัญต่อระบบนิเวศป่าผสมนี้ ส่วนตองเต่า ปันแถ และสารภี ควรอนุรักษ์ไว้ เพราะพบได้น้อยในสังคมพืชป่าผสมนี้ซึ่งอาจจะสูญพันธุ์ได้ในอนาคต ค่าความหลากชนิดเท่ากับ 1.74 เปรียบเทียบกับสังคมป่าผสมในป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติภูซาง พบว่ามีค่าความหลากชนิดของไม้ต้นเท่ากับ 2.46 จากผลการศึกษาเห็นได้ว่าค่าความหลากชนิดของไม้ต้นในพื้นที่ศึกษามีค่าน้อยกว่าป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติภูซาง อาจเนื่องจากสภาพป่าที่เคยถูกรบกวน และอยู่ในช่วงการขึ้นทดแทน รวมทั้งมีลักษณะพื้นที่ของป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน เข้าถึงการใช้ประโยชน์โดยชุมชนได้ง่าย และมีชุมชนอยู่ใกล้กับป่าซึ่งอาจจะทำให้ค่าความหลากชนิดของไม้ต้นค่อนข้างน้อย (สมหญิง และคณะ, 2552) ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลของไม้ต้นเพื่อประโยชน์ในการอนุรักษ์พื้นที่ป่าพรุน้ำจืดในอนาคตได้ อย่างไรก็ตาม ควรจัดทำฐานข้อมูลการใช้ประโยชน์ของพรรณไม้ที่มีชุมชนเข้ามามีส่วนร่วม รวมทั้งสำรวจไม้หนุ่ม และลูกไม้เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของพรรณไม้ในพื้นที่ศึกษา (สมชญา, 2559) เพื่อสร้างจิตสำนึกและเข้าใจถึงประโยชน์ของพื้นที่ป่าพรุน้ำจืด

สรุป

แปลงศึกษาในบริเวณป่าพรุน้ำจืดในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย มีพืชทั้งหมด 8 ชนิด ได้แก่ ดีหมี ปันแถ ประดู่ส้ม สารภี ตองเต่า ทองหลางน้ำ และ ตองเต๊า โดยดีหมีมีความหนาแน่นมากที่สุด (0.008 ต้นต่อตารางเมตร) และเป็นไม้เด่นในพื้นที่สำรวจ (ความเด่นสัมพัทธ์ 50.55%)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย นายวรพงษ์ กาศลังกา นักวิชาการป่าไม้ปฏิบัติการ อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ที่ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนาม และขอขอบคุณนางสาวจุฬาลักษณ์ ลาเกิด ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับชนิดพืช

เอกสารอ้างอิง

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. ม.ป.ป. ถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน. http://park.dnp.go.th/visitor/nationparkshow.php?PTA_CODE=9153, 1 กรกฎาคม 2563.

กลุ่มงานพฤกษศาสตร์ป่าไม้. 2566. E-flora of Thailand. https://www.dnp.go.th/botany/eflora/search.html, 19 มกราคม 2566.

กฤตวิชญ์ สุขอิ้ง, พรรณิภา วงค์ชัย, จุฬาลักษณ์ ลาเกิด. 2562. การศึกษาแหล่งพืชสมุนไพรในป่าพรุน้ำจืดของอุทยานแห่งชาติภูซาง จังหวัดพะเยา. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ 10(2): 263–271.

การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย. ม.ป.ป. ศูนย์วิจัยและศึกษาธรรมชาติป่าพรุสิรินธร (ป่าพรุโต๊ะแดง). https://thai.tourismthailand.org/Attraction/ศูนย์วิจัยและศึกษาธรรมชาติป่าพรุสิรินธร-ป่าพรุโต๊ะแดง, 14 กรกฎาคม 2563.

ชรินทร์ สมาธิ. 2532. ลักษณะทางนิเวศวิทยาของสังคมพืชป่าพรุ ในจังหวัดนราธิวาส. วารสารวนศาสตร์ 8: 125–143.

เชียงใหม่นิวส์. 2560. สำรวจปูดอกข้อแดง วนอุทยานขุนน้ำ นางนอน สัตว์อนุรักษ์ท้องถิ่น ห้วงฤดู ผสมพันธุ์. https://www.chiangmainews.co.th/page/archives/624657, 19 มกราคม 2566.

ดอกรัก มารอด, อุทิศ กุฏอินทร์. 2552. นิเวศวิทยาป่าไม้. อักษรสยามการพิมพ์. กรุงเทพฯ.

ราชันย์ ภู่มา, สมราน สุดดี. 2557. ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย เต็ม สมิตินันท์ (ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2557). สำนักหอพรรณไม้, สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช, กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

วรดลต์ แจ่มจำรูญ. 2558. คู่มือการจำแนกชนิดพรรณไม้แบบลักษณะเด่นเฉพาะ. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

สมชญา ศรีธรรม. 2559. ความหลากชนิดของไม้ต้นและการใช้ประโยชน์ในท้องถิ่นป่าระหาร อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 34(3): 96–105.

สมหญิง บู่แก้ว, เพ็ญแข ธรรมเสนานุภาพ, ธวัดชัย ธานี. 2552. ความหลากชนิดของพรรณไม้และการใช้ประโยชน์ผลผลิตจากป่าในป่าชุมชนโคกใหญ่ อำเภอวาปีปทุม จังหวัดมหาสารคาม. Environmental and Natural Resources Journal 7(1): 36–50.

สามารถ ใจเตี้ย, พัชรี วงศ์ฝั้น. 2560. ความหลากหลายและการใช้ประโยชน์จากพืชสมุนไพรพื้นบ้านในพื้นที่ลุ่มน้ำลี้ จังหวัดลำพูน. วารสารวิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี อุตรดิตถ์ 9(1): 13–22.

สืบพงศ์ สุขสม. 2560. ระบบเศรษฐกิจชุมชนกับความสมดุลของป่าพรุ. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ 6(2): 110–117.

สุรชาติ สินวรณ์ และณัฐบดี วิริยาวัฒน์. 2557. ความหลากหลายของสมุนไพรและการใช้ประโยชน์ในพื้นที่เขาพระ อำเภอเดิมบางนางบวช จังหวัดสุพรรณบุรี. วารสารวิจัย มสด สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7(1): 1–19.

สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 15. ม.ป.ป. องค์ความรู้ในการกู้ภัย 13 หมูป่า ณ อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง - ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ). http://www.dnp15.com/new/phpmylogin/admin/knowledge/uploads/ F1Lc949uT84914Mon Sep2019.pdf?fbclid=IwAR3H00FQ0Cp5onF6uKfRIVYjCv7B65MO L1bytpwmAfkuqSH_59XUqonY-wc, 8 กรกฎาคม 2563.

สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี. 2563. มติคณะรัฐมนตรี เรื่องการนำเสนออุทยานแห่งชาติเขาสก และพื้นที่อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ให้เป็นพื้นที่อุทยานมรดกแห่งอาเซียน. โรงพิมพ์สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ.

สำนักอุทยานแห่งชาติ. 2558. อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ). http://portal.dnp.go.th/Content/nationalpark?contentId=11653, 19 มกราคม 2566.

องค์การบริหารส่วนตำบลโป่งผา. ม.ป.ป. วนอุทยาน ถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน. http://www.pongpha.go.th/story/detail.php?id=70&fbclid=IwAR2nA4UOpSNEuTfVgI-8UdkPJfYQgBMQqT6f9K99-fza78Q4t_PA0crTm3k, 8 กรกฎาคม 2563.

อานุช คีรีรัฐนิคม, สุภฎา คีรีรัฐนิคม, ทิพย์ทิวา สัมพันธมิตร, กมล อาศิรเมธี. 2556. ศักยภาพในการสะสมคาร์บอน และมูลค่าเศรษฐศาสตร์ของป่าสงวนแห่งชาติป่าบ้านกุมแป ป่าบ้านในลุ่ม และป่าพรุควนเคร็ง จังหวัดนครศรีธรรมราช. มหาวิทยาลัยทักษิณ, สงขลา.

Alder, D., Synnot, T.J. 1992. Permanent sample plot techniques for mixed tropical forest. Oxford Forestry Institute. Oxford, UK.

Chamchumroon, V., Suphuntee, N., Tetsana, N., Poopath, M., Tanikkool, S. 2017. Threatened plants in Thailand. Office of the Forest Herbarium, Department of National Park, Wildlife and Plant Conservation. Bangkok, Thailand.

QGIS Development Team. 2020. QGIS Geographic Information System. http://qgis.osgeo.org, 8 July 2020.

การทดสอบความสามารถในการเป็นราปฏิปักษ์ของเห็ดสกุล *Oudemansiella* ต่อการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรคของยูคาลิปตัส

Evaluation of antagonistic activity of *Oudemansiella* for controlling fungal diseases of Eucalyptus

รัญชิดา ขุนไกร, **ธารรัตน์ แก้วกระจ่าง***

Runchida Khunkrai, Tharnrat Kaewgrajang*

ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ffortrk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคยูคาลิปตัสโดยใช้เชื้อเห็ดสกุล *Oudemansiella* 2 ชนิด จำนวน 3 ไอโซเลต ได้แก่ *O. radicata*-001, *O. canarii*-002 และ *O. canarii*-003 เชื้อสาเหตุโรคยูคาลิปตัส 3 ชนิด ได้แก่ *Curvularia* sp., *Cylindrocladium* sp. และ *Neopestaloitiopsis* sp. ทดสอบด้วยวิธี Dual culture พบว่าเชื้อเห็ดสกุล *Oudemansiella* ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคได้มากที่สุดคือ *O. radicata*-001 รองลงมาคือ *O. canarii*-003 และ *O. canarii*-002 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของ *O. radicata* และ *O. canarii* พบว่า *O. radicata* มีความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคได้มากกว่า ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคของเห็ด *O. canarii* ต่างไอโซเลตกัน พบว่า *O. canarii*-003 มีความสามารถในการเป็นเห็ดราปฏิปักษ์มากกว่า และเชื้อเห็ดทั้ง 3 ชนิดสามารถยับยั้ง *Curvularia* sp. ได้ดีที่สุด จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเชื้อเห็ดสกุลดังกล่าวมีศักยภาพในการยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคในสภาพจานเลี้ยงเชื้อ อย่างไรก็ตามควรมีการคัดเลือกสายพันธุ์ของราสกุลนี้เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ควบคุมเชื้อสาเหตุโรคต่อไป

คำสำคัญ: การควบคุมด้วยชีววิธี, ราปฏิปักษ์, เห็ดแข้งนก

Abstract

In this study, three isolates of two *Oudemansiella* species, including *O. radicata*-001, *O. canarii*-002 and *O. canarii*-003 were assessed their inhibition on eucalyptus fungal diseases, including *Curvularia* sp., *Cylindrocladium* sp. and *Neopestaloitiopsis* sp. using Dual culture technique. The results revealed that *O. radicata*-001 was significant highest effective on growth inhibition of disease, following by *O. canarii*-003 and *O. canarii*-002, respectively. *O. radicata* was higher on growth inhibition than *O. canarii* when comparing between different species. However, *O. canarii*-003 was higher on growth inhibition than *O. canarii-002* when comparing between fungal isolates. According to this results, *Oudemansiella* species has a potential on *in vitro* inhibition of fungal diseases. However, should be selected of this genus to increase the efficiency of use in controlling pathogens in the future.

Keywords: Antagonistic fungi, Biological control, *Oudemansiella* sp.

คำนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่เขตร้อนชื้นจึงพบว่ามีความหลากหลายของจุลินทรีย์มาก นักจุลชีววิทยามีการค้นพบและศึกษาจุลินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 1 ของจำนวนจุลินทรีย์ทุกแห่งในโลก ทั้งนี้นักวิชาการในประเทศไทยคาดว่าจุลินทรีย์ที่พบในประเทศไทยมีจำนวนกว่า 200,000 ชนิด คิดดเป็น 1 ใน 10 ส่วนของจุลินทรีย์ที่มีการศึกษาและรายงานผลการวิจัย มีการค้นพบเห็ดชนิดใหม่ของโลกในทุกปีทั้งในไทยหรือต่างประเทศ ในประเทศไทยสามารถรวบรวมชนิดเห็ดได้ถึง 1,863 ชนิด 76 วงศ์ 338 สกุล โดยพบเห็ดในลำดับ Agaricales มากที่สุด เห็ดและราขนาดใหญ่ถือเป็นกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่สำคัญในระบบนิเวศ เป็นจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ อีกทั้งมีบทบาทในการลดภัยพิบัติจากธรรมชาติ สร้างสมดุลสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงด้านการเกษตร เนื่องจากปัจจุบันผู้คนสนใจและให้ความสำคัญกับการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในประเทศไทยนั้นยังมีการนำเห็ดป่าออกมาใช้ประโยชน์น้อย เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาที่จริงจังเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่พบในระบบนิเวศป่าไม้ (อุทัยวรรณ และคณะ, 2556; หนูเดือน, 2556; สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2563)

เห็ดสกุล *Oudemansiella* เป็นเห็ดในอันดับ Agaricales วงศ์ Physalacriaceae เห็ดในสกุลนี้มีทั้งหมด 11 ชนิดทั่วโลก (สืบค้นจาก https://www.catalogueoflife.org/) และมีการรายงานว่าในประเทศไทยพบเพียง 2 ชนิด ได้แก่ *Oudemansiella radicata* และ *Oudemansiella canarii* ที่ผ่านมาในต่างประเทศมีการนำเห็ดสกุลนี้มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ทั้งในด้านอาหารและสรรพคุณทางยา ด้านสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และด้านการควบคุมโรคพืช และโรคที่เกิดในบุคคล (อัจฉรา และคณะ, 2552) แต่ด้านการควบคุมโรคพืชนั้น พบว่าได้มีการทำการศึกษาเกี่ยวกับเห็ดสมุนไพรที่ต้านเชื้อแบคทีเรีย ผลการทดสอบพบว่าเห็ดสกุล *Oudemansiella* มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อราสาเหตุโรคพืชได้หลายชนิด (Barseghyan et al., 2016) อย่างไรก็ตามในประเทศไทยมีข้อมูลจากการนำเห็ดสกุลนี้มาใช้ประโยชน์ในด้านการควบคุมโรคพืชค่อนข้างน้อย

จึงเป็นที่มาของการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งจะทำการนำเห็ดในสกุล *Oudemansiella* ไปใช้ในการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรคของยูคาลิปตัสจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ *Curvularia* sp., *Cylindrocladium* sp. และ *Neopestaloitiopsis* sp. ซึ่ง *Cylindrocladium* sp. และ *Neopestaloitiopsis* sp. ทำให้เกิดโรคใบไหม้ *Curvularia* sp. ทำให้เกิดโรคใบจุดในยูคาลิปตัส (Sehgal et al., 1969; Barupal, et al., 2019; Wang et al., 2022) โดยผลที่คาดว่าจะได้รับนั้นสามารถนำไปใช้ต่อยอดในการผลิตสารชีวภาพในการยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคพืช ซึ่งเป็นชีววิธีที่ช่วยลดผลกระทบได้มากกว่าการใช้สารเคมีหรือสารสังเคราะห์ต่าง ๆ ในการใช้ควบคุมโรคพืช

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเชื้อเห็ดสกุล Oudemansiella และเชื้อสาเหตุโรคยูคาลิปตัส

นำเชื้อเห็ดสกุล *Oudemansiella* ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์รวบรวมเชื้อพันธุ์เห็ดแห่งประเทศไทย จำนวน 2 ชนิด 3 ไอโซเลต ได้แก่ *O. radicata*-001, *O. canarii*-002 และ *O. canarii*-003 เชื้อสาเหตุโรคของยูคาลิปตัสได้รับความอนุเคราะห์จาก Phoenix Pulp & Paper Public Company Limited จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ *Curvularia* sp., *Cylindrocladium* sp. และ *Neopestaloitiopsis* sp. นำเชื้อเห็ดและเชื้อราสาเหตุโรคมาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 วัน และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนี

การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อเห็ดราปฏิปักษ์สกุล Oudemansiella กับการยับยั้งเชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรค

ทดสอบใช้วิธี Dual culture เมื่อเชื้อเห็ดเจริญโตเต็มจานอาหารเลี้ยงเชื้อ ใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เจาะบริเวณขอบโคโลนีของเชื้อเห็ดทั้ง 3 ไอโซเลต และเชื้อราสาเหตุโรคทั้ง 3 ชนิด (โดยเชื้อเห็ดแต่ละสายพันธุ์

ให้ทดสอบกับเชื้อสาเหตุทั้ง 3 ชนิด) นำเข็มเขี่ยย้ายเชื้อวางห่างจากขอบจานเลี้ยงเชื้อ PDA 2 เซนติเมตร ในแนวตรงกันข้าม สำหรับชุดทดลองควบคุม (Control) ทำโดยนำเชื้อราสาเหตุโรคแต่ละชนิดวางบริเวณกลางอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA บ่มเชื้อที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 วัน โดยมีจำนวนซ้ำแต่ละชุดการทดลอง 5 ซ้ำ

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของราสาเหตุโรคพืชของเชื้อเห็ดสกุล *Oudemansiella* (Boukaew and Prasertsan, 2013) ตาม Equation 1:

$$\% \text{ inhibition} = \frac{A\text{-}B}{B} \times 100 \qquad (1)$$

A = Diameter of the fungal pathogen colony in the control

B = Diameter of fungal pathogen colony in co-culture with *Oudemansiella* mushroom

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเติบโตของเชื้อเห็ดสกุล Oudemansiella และเชื้อสาเหตุโรคยูคาลิปตัส

จากการเลี้ยงเชื้อเห็ดสกุล *Oudemansiella* จำนวน 2 ชนิด 3 ไอโซเลต และเชื้อสาเหตุโรคยูคาลิปตัสจำนวน 3 ชนิด บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA เป็นเวลา 6 วัน พร้อมทั้งวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี เมื่อนำข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี ของเห็ดราปฏิปักษ์สกุล *Oudemansiella* และเชื้อราสาเหตุโรคของยูคาลิปตัส มาเปรียบเทียบความแตกต่างกันด้วย One Way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) และเมื่อนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีไปเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Turkey’s Rang Test (Fig. 1) พบว่าในวันที่ 3 และ 6 เชื้อ *Curvularia* sp. มีเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่เชื้อ *Neopestaloitiopsis* sp. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาเฉพาะเชื้อสาเหตุโรคพบว่าเชื้อสาเหตุโรคแต่ละชนิดมีการเติบโตที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเรียงตามลำดับ ดังนี้ *Curvularia* sp. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีมากที่สุด และทำให้เนื้อของอาหารเลี้ยงเชื้อแห้งและแข็ง จนแตกตามแนวรัศมี (Fig. 2) รองลงมาคือ *Cylindrocladium* sp. ลักษณะของโคโลนีมีสีเข้มบริเวณจุดศูนย์กลางออกเป็นชั้นคล้ายวงปี (Fig. 2) *Neopestaloitiopsis* sp. โคโลนีมีการเติบโตช้าที่สุด และทำให้เนื้อของอาหารเกิดการเหี่ยวย่นตามแนวรัศมี (Fig. 2)

เมื่อพิจารณาเฉพาะเชื้อเห็ดราปฏิปักษ์พบว่าเชื้อเห็ดราปฏิปักษ์แต่ละชนิดมีการเติบโตที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเรียงตามลำดับ ได้แก่ *O. canarii*–003 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีมากที่สุด บริเวณที่ย้ายเชื้อมาวางหรือตรงกลางของจานเลี้ยงเชื้อ เมื่อเส้นใยมีการเจริญเติบโตขึ้นบริเวณดังกล่าวเกิดสีน้ำตาล คล้ายรอยไหม้ (Fig. 2) รองลงมาคือ *O. canarii*–002 เมื่อพลิกจานเลี้ยงเชื้อขึ้นมาสังเกตตรงก้านจานเลี้ยงเชื้อพบว่าโคโลนีเส้นใยจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน (Fig. 2) *O. canarii*–003 มีการเติบโตช้าที่สุด บริเวณตรงกลางโคโลนีมีความหนาแน่นของเส้นใยมากกว่าบริเวณรัศมี (Fig. 2) ซึ่งการเติบโตของโคโลนีสอดคล้องจากการศึกษา ได้พิสูจน์ว่าเส้นใย *O. radicata* เติบโตเร็วขยายตัวได้ดี ลักษณะของเส้นใยเป็นสีขาวขึ้นหนาแน่น โดยเติบโตอย่างรวดเร็ว 6–8 มม./วัน ลักษณะโคโลนีสีขาวเหมือนหิมะหนา (พจนา, 2553; Gou et al. ,2021)

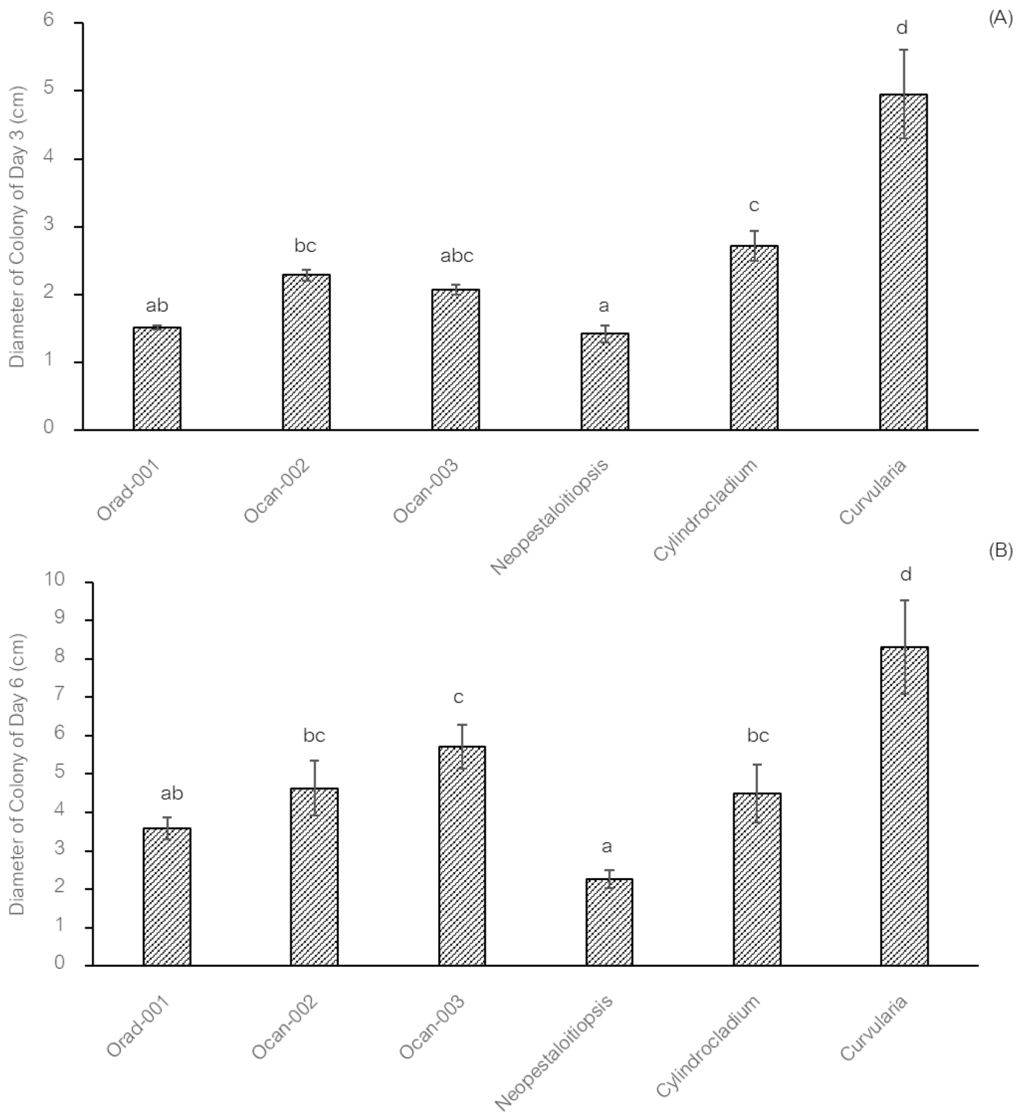


Fig. 1 Diameter of Colony (A) Day 3, and (B) Day 6 (different letters on bar graphs showed that were statistically significant.)

การทดสอบความสามารถเป็นราปฏิปักษ์ของเห็ดสกุล Oudemansiella

จากการทดสอบประสิทธิภาพการเป็นราปฏิปักษ์ของเห็ดสกุล *Oudemansiella* จำนวน 3 ไอโซเลต ด้วยวิธี Dual culture technique ในการยับยั้งการเติบโตราสาเหตุโรคของยูคลาลิปตัส 3 ชนิด พบว่าการเจริญเติบโตของเส้นใยของเชื้อเห็ด *O. radicata*-001, *O. canarii*-002 และ *O. canarii*-003 มีผลต่อการเติบโตของเส้นใยของราสาเหตุโรคแตกต่างกัน และสามารถยับยั้งการเติบโตของ *Curvularia* sp. *Cylindrocladium* sp. และ *Neopestaloitiopsis* sp. ได้แม้ว่าเส้นใยของเชื้อสาเหตุโรคยังสามารถเจริญได้ดี และเติบโตได้เร็วกว่าแต่เส้นใยไม่สามารถเจริญปกคลุมเชื้อเห็ดราปฏิปักษ์ได้ (Fig. 2) โดย *O. radicata*-001 มีความสามารถในการยับยั้ง *Curvularia* sp. มากที่สุดถึง 61.80 เปอร์เซ็นต์ เชื้อรา *Cylindrocladium* sp. เท่ากับ 48.31 เปอร์เซ็นต์ และเชื้อรา *Neopestaloitiopsis* sp. เท่ากับ 33.71 เปอร์เซ็นต์ *O. canarii*-002 มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อรา *Curvularia* sp. เท่ากับ 39.01 เปอร์เซ็นต์ เชื้อรา *Cylindrocladium* sp. เท่ากับ 4.93 เปอร์เซ็นต์ และเชื้อรา *Neopestaloitiopsis* sp. เท่ากับ 4.04 เปอร์เซ็นต์ O. canarii-003 มีความสามารถในการยับยั้ง

เชื้อรา *Curvularia* sp. เท่ากับ 61.67 เปอร์เซ็นต์ เชื้อรา *Cylindrocladium* sp. เท่ากับ 28.92 เปอร์เซ็นต์ และเชื้อรา *Neopestaloitiopsis* sp. เท่ากับ 12.20 เปอร์เซ็นต์ Barseghyan et al. (2016) รายงานว่าเชื้อเห็ด *O. radicata* สามารถสร้างสาร Oudemansin X ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ที่สามารถฆ่าแมลง และแบคทีเรียที่ก่อโรคต่อพืชหลายชนิดได้ อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมานั้น ยังไม่ครอบคลุมชนิดของเชื้อสาเหตุโรคที่ศึกษา จากผลการศึกษาทำให้ทราบว่า นอกจากเชื้อก่อโรคดังกล่าวแล้ว เชื้อเห็ดสกุล *Oudemasiella* ยังสามารถยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคของยูคาลิปตัสได้ทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำเปอร์เซ็นต์การยับยั้งราสาเหตุโรคมาเปรียบเทียบกันพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) โดยพบว่า *O. radicata*-001 มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคได้มากที่สุด รองลงมาคือ *O. canarii*-003 และ *O. canarii*-002 ตามลำดับ (Fig. 3)

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถของเห็ดสกุล *Oudemansiella* ต่อการยับยั้งราสาเหตุโรคทั้ง 3 ชนิด โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเป็นราปฏิปักษ์ของเชื้อเห็ด 2 ชนิด ได้แก่ *O. radicata* และ *O. canarii* พบว่ามีความสามารถในการเป็นราปฏิปักษ์แตกต่างกัน โดย *O. radicata* มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งราสาเหตุโรคพืชมากกว่า *O. canarii* และเมื่อเปรียบเทียบเชื้อเห็ดชนิดเดียวกัน ได้แก่ *O. canarii*-002 และ *O. canarii*-003 พบว่า *O. canarii*-003 มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งราสาเหตุโรคพืชมากกว่า *O. canarii*-002

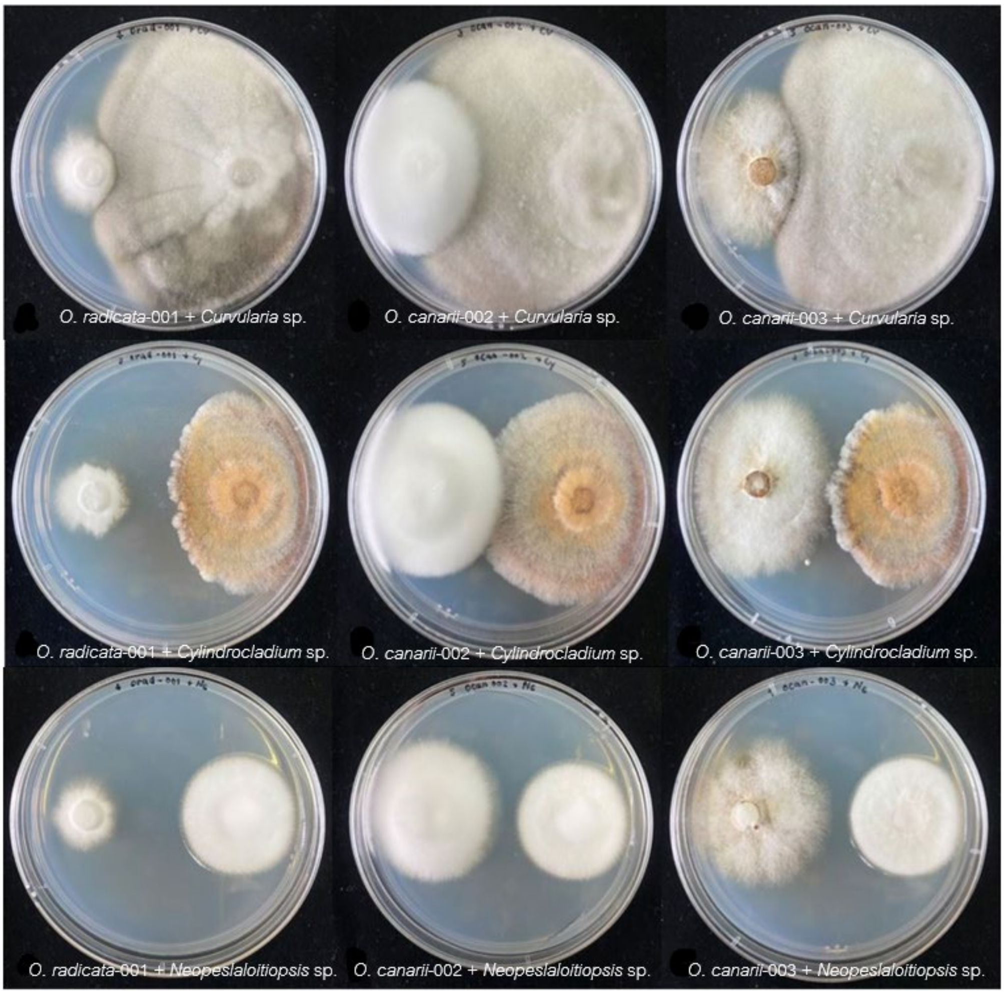


Fig. 2 *In vitro* antifungal activity of *Oudemansiella* mushroom against *Curvularia* sp., *Cylindrocladium* sp., and *Neopestaloitiopsis* sp.

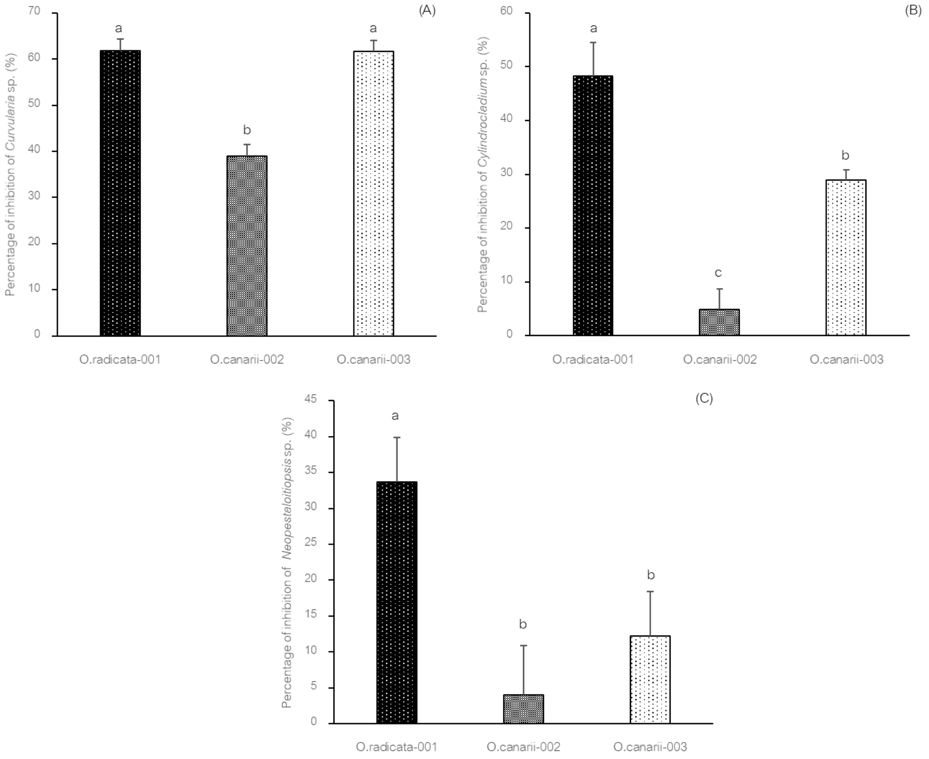


Fig. 3 Percentage of inhibition of Eucalyptus pathogen: (A) Percentage of inhibition of *Curvularia* sp.; (B) Percentage of inhibition of *Cylindrocladium* sp.; (C) Percentage of inhibition of *Neopestaloitiopsis* sp.

สรุป

จากการทดสอบความสามารถในการเป็นราปฏิปักษ์ของเห็ดสกุล *Oudemansiella* ในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคยูคาลิปตัสด้วยวิธี Dual culture technique พบว่าเชื้อเห็ดสกุล *Oudemansiella* ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคมากที่สุดคือ *O. radicata*-001 รองลงมาคือ *O. canarii*-003 และ *O. canarii*-002 ตามลำดับ ซึ่งสามารถยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค *Curvularia* sp. มากที่สุด รองลงมาคือ *Cylindrocladium* sp. และ *Neopestaloitiopsis* sp. ตามลำดับ โดยเชื้อเห็ดราปฏิปักษ์ *Oudemansiella* ทั้ง 2 ชนิด จำนวน 3 ไอโซเลต ไม่สามารถเจริญคลุมทับเส้นใยของเชื้อราสาเหตุโรคยูคาลิปตัสทั้ง 3 ชนิดได้ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของเห็ดสกุล *Oudemansiella* ที่ต่างชนิดกัน คือ *O. radicata* และ *O. canarii* พบว่า *O. radicata* มีความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคของเห็ด *O.canarii* แต่ต่างไอโซเลตกัน คือ *O. canarii*-002 และ *O. canarii*-003 พบว่า *O. canarii*-003 มีความสามารถในการเป็นราปฏิปักษ์ดีกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์รวบรวมเชื้อพันธุ์เห็ดแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์เชื้อเห็ดสกุล *Oudemansiella* สำหรับทำการทดลอง ขอขอบพระคุณ Phoenix Pulp & Paper Public Company Limited ที่ให้ความอนุเคราะห์เชื้อสาเหตุโรคของยูคาลิปตัสในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

พจนา ตระกูลสุขรัตน์, ปิยรัตน์ ธรรมกิจวัฒน์, อัจฉรา พยัพพานนท์. 2553. ทดสอบสายพันธุ์เห็ด *Oudemansiella* spp. ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตสารยับยั้งจุลินทรีย์เชื้อสาเหตุโรคพืช. (รายงานการวิจัย). กลุ่มวิจัยโรคพืช สำนักวิจัยพัฒนาอารักขาพืช, สำนักวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ, กรุงเทพฯ.

สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2563. สถานภาพความหลากหลายทางชีวภาพของประเทศไทย, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์กองจัดการความหลากหลายทางชีวภาพ, กรุงเทพฯ.

หนูเดือน เมืองแสน. 2556. ความหลากหลายของไลเคน เห็ด และราขนาดใหญ่ในพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืช อพ.สธ. เขื่อนน้ำพุงการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (รายงานวิจัย). สาขาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

อัจฉรา พยัพพานนท์, พจนา ตระกูลสุขรัตน์, อุทัยวรรณ แสงวณิช. 2552. รวบรวม และคัดเลือกพันธุ์เห็ด *Oudemansiella* spp. จากแหล่งต่าง ๆ เพื่อเป็นพันธุ์ทางการค้า. (รายงานการวิจัย). กลุ่มวิจัยโรคพืช สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขา, ภาควิชาจุลชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อุทัยวรรณ แสงวณิช, พูนพิไล สุวรรณฤทธิ์, อัจฉรา พยัพพานนท์, เจนนิเฟอร์ เหลืองสอาด, อนงค์ จันทร์ศรีกุล, บารมี สกลรักษ์. 2556. บัญชีรายการทรัพย์สินชีวภาพ เห็ด. สำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน), กรุงเทพฯ. 374 หน้า.

Barseghyan, G.S., Barazani, A., Wasser, S.P. 2016. Medicinal mushrooms with anti-phytopathogenic and insecticidal properties. In: Petre, M. (Eds.), Mushroom Biotechnology Developments and Applications. n.p. pp. 137–153.

Boukaew, S., Prasertsan, P. 2013. Factors affecting antifungal activity of *Streptomyces philanthi* RM-1-138 against *Rhizoctonia solani.* World J Microbiol Biotechnol. 30: 323–329. doi.org/10.1007/s11274-013-1424-z

Gou, L., Li, S., Yin, J., Li, T., Liu, X. 2021. Morphological and physico-mechanical properties of mycelium biocomposites with natural reinforcement particles. Construction and Building Materials 304: 124656.

Sehgal, H.S., Nair, J.M., Jagdees, S.S. 1969. Occurrence of *Cylindrocladium quinqueseptatum* Boed. and Reitsma as a parasite of *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden and *E. tereticornis* Sm. in India. The Southern Forest Rangers College Magazine 1: 62–65.

Wang, Q.T., Cheng, Y.H., Zhuo, L. 2022. *Neopestalotiopsis longiappendiculata* as the agent of grey blight disease of *Camellia* spp. Journal of Phytopathology 170: 11–12. doi.org/10.1111/jph.13139

ความหลากชนิดและการปรากฏของหิ่งห้อยบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์

Species diversity and appearance of fireflies at Sirikit Dam, Uttaradit province

ณัฐชภัทร โอทอง[a], **วัฒนชัย ตาเสน**[a,*], **กิติพงศ์ ตั้งกิจ**[a], **สุภาพร ศรีเสมอ**[a], **ภาสิณี วรชนะนันท์**[b], **รัฐชา ชัยชนะ**[b]

Nutchapat O-Thong[a], Wattanachai Tasen[a,*], Kitipong Tankkit[a], Supaporn Srisamer[a], Pasinee Worachananan[b], Ratcha Chaichana[b]

[a]คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fforwct@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความหลากชนิดและการปรากฏของประชากรหิ่งห้อยบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งดำเนินการสำรวจในพื้นที่ 3 ประเภท ได้แก่ พื้นที่ป่า พื้นที่ชุมชน และพื้นที่สาธารณะ โดยการนับจำนวนหิ่งห้อยจากแสงกระพริบตั้งแต่เวลา 18.30–21.00 น. ระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2564 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ.2565 จากการศึกษาพบหิ่งห้อยทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ *Sclerotia aquatilis*, *Asymmetricata circumdata*, *Pyrocoelia praetexta*, *Curtos* sp. และ*Inflata indica* โดยพื้นที่ป่าพบการปรากฏของประชากรหิ่งห้อยมากที่สุด พฤติกรรมการปรากฏของหิ่งห้อยในช่วงเวลา 19.30–20.00 น. มีความมากมายของประชากรหิ่งห้อยมากที่สุด และในเดือนสิงหาคมพบจำนวนหิ่งห้อยมากที่สุด การกระจายของประชากรหิ่งห้อยเป็นแบบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณน้ำฝน

คำสำคัญ: เขื่อนสิริกิติ์, ความหลากชนิด, หิ่งห้อย

Abstract

This study aimed to survey the species diversity and appearance of fireflies at Sirikit Dam, Uttaradit Province. Firefly survey from 3 habitat including forest area, community area and public area were carried out by counting the light of the fireflies during 18.30–21.00 h. between November 2021 to August 2022. The results found 5 firefly species, including *Sclerotia aquatilis*, *Asymmetricata circumdata*, *Pyrocoelia praetexta*, *Curtos* sp. and *Inflata indica*, with the highest number of firefly population present in forest areas. The behavior of fireflies appearing during 19.30–20.00 h. is the most abundant of the firefly population. In August, the highest number of fireflies was found. The distribution of the firefly population is uniform. Rainfall was statistic significant with the firefly population.

Keywords: Diversity, Firefly, Sirikit dam

คำนำ

หิ่งห้อย (Firefly หรือ Lightning bug) เป็นแมลงในอันดับ Coleoptera วงศ์ Lampyridae มีการค้นพบและจำแนกชนิดแล้วมากกว่า 2,000 ชนิด (Stanek, 1969) และมีมากกว่า 80 สกุล กระจายทั่วโลก (Watthanachaiyingcharoen et al., 2016) การกระจายตัวของหิ่งห้อยพบทั้งในทวีปอเมริกา ยุโรป ออสเตรเลีย และเอเชีย ในเขตอบอุ่นและเขตร้อนของโลก ยกเว้นบริเวณทะเลทรายและภูเขาสูง เนื่องจากหิ่งห้อยมีความจำเพาะต่อพื้นที่อาศัยมาก ทำให้มีความความหลากหลายทางชีวภาพมากตามไปด้วย (สุทิศา, 2551) หิ่งห้อยมีวงจรชีวิต 4 ระยะ โดยระยะที่มีประโยชน์ต่อระบบนิเวศคือระยะตัวหนอน ซึ่งเป็นศัตรูตามธรรมชาติของหอยน้ำจืดที่เป็นพาหะนำโรคและเป็นศัตรูทางการเกษตร (สมหมาย และองุ่น, 2539) อีกทั้งยังเป็นตัวชี้วัดความอุดมสมบูรณ์ของระบบนิเวศ เช่น ความสะอาดของแหล่งน้ำ และความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาศัย เป็นต้น (ปัทมา, 2557) นอกจากนี้ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากแมลงในทางเศรษฐกิจนั้นพบมากขึ้น หิ่งห้อยถือเป็นหนึ่งในแมลงเศรษฐกิจที่มีความโดดเด่นในด้านเชิงการท่องเที่ยวเชิงนิเวศที่สร้างรายได้ให้กับหลายชุมชน แต่ปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น การสูญเสียพื้นที่ป่าและแหล่งน้ำตามธรรมชาติ รวมทั้งผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ส่งผลทำให้จำนวนประชากรของหิ่งห้อยในปัจจุบันลดลงอย่างรวดเร็ว (อัญชนา, 2552)

การมีอวัยวะเรืองแสง (Light organ) เป็นลักษณะเด่นของหิ่งห้อย อวัยวะเรืองแสงของหิ่งห้อยแต่ละชนิดจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน นอกจากนี้สี ความสว่าง จังหวะการกระพริบ และอิริยาบถในการบินของหิ่งห้อยแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันด้วยเช่นกัน อวัยวะเรืองแสงยังสามารถใช้ระบุเพศของหิ่งห้อยได้อีกด้วยโดยหิ่งห้อยเพศผู้จะมีอวัยวะเรืองแสงขนาดใหญ่และมีจำนวนปล้องมากกว่าเพศเมีย (อัญชนา, 2552)

เขื่อนสิริกิติ์เป็นเขื่อนดินที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย สร้างกั้นลำน้ำน่านบริเวณเขาผาซ่อม ตำบลผาเลือด อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ นอกจากจะเป็นแหล่งกักเก็บน้ำเพื่อการชลประทานและบรรเทาอุทกภัย นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำที่สำคัญอีกด้วย บริเวณรอบเขื่อนสิริกิติ์เป็นแหล่งทรัพยากรป่าไม้ที่อุดมสมบูรณ์ มีการพบเห็นหิ่งห้อยออกบินกระพริบแสงยามค่ำคืนหลายพื้นที่ภายในบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ แต่ข้อมูลด้านความหลากหลาย ความมากมาย และพฤติกรรมของหิ่งห้อยในพื้นที่ดังกล่าวยังไม่เคยมีการสำรวจมาก่อน แม้จะมีการศึกษาด้านความหลากชนิดของหิ่งห้อยกันอย่างกว้างขวางแล้วก็ตาม ซึ่งองค์ความรู้เหล่านี้ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการอนุรักษ์หิ่งห้อยอย่างยั่งยืน

ดังนั้นการศึกษาความหลากชนิดและการปรากฏของประชากรหิ่งห้อยในพื้นที่บริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการวางแผนจัดการพื้นที่และอนุรักษ์หิ่งห้อย อีกทั้งสามารถทำนายแนวโน้มที่จะพบเจอหิ่งห้อยในแต่ละช่วงเวลาเพื่อประโยชน์ในการกำหนดช่วงเวลาการเที่ยวชมหิ่งห้อย รวมถึงจัดเป็นแหล่งเรียนรู้ให้กับเยาวชนและประชาชนทั่วไปที่มีความสนใจเกี่ยวกับหิ่งห้อยในอนาคตต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาความหลากชนิดของหิ่งห้อย

ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาที่มีการรายงานว่าพบเห็นหิ่งห้อยบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยพื้นที่ศึกษาประกอบด้วยบริเวณพื้นที่ป่า พื้นที่ชุมชน และพื้นที่สาธารณะซึ่งเป็นพื้นที่ใช้ประโยชน์ภายในโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริฯ พื้นที่ทั้ง 3 อยู่ติดกับแหล่งน้ำแสดงดัง Fig. 1 ทำการสำรวจชนิดและนับจำนวนประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏโดยดำเนินการตามวิธีของปัทมา (2557) ด้วยวิธีวางแนวสำรวจ (Transect) ขนาด 300×20 เมตร ในบริเวณพื้นที่ศึกษา จากนั้นนับจำนวนประชากรหิ่งห้อยที่มองเห็นจากแสงกระพริบใน 5 ช่วงเวลา ช่วงละ 30 นาที ตั้งแต่เวลา 18.30–21.00 น. ทำการนับช่วงเวลาละ 1 ครั้ง เก็บตัวอย่างหิ่งห้อยโดยใช้สวิงจับแมลงโฉบจับหิ่งห้อยในพื้นที่ศึกษา

ซึ่งตัวอย่างหิ่งห้อยจะถูกเก็บรักษาไว้ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ เพื่อจำแนกชนิดภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo microscope) โดยลักษณะรูปร่างทางสัณฐานวิทยาภายนอก ซึ่งดำเนินการในห้องปฏิบัติการกีฏวิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ โดยใช้คู่มือและเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ (Fu et al., 2012; Ballantyne et al., 2015; เกียรติศักดิ์ และคณะ, 2561) ทำการสำรวจ 2 เดือนต่อ 1 ครั้ง โดยเริ่มทำการสำรวจตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565

(A) (B) (C)

Fig. 1 Study area: (A) Forest area; (B) Community area; (C) Public area

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลจำนวนประชากรหิ่งห้อยมาคำนวณความมากมาย (Abundance) ตาม Equation 1 (Wiwatwitaya and Takeda, 2005) วิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายตามวิธี Morisita's index (I_d) ตาม Equation 2 (Morishita, 1962) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏกับปัจจัยแวดล้อมซึ่งประกอบด้วยปริมาณน้ำฝนรายเดือนและอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาซึ่งเป็นข้อมูลจากการรายงานของกรมอุตุนิยมวิทยาโดยใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation) ในโปรแกรม R เวอร์ชั่น x64 4.1.2 (R Core Team, 2021)

$$\text{Abundance}=\frac{\text{Total of inviduals in each time}}{\text{Number of surveys}} \quad (1)$$

$$\text{Morisita index } (I_d)=\frac{\sum_{i=1}^{q} n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \quad (2)$$

when q = sum of plot

n_i = number of fireflies in each plot (i= 1, 2, 3)

N = sum of fireflies

เมื่อ I_d = 1 หมายถึง การกระจายตัวของประชากรเป็นแบบสุ่ม

I_d < 1 หมายถึง การกระจายตัวของประชากรเป็นแบบสม่ำเสมอ

I_d > 1 หมายถึง การกระจายตัวของประชากรเป็นแบบกลุ่ม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความหลากชนิด

จากการสำรวจหิ่งห้อยในบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยสำรวจจากพื้นที่ป่า พื้นที่ชุมชน และพื้นที่สาธารณะ พบหิ่งห้อยทั้งสิ้น 5 ชนิด สามารถจำแนกได้เป็น 2 วงศ์ย่อย คือ วงศ์ย่อย Lampyrinae ประกอบด้วย 1 ชนิด 1 สกุล ได้แก่ *Pyrocoelia praetexta* Olivier และวงศ์ย่อย Luciolinae ประกอบด้วย 4 ชนิด 4 สกุล ได้แก่ *Sclerotia aquatilis* Thancharoen, *Asymmetricata circumdata* (Motsch.), *Curtos* sp. และ *Inflata indica* (Motschulsky, 1854) ดังแสดงใน Fig. 2 ตามลำดับ ซึ่งในพื้นที่ป่าพบหิ่งห้อยทั้ง 5 ชนิด ส่วนพื้นที่สาธารณะและพื้นที่ชุมชนพบหิ่งห้อย 3 ชนิด และ 2 ชนิด ตามลำดับ แสดงดัง Table 1 โดยการศึกษาครั้งนี้พบจำนวนชนิดเท่ากับเกียรติศักดิ์ และคณะ (2561) ซึ่งทำการศึกษา

ความหลากหลายของหิ่งห้อยในเขตพื้นที่จังหวัดพิษณุโลกใน 5 พื้นที่การใช้ประโยชน์ นอกจากนี้พบหิ่งห้อย 2 ชนิด ที่ปรากฏในสองพื้นที่ ได้แก่ *S. aquatilis* และ *A. circumdata* เช่นเดียวกับดวงแข และคณะ (2558) ที่ได้ทำการสำรวจหิ่งห้อยในบริเวณสถานีวิจัย Chulalongkorn University Forest and Research Station จังหวัดน่าน ซึ่งโดยรอบเป็นพื้นที่ป่าเต็งรังและป่าเบญจพรรณ พบหิ่งห้อยทั้งหมด 5 ชนิด แต่มีเพียงชนิดเดียวที่พบในพื้นที่เหมือนกันคือ *A. circumdata* นอกจากนี้ Wattanachaiyingcharoen et al. (2016) สำรวจหิ่งห้อยบริเวณพื้นที่สูงในภาคเหนือของประเทศไทย ในพื้นที่ 7 ประเภท ซึ่งได้รายงานการพบหิ่งห้อยทั้งหมด 19 ชนิด พบว่าเจอหิ่งห้อยชนิดเดียวกัน 2 ชนิดในพื้นที่ คือ *A. circumdata* และ *I. indica* และวิรัตน์ (2547) ศึกษานิเวศประชากรของหิ่งห้อยในสวนพฤกษศาสตร์ดอกท้อ จังหวัดเชียงใหม่ พบหิ่งห้อย 7 ชนิด โดยพบหิ่งห้อย 2 ชนิดที่พบเหมือนกันในพื้นที่ คือ *P. praetexta* และ *I. indica* จากผลการศึกษาและงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในพื้นที่ภาคเหนือมีความหลากหลายของชนิดพันธุ์หิ่งห้อยสูง โดยเฉพาะหิ่งห้อย *A. circumdata* เป็นชนิดที่สามารถพบทั่วไปและมีการกระจายทั่วพื้นที่ภาคเหนือเนื่องจากมีขอบเขตการกระจายที่กว้าง สามารถพบได้ในพื้นที่หลายประเภท (Wattanachaiyingcharoen et al., 2016)

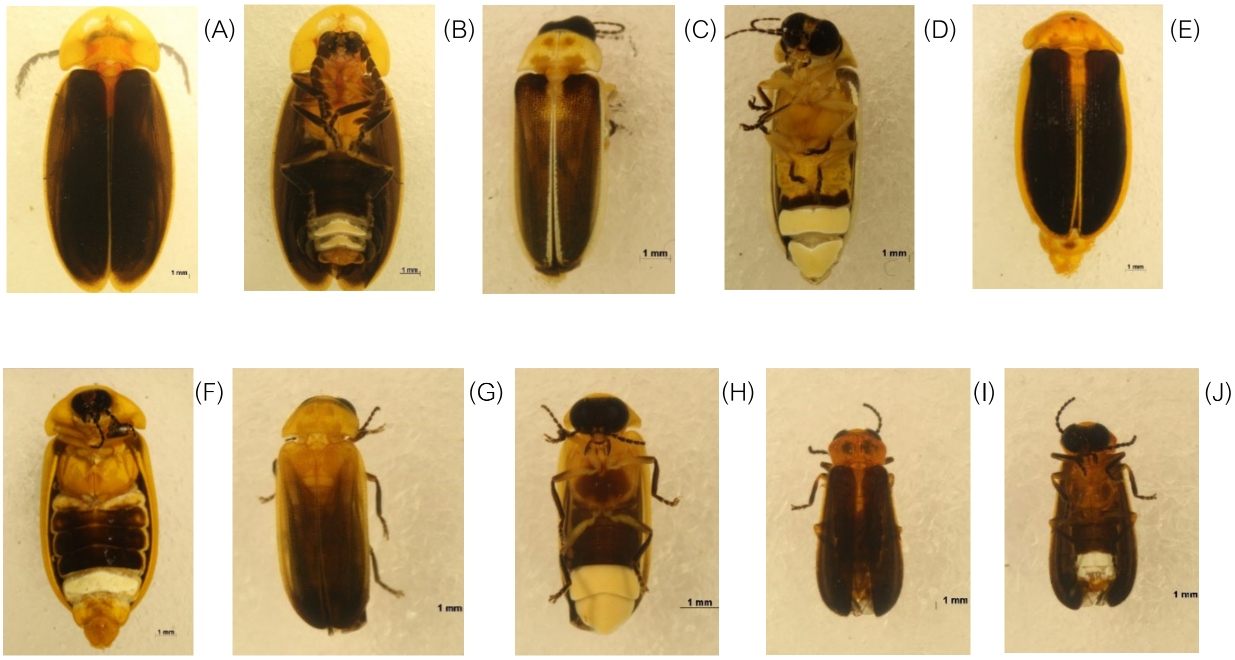


Fig. 2 Species of fireflies: (A) *Pyrocoelia praetexta* (male, dorsal); (B) *P. praetexta* (male, ventral); (C) *Sclerotia aquatilis* (male, dorsal); (D) *S. aquatilis* (male, ventral); (E) *Asymmetricata circumdata* (female, dorsal); (F) *A. circumdata* (male, ventral); (G) *Curtos* sp. (male, dorsal); (H) *Curtos* sp. (male, ventral); (I) *Inflata indica* (male, dorsal); (J) *I. indica* (male, ventral)

Table 1 Species of fireflies in each study area

Species	Study area		
	Forest area	Community area	Public area
Pyrocoelia praetexta	/	/	/
Sclerotia aquatilis	/	/	/
Asymmetricata circumdata	/		/
Curtos sp.	/		
Inflata indica	/		

การปรากฏของหิ่งห้อย

จากการสำรวจพบการปรากฏของหิ่งห้อยทั้งสิ้น 950 ตัว โดยพบบริเวณพื้นที่ป่า พื้นที่ชุมชน และพื้นที่สารธารณะ คิดเป็นร้อยละ 69.68, 16.11 และ14.21 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมด ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการปรากฏของประชากรหิ่งห้อยในแต่ละช่วงเวลา พบว่าช่วงเวลา 19.30–20.00 น. มีการปรากฏของประชากรหิ่งห้อยสูงสุดเท่ากับ 257 ตัว คิดเป็นร้อยละ 27.05 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมดและมีความมากมายสูงสุดเท่ากับ 51.4±5.4 ตัว แนวโน้มการปรากฏนั้นเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลา 18.30–20.00 น. หลังจากนั้นการปรากฏมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาเป็นรายเดือน พบว่าเดือนสิงหาคมมีการปรากฏของประชากรหิ่งห้อยมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 23.37 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมด แต่ในเดือนอื่น ๆ การปรากฏของหิ่งห้อยในภาพรวมค่อนข้างคงที่โดยในทุกช่วงเวลาของทุกเดือนที่ทำการศึกษาจะพบหิ่งห้อยในบริเวณพื้นที่ป่ามากกว่าพื้นที่อื่น ๆ ดังแสดงใน Fig. 3 และ Fig. 4 ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ป่ามีศักยภาพที่สามารถพัฒนาเป็นแหล่งเที่ยวชมหิ่งห้อย เนื่องจากสภาพทางนิเวศวิทยารวมถึงองค์ประกอบของพันธุ์พืชมีผลทางอ้อมต่อจำนวนประชากรหิ่งห้อย ป่าไม้ไม่เพียงแต่เป็นแหล่งอาหารของหิ่งห้อย ความอุดมสมบูรณ์และลักษณะทางสรีระของพืชพรรณบางประการยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเป็นแหล่งหลบซ่อนและแหล่งผสมพันธุ์ของหิ่งห้อยอีกด้วย (Wattanachaiyingcharoen et al., 2016) โดยเฉพาะช่วงเวลา 19.00–20.00 น. เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการชมหิ่งห้อยเนื่องจากมีความมากมายสูงสุด นอกจากนี้การศึกษารูปแบบการกระจายของประชากรหิ่งห้อยโดยใช้วิธี Morisita’s index พบว่ามีค่าดัชนีเท่ากับ 0.53 คือมีการกระจายแบบสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าประชากรหิ่งห้อยมีการกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่สำรวจ

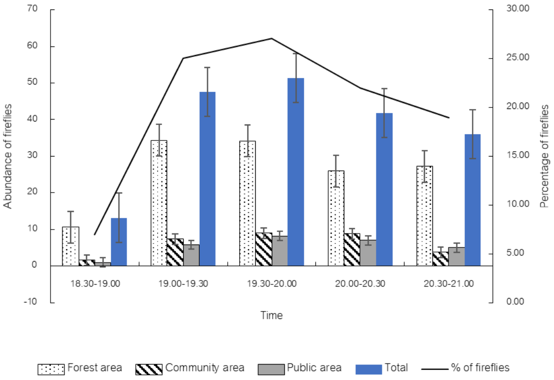


Fig. 3 Abundance and percentage of fireflies in each time

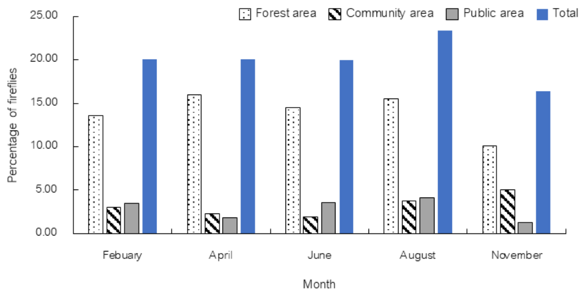


Fig. 4 Percentage of fireflies in each month

ความสัมพันธ์ของหิ่งห้อยกับปัจจัยแวดล้อม

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏในแต่ละเดือนกับปริมาณน้ำฝนรายเดือน พบว่าเดือนสิงหาคมมีปริมาณน้ำฝนรายเดือนมากที่สุดเท่ากับ 254.8 มิลลิเมตร และพบการปรากฏของหิ่งห้อยมากที่สุดในเดือนดังกล่าว คือพบการปรากฏของหิ่งห้อย 222 ตัว คิดเป็นร้อยละ 23.37 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมด ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏในแต่ละเดือนกับอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละเดือนพบว่า เดือนเมษายนซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อนเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 31.3 องศาเซลเซียส (˚C) ซึ่งสำรวจพบการปรากฏของหิ่งห้อย 190 ตัว คิดเป็นร้อยละ 20.11 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมด ซึ่งมีการปรากฏของหิ่งห้อยเท่ากับเดือนกุมภาพันธ์ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 26.9 องศาเซลเซียส (˚C) ดังแสดงใน Fig. 5 ส่วนในเดือนสิงหาคมที่พบจำนวนหิ่งห้อยมากที่สุดมีอุณหภูมิเฉลี่ย 29.5 องศาเซลเซียส (˚C) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์โดยใช้สถิติ Pearson's Correlation ระหว่างประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏในแต่ละเดือนกับปริมาณน้ำฝนรายเดือนและอุณหภูมิเฉลี่ย พบว่าประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับปริมาณน้ำฝนรายเดือน สอดคล้องกับการศึกษาของ สมหมาย และองุ่น (2539) ที่รายงานว่าตามธรรมชาติในช่วงฤดูฝนจะพบหิ่งห้อยจำนวนมาก และสอดคล้องกับการศึกษาของ ปัทมา (2557) ที่พบว่าประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏกับอุณหภูมิเฉลี่ยไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

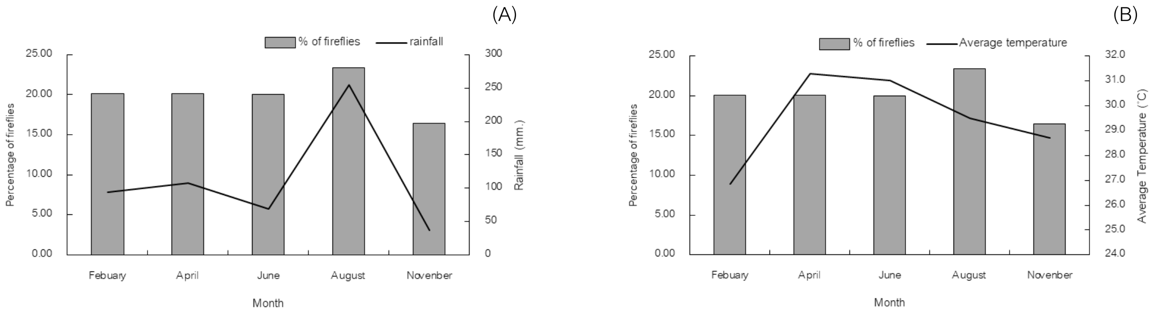


Fig. 5 Relationship between percentage of fireflies and environmental factors: (A) rainfall; (B) average temperature

สรุป

จากการศึกษาความหลากชนิดและการปรากฏของหิ่งห้อยบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ พบหิ่งห้อยทั้งสิ้น 5 ชนิด ได้แก่ *Sclerotia aquatilis*, *Asymmetricata circumdata*, *Pyrocoelia* sp., *Curtos* sp. และ *Inflata indica* โดยพื้นที่ป่าพบหิ่งห้อยทั้ง 5 ชนิด และพบการปรากฏของประชากรหิ่งห้อยพบมากที่สุดในพื้นที่ป่าคิดเป็นร้อยละ 69.68 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมด ช่วงเวลา 19.30–20.00 น. เป็นช่วงเวลาที่มีการปรากฏของหิ่งห้อยสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 27.05 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมด และมีความมากมายของหิ่งห้อยสูงที่สุดเท่ากับ 51.4±5.4 ตัว การปรากฏของหิ่งห้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 18.30–20.00 น. ในส่วนของเดือนที่พบประชากรหิ่งห้อยปรากฏมากที่สุดคือเดือนสิงหาคมคิดเป็นร้อยละ 23.37 ของหิ่งห้อยที่พบทั้งหมด ส่วนรูปแบบการกระจายของประชากรหิ่งห้อยเป็นแบบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ปัจจัยแวดล้อมในส่วนของปริมาณน้ำฝนรายเดือนในพื้นที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับประชากรหิ่งห้อยที่ปรากฏ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลการศึกษาในครั้งนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปใช้ต่อยอดและช่วยในการวางแผนพัฒนาพื้นที่ให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวและอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพของหิ่งห้อย อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องและทำการศึกษาในด้านอื่น ๆ เช่น แหล่งอาหารของหิ่งห้อยในระยะตัวหนอน หรือการศึกษานิเวศวิทยาของถิ่นอาศัยรวมถึงองค์ประกอบของสังคมพืชในพื้นที่เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่สมบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการกีฏวิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ ที่ช่วยดำเนินการสำรวจและเก็บข้อมูล ขอขอบคุณโครงการฟื้นฟูและพัฒนาสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชนและระบบแวดล้อมต่อการดำรงชีวิตของหิ่งห้อยที่สนับสนุนงบประมาณในการลงพื้นที่เก็บข้อมูลการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

เกียรติศักดิ์ โพธิ์นาค, พัทธเมธา คงเจริญ, พิสิษฐ์ พูลประเสริฐ. 2561. ความหลากหลายของหิ่งห้อย (Coleoptera: Lampyridae) ในเขตพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย. 3: 101–108.

ดวงแข สิทธิเจริญชัย, องุ่น ลิ่ววานิช, นราธิป จันทรสวัสดิ์. 2558. ความหลากหลายทางชนิดของหิ่งห้อย นิเวศวิทยาการอนุรักษ์และการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ. รายงานวิจัยทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินปี 2558 โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี, ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ปัทมา บุญทิพย์. 2557. ปัจจัยสิ่งแวดล้อมบางประการที่มีต่อความมากมายของหิ่งห้อยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิรัตน์ สมมิตร. 2547. นิเวศประชากรของหิ่งห้อย *Pyrocoelia praetexta* Olivier ในสวนพฤกษศาสตร์ดอกท้อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุทิศา ลุ่มบุตร. 2551. เทคนิคการเพาะเลี้ยงและการพัฒนาสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับหิ่งห้อย *Pteroptyx malaccae* Gorham. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมหมาย ชื่นราม, องุ่น ลิ่ววานิช. 2539. พฤติกรรมและวงจรชีวิตของหิ่งห้อย (*Luciola* sp.). วารสารวิชาการเกษตร 14: 44–52.

อัญชนา ท่านเจริญ. 2552. เรื่องธรรมดาที่ไม่ธรรมดาของหิ่งห้อย. โรงพิมพ์อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

Ballantyne, L., Lambkin C.L., Boontop, Y., Jusoh, W.F.A. 2015. Revisional studies on the Luciolinae fireflies of Asia (Coleoptera: Lampyridae): 1. The genus *Pyrophanes* Olivier with two new species. 2. Four new species of *Pteroptyx* Olivier and 3. A new genus Inflata Boontop, with redescription of *Luciola indica* (Motsch.) as Inflata indica comb. nov. Zootaxa. 3959: 1–84. doi.org/10.11646/zootaxa.3959.1.1

Fu, X., Ballantyne, L., Lambkin, C. 2012. Emeia gen. nov., a new genus of Luciolinae fireflies from China (Coleoptera: Lampyridae) with an unusual trilobite-like larva, and a redescription of the genus Curtos Motsch. Zootaxa. 3403: 1–53. doi: 10.11646/zootaxa.3403.1.1

Morishita, M. 1962. Iδ-index, a measure of diapersion of individual. Researches on Population Ecology 4: 1–7

R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/, 14 December 2021.

Stanek, V.J. 1969. The pictorial encyclopedia of insects. Svoboda, Prague.

Wattanachaiyingcharoen, W., Nak-eiam, S., Phanmuangma, W., Booninkiaew, S., Nimlob, N. 2016. Species diversity of firefly (Coleoptera: Lampyridae) in the highlands of Northern Thailand. NU. International Journal of Science. 13: 24–32.

Wiwatwitaya, D., Takeda, H. 2005. Seasonal change in soil arthropod abundance in the dry evergreen forest of north-east Thailand, with special reference to collembolan communities. Ecology Research 20: 59–70.

ผลของแหล่งน้ำในพื้นที่การใช้ประโยชน์ต่างกันต่อความหลากชนิดของมดบริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์

The effect of reservoirs in different land use on ant diversity at Sirikit Dam, Uttaradit province

กัญทิมา ยอดประสิทธิ์*, วัฒนชัย ตาเสน, วิวัฒน์ หาญวงศ์จิรวัฒน์

Kuntima Yodprasit*, Wattanachai Tasen, Wiwat Hanvongjirawat

คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kuntima.yo@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของแหล่งน้ำในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินต่างกันต่อความหลากชนิดของมดได้ดำเนินการสำรวจในพื้นที่เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ได้แบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 2 ประเภท คือ พื้นที่ป่าธรรมชาติและที่อยู่อาศัยของมนุษย์ เก็บตัวอย่างโดยใช้กับดักหลุมและตะแกรงร่อนซากใบไม้ในช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2565 ผลการศึกษาทั้งพื้นที่พบมด 53 ชนิด 29 สกุล จาก 6 วงศ์ย่อย โดยมดในวงศ์ย่อย Myrmecinae มีจำนวนสกุลและชนิดมากที่สุด เมื่อพิจารณาในแต่ละพื้นที่พบว่าบริเวณที่อยู่อาศัยมีค่าดัชนีความหลากหลายทางชนิดมากกว่าป่าธรรมชาติเท่ากับ 2.66 และ 1.87 ตามลำดับ ส่วนค่าดัชนีความคล้ายคลึงของทั้งสองพื้นที่มีค่า 65.82 ทั้งนี้สามารถจัดกลุ่มของมดได้ 4 กลุ่มด้วยวิธีการ Cluster analysis ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งน้ำในพื้นที่ใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันมีผลต่อการปรากฏของมด

คำสำคัญ: กับดักหลุม, ความหลากชนิด, มด, แหล่งน้ำ

Abstract

The effect of reservoirs in different land use on ant diversity was conducted in the Sirikit Dam, Uttaradit Province. The study sites were classified into 2 types: natural forest and residential areas. Samples were collected by pitfall-trap and leaf litter sifting in the dry season between November 2021 to April 2022. The results found 53 species, and 29 genera from 6 subfamilies. The subfamily Myrmecinae found the most significant number of genera and species. When considering each area, it was found that residential had more species diversity index than natural forests, equal to 2.66 and 1.87, respectively. The similarity index was 65.82%. Thus, four groups of ants were identified by cluster analysis, which showed that reservoirs in different land use affected the appearance of ants.

Keywords: Ant, Diversity, Pitfall trap, Reservoirs

คำนำ

มดเป็นแมลงในวงศ์ Formicidae อันดับ Hymenoptera เป็นแมลงสังคมที่สามารถจัดได้ว่ามีบทบาทต่อระบบนิเวศ โดยเป็นทั้งผู้บริโภค ผู้ย่อยสลาย และเป็นแหล่งอาหารของสัตว์ชนิดอื่น มดหลายชนิดมีการพึ่งพาอาศัยเพื่ออยู่ร่วมกับสิ่งมีชีวิตอื่น ไม่ว่าจะเป็นเห็ดรา พืช หรือแมลงชนิดอื่น ๆ เช่น การอยู่ร่วมกันระหว่างมดเหม็นและแมลงจำพวกมวนเพลี้ยแป้ง เพลี้ยอ่อน แมลงหวี่ขาว การพึ่งพากันจะเป็นการพึ่งพาที่ทั้งสองฝ่ายได้รับประโยชน์ร่วมกัน ในกรณีของการอยู่ร่วมกันระหว่างมดเหม็นกับแมลงดังกล่าว พบว่ามดเหม็นจะได้รับอาหารเป็นน้ำหวาน (Honeydew) ที่ถูกผลิตออกมา ส่วนแมลงเหล่านั้นจะได้ประโยชน์จากการที่มดเหม็นช่วยในการไล่ศัตรูนักล่าทางธรรมชาติ หรือเป็นตัวห้ำของมวนเพชฌฆาต (Venkataramaiah and Rehman, 1989; Appel et al., 2004; Wetterer, 2009; Zhou et al., 2014) ซึ่งการพึ่งพาซึ่งกันและกันเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อนิเวศวิทยาของมด (Price et al., 2011) มดจึงมีความสำคัญอย่างมากในการทำให้ระบบนิเวศอยู่ในสภาวะสมดุล (ลักขิกา และคณะ, 2562) มดที่อาศัยอยู่ตามดินและเศษซากพืช การหาอาหารของมดบางชนิดไม่ว่าจะเป็นเมล็ดพืช ใบไม้ ซากสัตว์ หรือการที่มดบางชนิดมีการนำเอาใบไม้มาทำรังจะส่งผลพลอยได้ให้เกิดการย่อยสลายของเศษซากพืชซากสัตว์เหล่านี้เป็นชิ้นส่วนที่เล็กลง ทำให้แบคทีเรียหรือเชื้อราในพื้นที่สามารถเข้าสลายเศษซากพืชซากสัตว์ได้ง่ายขึ้น มีกิจกรรมการเปลี่ยนแปลงดิน ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุอาหารในป่าไม้สามารถดำเนินไปได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น (Eisenbeis and Wichard, 1987; Brühl et al., 1998; Resh and Cardé, 2009) นอกจากบทบาทสำคัญตามห่วงโซ่อาหาร มดยังเป็นแมลงในดินที่มีความสำคัญและมีอิทธิพลอย่างมากต่อโครงสร้างของดิน จากการที่มดบางชนิดทำรังในดินจะมีส่วนสำคัญที่ทำให้ดินมีการเปลี่ยนโครงสร้างจากกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การสร้างห้องและทางเดินภายในรัง (Paul, 2015; Genise, 2017) ซึ่งมีอิทธิพลต่อความพรุนของดิน การเติมอากาศ การแทรกซึม และการระบายน้ำของดิน (Merlim et al., 2005)

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่ป่าธรรมชาติไปเป็นรูปแบบอื่นทำให้ปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมดในพื้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไป มีการเปลี่ยนแปลงไปของปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แสง อาหาร และที่อยู่อาศัย ซึ่งมดแต่ละชนิดมีช่วงความทนทานของปัจจัยในการดำรงชีวิตแตกต่างกันไป โดยความชื้นถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของแมลงในดิน อาจเนื่องมาจากความชื้นในดินเป็นตัวกำหนดการพัฒนาของแมลงในช่วงชีวิตหนึ่งช่วงหรือมากกว่านั้น (Szujecki, 1987) ในส่วนของอาหารก็มีความสำคัญเนื่องมาจากความหลากชนิดของมดนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งอาหารและความหลากหลายของอาหารภายในพื้นที่อาศัยเป็นหลัก (Gurevitch et al., 2002; Wang et al., 2016) นอกจากนี้ชนิดของดินในพื้นที่อาศัยที่เปลี่ยนแปลงก็มีผลต่อมด เนื่องจากปัจจัยที่มีผลที่กระตุ้นต่อมดคือความพร้อมของพื้นที่ในการทำรัง มดส่วนใหญ่ทำรังในดิน ชนิดของดินจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อผลผลิตและโครางสร้างชุมชนของมด (Andersen, 2000) ถึงแม้ว่ามดจะเป็นแมลงที่มีความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงไปได้เป็นอย่างดี แต่ยังพบว่ามีมดหลายชนิดที่มีความทนทานต่ำจึงส่งผลให้มีความจำเพาะต่อแหล่งที่อยู่อาศัย ส่งผลให้เกิดการตอบสนองเมื่อสภาพพื้นที่อาศัยมีการเปลี่ยนแปลงหรือถูกรบกวน (Agosti et al., 2000; Anderson et al., 2002) มดบางชนิดสามารถบ่งบอกความสมบูรณ์ของระบบนิเวศภายในพื้นที่ได้จากพฤติกรรมการเลือกที่อยู่อาศัยที่มีความจำเพาะ เช่น มดแดง มดไอ้ชื่นธรรมดาที่ชอบอาศัยภายในพื้นที่เปิดโล่งหรือพื้นที่ที่ถูกรบกวน (พิพิธภัณฑ์มด, 2549) ขนาดที่เล็กของมดและการพึ่งพาอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงทำให้มดมีความไวต่อสภาพอากาศและการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศขนาดย่อมเป็นพิเศษ (Agosti et al., 2000) ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่ามดเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความจำเพาะสำหรับรับผลกระทบจากการถูกรบกวน หากสูญเสียความจำเพาะในการวัดการถูกรบกวนนี้มากเกินไป จะหมายความว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อยู่อาศัยอย่างรุนแรง (Mathieu et al., 2005) การบทบาททางนิเวศวิทยาที่กว้างขวางของมด มีความว่องไวต่อสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง และมีความสะดวกในการสุ่มตัวอย่าง มดจึงเป็นแมลงที่ได้รับการส่งเสริมอย่างมากในการนำไปเป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินและพื้นที่ฟื้นฟู (Majer, 1983; Alonso, 2000; Kasperi and Majer, 2000; Samways et al., 2010) โดยในพื้นที่เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าธรรมชาติไม้ไปเป็นการใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อน สร้างที่อยู่อาศัย แหล่งท่องเที่ยว พื้นที่เกษตรกรรม และการทำกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ได้ดำเนินการสำรวจชนิดของมดในบริเวณพื้นที่เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งจะทำให้ทราบได้ถึงความหลากชนิดของมดในพื้นที่ เพื่อให้สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการฟื้นฟูพื้นที่ให้เกิดความสมดุลทางธรรมชาติต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บข้อมูล

บริเวณเขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ มีแหล่งน้ำที่ใช้กักเก็บน้ำไว้ใช้ในพื้นที่เขื่อน ซึ่งมีอยู่กระจายทั้งในพื้นที่ป่าธรรมชาติและพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์ ดังนั้นการศึกษาความหลากชนิดของมดในพื้นที่จึงได้ทำการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็นทั้งหมด 2 ประเภท คือ 1.พื้นที่ป่าธรรมชาติ (Natural forest; NF) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 พื้นที่การสำรวจ ได้แก่ บริเวณป่าหลังบ้านนกกระจาบ ป่าบริเวณโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.) และป่าบริเวณโครงการชีววิถีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน และ 2.พื้นที่ที่อยู่อาศัยของมนุษย์ (Residential areas; RA) ประกอบไปด้วย 3 พื้นที่การสำรวจ ได้แก่ บริเวณหมู่บ้านห้วยแก้ว หมู่บ้านดอยน้อย และหมู่บ้านอิงดอย โดยทำการวางแปลงถาวรห่างจากแหล่งน้ำในทุกพื้นที่ที่ระยะ 10, 20, 30, 40 และ 50 เมตร ใช้แปลงขนาด 10×10 ตารางเมตร ในแต่ละพื้นที่ จำนวนพื้นที่ละ 5 แปลง ทำการเก็บตัวอย่างมด 2 วิธี คือ วิธีกับดักหลุม (Pitfall-trap) ทำโดยการขุดหลุมและใช้แก้วพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9–10 เซนติเมตร ลึก 15 เซนติเมตร ตามการศึกษาของสำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช (2553) วางลงไปในหลุมให้ขอบของแก้วพลาสติกอยู่ในระดับของผิวดิน ใส่สารละลายที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์ร้อยละ 50 น้ำร้อยละ 45 และน้ำยาล้างจานร้อยละ 5 ลงไปประมาณ 1 ใน 3 ส่วนของปริมาตรแก้วพลาสติก แต่ละพื้นที่จะทำการวางกับดักแบบสุ่ม ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแมลงใส่ในขวดที่บรรจุเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 75 แล้วทำการบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาจำแนกในห้องปฏิบัติการ (เอนกพงศ์ และคณะ, 2562; สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช, 2553) และวิธีการใช้ตะแกรงร่อนซากใบไม้ (Leaf litter sifting) เป็นวิธีที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการจับมดที่อาศัยอยู่ตามพื้นดิน โดยในพื้นที่แปลงถาวรขนาด 10×10 ตารางเมตร ได้ดำเนินการเก็บซากใบไม้หรือกิ่งไม้เป็นขนาดพื้นที่ 50×50 เซนติเมตร ความลึกประมาณ 3–5 เซนติเมตร นำมาร่อนในตะแกรงร่อนขนาดช่อง 1×1 เซนติเมตรที่มีถาดพลาสติกรองรับด้านล่าง ใช้ปากคีบจับมดใส่ในขวดเก็บตัวอย่างที่มีแอลกอฮอล์ร้อยละ 75–95 (พิพิธภัณฑ์มด, 2549; วียะวัฒน์ และคณะ, 2563) จากนั้นนำตัวอย่างแมลงที่ได้มาจำแนกชนิดในห้องปฏิบัติการทางกีฏวิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลชนิดและจำนวนตัวของมดที่สำรวจพบมาทำการคำนวณค่าดัชนีความหลากหลายทางชนิด (Species diversity index) โดยใช้สูตรของ Shannon-Wiener's Index วิเคราะห์ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Evenness index) จากค่าการกระจายชนิดพันธุ์ในสังคมมด ค่าดัชนีความคล้ายคลึง (Similarity index, IS) โดยสมการของ Sorensen (Krebs, 1972) และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติโดยใช้ Kruskal Wallis test เพื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างพื้นที่ป่าธรรมชาติและพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์ของค่าดัชนีความหลากหลายทางชนิดด้วยโปรแกรม R studio

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความหลากชนิดของมด

จากการศึกษามดในพื้นที่เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ พบมดทั้งหมด 53 ชนิด 29 สกุล จาก 6 วงศ์ย่อย ได้แก่ Amblyoponinae, Dolichoderinae, Formicinae, Myrmecinae, Ponerinae และ Pseudomyrmecinae ซึ่งมดในวงศ์ย่อย Myrmecinae มีการพบจำนวนสกุลมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 37.93 รองลงมา คือ วงศ์ย่อย Ponerinae และ Formicinae คิดเป็นร้อยละ 27.59 และ 17.24 ตามลำดับ ในด้านจำนวนชนิดพบว่า มดในวงศ์ย่อย Myrmecinae มีการพบจำนวนชนิดมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 50.94 รองลงมาคือวงศ์ย่อย Ponerinae และ Formicinae คิดเป็นร้อยละ 22.64 และ 16.98 ตามลำดับซึ่งมดในวงศ์ย่อย Myrmecinae เป็นวงศ์ย่อยที่ใหญ่ มีจำนวนสกุลและชนิดมากที่สุด ทำให้สามารถสำรวจพบได้มาก (พิพิธภัณฑ์มด, 2549) และในด้านจำนวนตัวพบว่าวงศ์ย่อย Myrmecinae พบมากที่สุดร้อยละ 42.93 รองลงมาเป็นวงศ์ย่อย Formicinae และ Ponerinae คิดเป็นร้อยละ 31.51 และ 22.16 ตามลำดับ (Fig. 1)

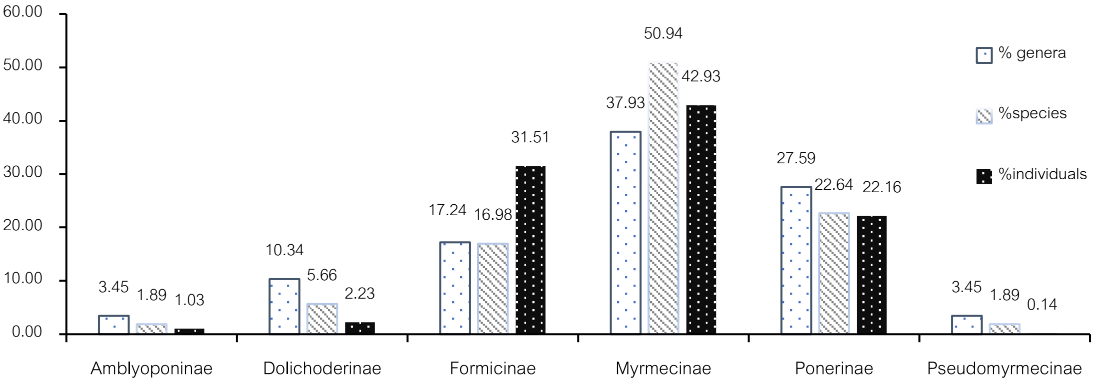


Fig. 1 Percentage of genera, species, and individuals of ant in each subfamily

ในภาพรวมของพื้นที่มดน้ำผึ้ง (*Anoplolepis gracilipes*) เป็นชนิดที่สำรวจพบมากที่สุด รองลงมาคือ มดง่ามทุ่ง (*Carebara diversa*) และมดเสี้ยนขอน (*Hypoponera* sp.1) คิดเป็นร้อยละ 29.96, 26.56 และ 6.77 ตามลำดับ ทั้งนี้มดน้ำผึ้งเป็นมดชนิดพันธุ์ต่างถิ่นรุกรานที่มีความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพพื้นที่ได้เป็นอย่างดี (Jung et al., 2017) นอกจากมดน้ำผึ้งแล้วยังพบมดที่เป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่นรุกรานชนิดอื่น ๆ อีก ได้แก่ มดเหม็น (*Tapinoma melanocephalum*) มดดำขายาว (*Paratrechina longicornis*) มดละเอียดบ้าน (*Monomorium pharaonis*) และมดคันไฟ (*Solenopsis geminata*) โดยที่สามารถคาดการณ์ได้ว่าการทำกิจกรรมของมนุษย์ในเขตเมืองมีส่วนช่วยสนับสนุนความอุดมสมบูรณ์ของมดชนิดพันธุ์ต่างถิ่นรุกรานได้ (Hasin and Tasen, 2020) เมื่อนำข้อมูลมาแยกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินพบว่าพื้นที่ป่าธรรมชาติมีจำนวนตัวของมดมากกว่าพื้นที่อยู่อาศัย ขณะเดียวกันพื้นที่อยู่อาศัยมีจำนวนชนิดของมดมากกว่า และไม่มีการพบมดวงศ์ย่อย Amblyoponinae และ Pseudomyrmecinae ในพื้นที่อยู่อาศัย เนื่องมาจากมดวงศ์ย่อย Amblyoponinae พบได้ค่อนข้างยากในพื้นที่ที่มีกิจกรรมของมนุษย์ เนื่องจากเป็นวงศ์ที่อยู่อาศัยในพื้นที่ของป่าที่ค่อนข้างสมบูรณ์ เป็นผู้ล่ากลุ่มเล็ก ๆ ที่มีประชากรน้อย ส่วนวงศ์ย่อย Pseudomyrmecinae มักอาศัยทำรังและหาอาหารบนต้นไม้จึงทำให้พบเห็นตัวได้ยากในพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์หรือในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของต้นไม้น้อย (พิพิธภัณฑ์มด, 2549)

โครงสร้างทางสังคมมด

ในการศึกษาโครงสร้างทางสังคมของมดในพื้นที่จะทำการพิจารณาจากค่าดัชนีความหลากหลายทางชนิด (Species diversity index) ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Evenness index) และค่าดัชนีความคล้ายคลึง (Similarity index, IS) โดยการวิเคราะห์ค่าดัชนีความหลากหลายทางชนิดพบว่าพื้นที่ประเภทที่อยู่อาศัยมีความดัชนีความหลากหลายทางชนิดมากกว่าพื้นที่ที่ป่าธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.66 และ 1.87 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีความหลากชนิดด้วยทางสถิติโดยวิธีการ Kruskal Wallis test พบว่าพื้นที่ป่าธรรมชาติและพื้นที่ที่อยู่อาศัยของมนุษย์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ทั้งสองอาจเป็นไปได้ว่ามีชนิดพืชปกคลุมดินและปัจจัยในการดำรงชีวิตของมดส่วนใหญ่มีความแตกต่างกัน ในส่วนของค่าดัชนีความสม่ำเสมอพบว่าพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์มีความสม่ำเสมอมากกว่าพื้นที่ป่าธรรมชาติเท่ากับ 0.70 และ 0.54 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์มีปัจจัยในการช่วยเอื้ออำนวยให้มดสามารถอาศัยอยู่ได้มาก มดในพื้นที่สามารถหากินได้เป็นบริเวณกว้างจึงทำให้สามารถพบมดได้อย่างสม่ำเสมอในทุกบริเวณของพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์ ในส่วนของค่าดัชนีความคล้ายคลึงพบว่าพื้นที่ป่าธรรมชาติและพื้นที่ที่อยู่อาศัยมีค่าความคล้ายคลึงกันที่ร้อยละ 65.82 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ทั้งสองมีปัจจัยในการดำรงชีวิตของมดและพืชปกคลุมที่มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งมดที่พบได้ทั้ง 2 พื้นที่มี 26 ชนิด เช่น มดน้ำผึ้ง (*Anoplolepis gracilipes*) มดเหม็น (*Tapinoma melanocephalum*) และมดละเอียดบ้าน (*Monomorium pharaonis*) เป็นต้น โดยมดน้ำผึ้งและมดเหม็นเป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่นรุกรานและทั้ง 3 ชนิดสามารถพบเจอได้ในทุกจังหวัดของประเทศไทย (วียะวัฒน์ และคณะ, 2563) มดที่พบเฉพาะในพื้นที่ป่าธรรมชาติมี 7 ชนิด เช่น มดฮี้โป่งอินโดจีน (*Crematogaster aurita*) มดละเอียดหัวท้ายดำ (*Monomorium floricola*) และมดปากเลื่อยดำใหญ่ เป็นต้น มดที่พบเฉพาะในพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์มี 19 ชนิด เช่น มดกระโดดบ้าน (*Odontomachus simillimus*) มดดำขายาว (*Paratrechina longicornis*) และมดคันไฟ (*Solenopsis geminata*) เป็นต้น

ผลของแหล่งน้ำต่อความหลากชนิดของมด

ในการศึกษาปัจจัยความชื้นจากแหล่งน้ำที่มีผลต่อการพบชนิดมดโดยจากแปลงตัวอย่างถาวรที่มีระยะห่างจากแหล่งน้ำที่แตกต่างกัน 5 ระยะ ในพื้นที่ป่าธรรมชาติพบว่าในระยะที่ห่างจากแหล่งน้ำเป็นระยะทาง 10, 20, 30, 40 และ 50 เมตร พบมดจำนวน 18, 19, 19, 19 และ 17 ชนิด ตามลำดับ ในส่วนของพื้นที่ที่อยู่อาศัย พบมดจำนวน 28, 23, 19, 22 และ 26 ชนิด ตามลำดับ (Fig. 2) ซึ่งเมื่อทำการจัดกลุ่มโดยใช้วิธี Cluster analysis ด้วยโปรแกรม R studio โดยใช้ระดับความคล้ายคลึงที่ร้อยละ 75 สามารถจำแนกกลุ่มของมดออกมาได้ทั้งหมด 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 มดในพื้นที่ป่าธรรมชาติที่ระยะห่างจากแหล่งน้ำถึง 30 เมตร และพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์ที่ระยะห่างจากแหล่งน้ำ 10 เมตร และระยะ 20-50 เมตร พบจำนวน 47 ชนิด มดที่พบได้เฉพาะในกลุ่มนี้ยกตัวอย่างเช่น มดดำขายาว (*Paratrechina longicornis*) เป็นมดที่อาศัยในดิน กองใบไม้ที่ทับถม ใต้เปลือกไม้หรือขอนไม้ผุ สามารถพบเจอได้ทุกจังหวัดของไทย (วียะวัฒน์ และคณะ, 2563) มดเกล็ดเรียบเหลือง (*Cardiocondyla wroughtonii*) มดริ้วหน้าสั้น (*Tetramorium bicarinatum*) เป็นต้น กลุ่มที่ 2 มดในพื้นที่ป่าธรรมชาติที่ระยะห่างจากแหล่งน้ำถึง 30–40 เมตร พบจำนวน 19 ชนิด มดที่พบได้เฉพาะในกลุ่มนี้ คือ มดปากเลื่อยดำใหญ่ (*Stigmatomma reclinatum*) ซึ่งเป็นมดที่พบได้ตามก้อนหิน ท่อนไม้ผุพัง รากไม้ที่ยุ่งเหยิงในพื้นที่ป่าดิบเขา ป่าสมบูรณ์ ป่าทดแทน สวนสาธารณะ หรือชายหาด โดยที่พบได้ไม่บ่อยนัก (วียะวัฒน์ และคณะ, 2563) กลุ่มที่ 3 มดในพื้นที่ป่าธรรมชาติที่ระยะห่างจากแหล่งน้ำ 40–50 เมตร พบจำนวน 17 ชนิด มดที่พบได้เฉพาะในกลุ่มนี้ คือ มดฮี้โป่งอินโดจีน (*Crematogaster aurita*) ที่มักจะอาศัยตามป่าเบญจพรรณ ป่าเต็งรัง สวนป่าสัก ตามรอยแยกของต้นไม้ และมดละเอียดหัวท้ายดำ (*Monomorium floricola*) และกลุ่มที่ 4 มดในพื้นที่อยู่อาศัยของมนุษย์ในระยะห่างจากน้ำ 20 เมตร พบจำนวน 23 ชนิด มดที่พบได้เฉพาะในกลุ่มนี้ยกตัวอย่างเช่น มดตะลานปล้องขี้เถ้า (*Camponotus rufoglaucus*) มดเอวแบน (*Technomyrmex sp.1*) มดคัน (*Pheidole* sp.5) เป็นต้น (Fig. 3) โดยจากการสำรวจพบว่าที่ระยะห่างจากแหล่งน้ำที่ต่างกันจะสามารถพบชนิดมดและจำนวนตัวของมดได้แตกต่างกัน เนื่องมาจากมดแต่ละชนิดจะมีช่วงของความชื้นที่เหมาะสมต่างกัน อีกทั้งระยะห่างจากแหล่งน้ำยังมีผลต่อชนิดของพืชพรรณ ซึ่งส่งผลต่อการอยู่อาศัย หาอาหาร หรือทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้แตกต่างกันของมด จากการศึกษาของ Bautista et al. (2009) พบว่าแมลงในอันดับ Hymenoptera (ในการศึกษาส่วนใหญ่เป็นมด) มีกิจกรรมการหาอาหารอย่างจำกัดอย่างมาก เมื่อพื้นที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ ซึ่งเป็นปัจจัยแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อมด ซึ่งมักพบในระบบนิเวศเกษตรที่ถูกรบกวน

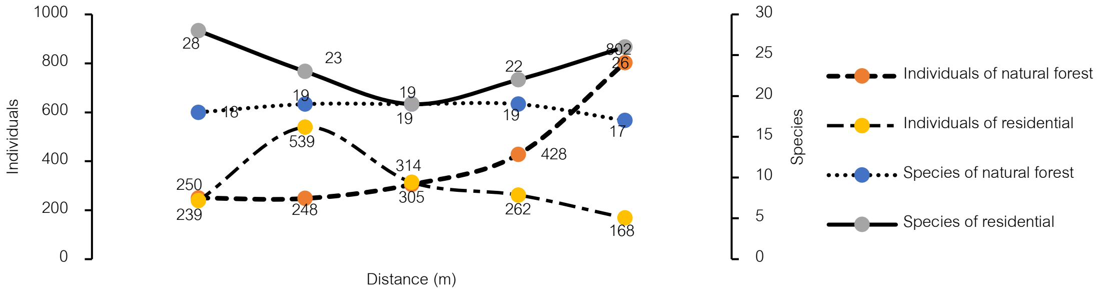


Fig. 2 Individuals and species of ants in natural forests and residential areas at different distances from reservoir

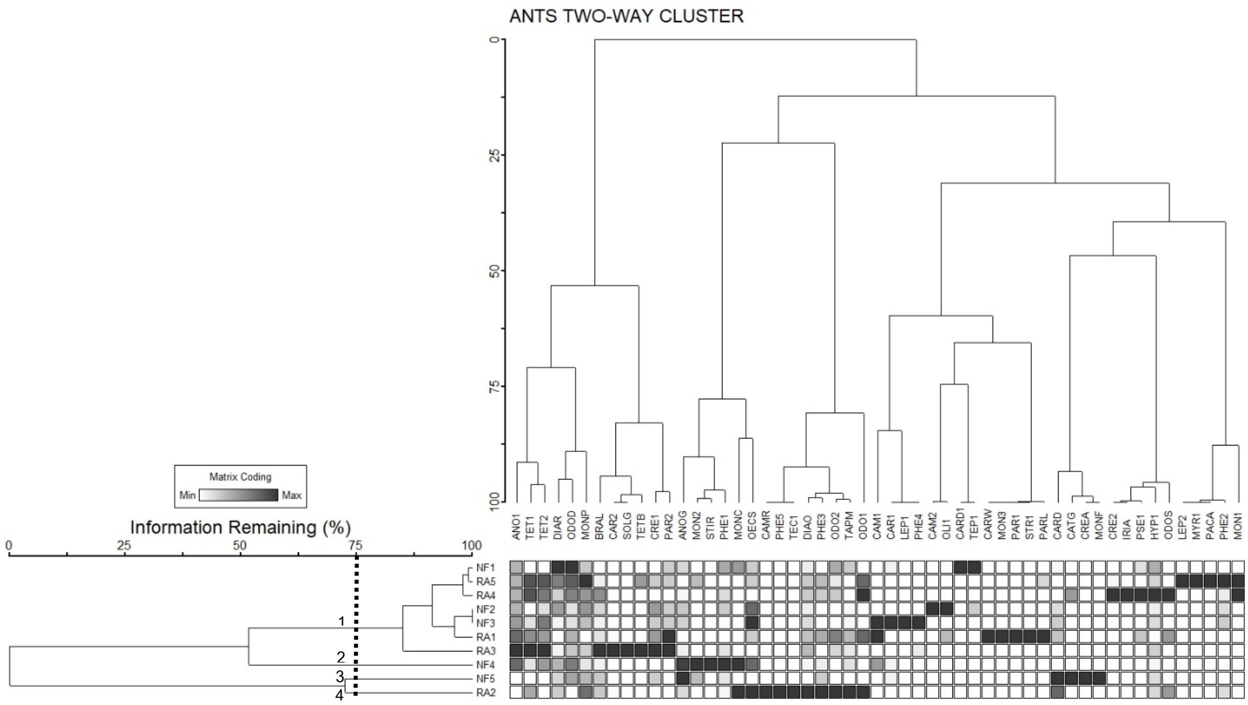


Fig. 3 Cluster analysis in different land use: NF1, 2, 3, 4, 5 = Natural forest, distance from reservoir 0-50 meters; RA1, 2, 3, 4, 5 = Residential areas, distance from reservoir 0-50 meters; ANO1 = *Anochetus* sp.1; ANOG = *Anoplolepis gracilipes*; BRAL = *Brachyponera luteipes*; CAM1 = *Camponotus* sp.1; CAM2 = *Camponotus* sp.2; CAMR = *Camponotus rufoglaucus*; CAR1 = *Carebara* sp.1; CAR2 = *Carebara* sp.2; CARD = *Carebara diversa*; CARD1 = *Cardiocondyla* sp.1; CARW = *Cardiocondyla wroughtonii*; CATG = *Cataulacus granulatus*; CRE1 = *Crematogaster* sp.1; CRE2 = *Crematogaster* sp.2; CREA = *Crematogaster aurita*; DIAO = *Diacamma orbiculatum*; DIAR = *Diacamma rugosum*; HYP1 = *Hypoponera* sp.1; IRIA = *Iridomyrmex anceps*; LEP1 = *Leptogenys* sp.1; LEP2 = *Leptogenys* sp.2; MON1 = *Monomorium* sp.1; MON2 = *Monomorium* sp.2; MON3 = *Monomorium* sp.3; MONC = *Monomorium chiensis*; MONF = *Monomorium floricola*

สรุป

จากการศึกษามดในพื้นที่เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ในภาพรวมของพื้นที่พบมดทั้งหมด 53 ชนิด 29 สกุล จาก 6 วงศ์ย่อย ซึ่งมดในวงศ์ย่อย Myrmecinae มีการพบจำนวนสกุลและชนิดมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 37.93 และ 50.94 ตามลำดับพื้นที่ มดน้ำผึ้ง (*Anoplolepis gracilipes*) สำรวจพบมากที่สุดร้อยละ 29.96 โดยในพื้นที่ป่าธรรมชาติมีจำนวนตัวมากกว่าพื้นที่อยู่อาศัย แต่ในพื้นที่อยู่อาศัยมีจำนวนชนิดมากกว่าพื้นที่ป่าธรรมชาติ ซึ่งวิเคราะห์ค่าทางสถิติในพื้นที่ป่าธรรมชาติและพื้นที่ที่อยู่อาศัยพบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่าดัชนีความคล้ายคลึงพื้นที่ป่าธรรมชาติและที่อยู่อาศัยมีค่าร้อยละ 65.82 ส่วนระยะห่างจากแหล่งน้ำในพื้นที่การใช้ประโยชน์ต่างกันสามารถจัดกลุ่มชนิดมดได้ 4 กลุ่ม แสดงให้เห็นว่าความชื้นจากแหล่งน้ำมีผลต่อการปรากฏของชนิดมด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณโครงการฟื้นฟูและพัฒนาสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชนและระบบนิเวศที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของหิ่งห้อย และเจ้าหน้าที่ที่เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือในการทำงานในห้องปฏิบัติการ ให้ความช่วยเหลือในการสำรวจและการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

พิพิธภัณฑ์มด. 2549. พิพิธภัณฑ์มด Ant Museum. อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ลักขิกา ปัญญารักษา, ปิยะวรรณ สุทธิประพันธ์, ไสว บูรณพานิชพันธุ์, วียะวัฒน์ ใจตรง. 2562. ความหลากชนิดของมดที่พบบริเวณผิวดินในระบบการปลูกกาแฟแบบวนเกษตร. วารสารวนศาสตร์ 38(1): 168–182.

วียะวัฒน์ ใจตรง, เกรียงไกร สุวรรณภักดิ์, ยุทธนา สามัง, ทัศนัย จีนทอง. 2563. มดประเทศไทย Ants of Thailand. 5k Panich Co Ltd. กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช. 2553. คู่มือการสำรวจความหลากหลายทางชีวภาพในพื้นที่ป่าอนุรักษ์. สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

เอนกพงศ์ สีเขียว, วัฒนชัย ตาเสน, สคาร ทีจันทึก. 2562. สังคมแมลงผิวดินในพื้นที่ฟื้นฟูป่าเหมืองหินปูน จังหวัดสระบุรี. วารสารวนศาสตร์ไทย 39(1): 1–10.

Agosti, D., Majer, J.D., Alonso, L.E., Schultz, T.R. 2000. Ants standard methods for measuring and monitoring biodiversity. Smithsonian Institution Press. New York, NY, USA.

Alonso, L.E. 2000. Ants: Standard methods for measuring and monitoring biodiversity. In: Agosti, D., Majer, J.D., Alonso, L.E., Schultz, T.R. (Eds.). Ants as indicators of diversity. Smithsonian Institution Press, Washington, DC., pp. 80–88.

Andersen, A.N. 2000. Ants standard methods of measuring and monitoring biodiversity, In: Aosti, D., Majer, J.D., Aonso, L.E., Schultz, T.R. (Eds.). A global ecology of rainforest ants: Functional groups in relation to environmental stress and disturbance. Smithsonian Institution Press, US, pp. 25–34.

Andersen, A.N., Hoffmann, B.D., Muller, W.J., Griffiths, A.D. 2002. Using ants as bioindicator in land management: simplifying assessment ant community responses. Journal of Applied Ecology 39(1): 8–17.

Appel, A.G., Na, J.P.S., Lee, C.Y. 2004. Temperature and Humidity Tolerances of the Ghost Ant, *Tapinoma melanocephalum* (Hymenoptera: Formicidae). Sociobiology 44(1): 89–100.

Bautista, F., Castelazo, C.D., Robles, M.G. 2009. Changs in soil macrofauna in agroecosystems derived from low deciduous tropical forest on leptosols from Karstic zones. Tropical and Subtropical Agroecosystems 10: 185–197.

Brühl, C.A., Gunsalam, G., Linsenmair, K.E. 1998. Stratification of ants (Hymenoptera, Formicidae) in a primary rain forest in Sabah, Borneo. Journal of Tropical Ecology 14: 285–297.

Eisenbeis, G, Wichard, W. 1987. Atlas on the Biology of Soil Arthropods. Springer-Verlag. Berlin, Germany.

Genise, J.F. 2017. Ichnoentomology Insect Traces in Soils and Paleosols. Springer Cham, Switzerland.

Gurevitch, J., Scheiner, S.M., Fox, G.A. 2002. The ecology of plants. Sinauer Associates, USA.

Hasin, S., Tasen, W. 2020. Ant community composition in urban areas of Bangkok, Thailand. Agr. Nat. Resour. 54: 507–514.

Jung, J.M., Jung, S., Ahmed, M.R., Cho, B.K., Lee, W.H. 2017. Invasion risk of the yellow crazy ant (*Anoplolepis gracilipes*) under the representative concentration pathways 8.5 climate change scenario in SouthKorea. Journal of Asia-Pacific Biodiversity 10: 548–554.

Kasperi, M., Majer, J.D. 2000. Ants: Standard methods for measuring and monitoring biodiversity. In: Agosti, D., Majer, J.D., Alonso, L.E., Schultz, T.R. (Eds.). Using ants to monitor environmental change, Smithsonian Institution Press, Washington, DC., USA. pp. 89–98.

Krebs, J.C. 1972. Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance. Harper and Row Publishers, New York, NY, USA.

Majer, J.D. 1983. Ants: bioindicators of mine site rehabilitation land use and land conservation. Environmental Management 7: 375–383.

Mathieu, J., Rossi, J.P., Mora, P., Lavelle, P., Martins, P., Lefèvre, C.R., Grimaldi, M. 2005. Recovery of soil macrofauna communities after forest clearance in eastern Amazonia, Brazil. Conservation Biology 19: 1598–1605.

Merlim, A.O., Guerra, J.G.M., Junqueira, R.M., Aquino, A.M. 2005. Soil macrofauna in cover crops of figs grown under organic management. Sci. Agric. 62(1): 57–61.

Paul, E.A. 2015. Soil microbiology, ecology and biochemistry, 4^{th} ed. Elsevier Inc. Oxford, UK.

Price, P.W, Denno, R.F., Eubanks, M.D., Finke, D.L., Kaplan, I. 2011. Insect ecology behavior, populations and communities. Cambridge University Press. New York, NY, USA.

Resh, V.H., Cardé, R.T. 2009. Encyclopedia of Insects, 2^{nd} ed. Elsevier Inc. Oxford, UK.

Samways, M.J., McGeoch, M.A., New, T.R. 2010. Insect conservation: A handbook of approaches and methods (Techniques in Ecology & Conservation). Oxford University Press. Oxford, England.

Szujecki, A. 1987. Ecology Of Forest Insects. Springer. Berlin/Heidelberg, Germany.

Venkataramaiah, G.H., Rehman, P.A. 1989. Ants associated with the mealybugs of coffee. Indian Coffee 43: 13–14.

Wang, S., Chen, H.Y., Tan, Y., Fan, H., Ruan, H. 2016. Fertilizer regime impacts on abundance and diversity of soil fauna across a poplar plantation chronosequence in coastal Eastern China. Scientific Reports 6: 1–6.

Wetterer, J.K. 2009. Worldwide spread of the ghost ant, *Tapinoma melanocephalum* (Hymenoptera: Formicidae). Myrmecological News 12: 23–33.

Zhou, A.M., Liang, G.W., Zeng, L., Lu, Y.Y., Xu, Y.J. 2014. Interactions between Ghost Ants and Invasive Mealybugs: The case of *Tapinoma melanocephalum* (Hymenoptera: Formicidae) and *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae). Florida Entomologist 97(4): 1474–1480.

ความหลากชนิด ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม บริเวณแนวถนนหลวงหมายเลข 304 แนวเชื่อมต่อป่าอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และอุทยานแห่งชาติทับลาน จังหวัดปราจีนบุรี

Diversity of mammals in highway route No. 304 corridor area between Khao Yai National Park and Thap Lan National Park, Prachin Buri Province

พัฒนภณ ฉัตรตระกูลดี*, **รองลาภ สุขมาสรวง**

Pattanaphon Chattrakuldee*, Ronglarp Sukmasuang

ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pattanaphon.ch@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาความหลากชนิดของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในพื้นที่บริเวณแนวถนนหลวงหมายเลข 304 แนวเชื่อมต่อป่าอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และอุทยานแห่งชาติทับลาน จังหวัดปราจีนบุรี ระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 191+860 ถึง 195+360 จากกล้องดักถ่ายภาพ ระหว่าง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561 ถึง เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2565 รวม 24 ตำแหน่ง 16,354 กับดักคืน (Trap nights) รวมจำนวนภาพที่เป็นอิสระต่อกัน จำนวน 13,414 ภาพ พบสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จำนวน 27 ชนิด 16 วงศ์ 6 อันดับ พบสัตว์ป่าที่มีแนวโน้มใกล้สูญพันธุ์ 8 ชนิด สัตว์ป่าใกล้สูญพันธุ์อย่างยิ่ง 1 ชนิด และสัตว์ป่าใกล้สูญพันธุ์ 1 ชนิด ชนิดที่พบมากที่สุดคือกวางป่า หมูป่า ลิงกัง กระจ้อน กระรอกปลายหางดำ เม่นใหญ่ หมาใน ตามลำดับ พบว่า ค่าความชุกชุมของสัตว์ป่ามีค่ารวม 75.25% โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (F = 11.94, p =0.08) ขณะที่ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพมีค่ารวม 0.62 มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (F = 10.52, p = 0.01) และค่าดัชนีความสม่ำเสมอมีค่ารวม 0.10 โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (F = 14.56, p < 0.01) ผลศึกษาชี้ให้เห็นว่าแม้ความชุกชุมของสัตว์ป่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่เสถียรภาพทางสังคมของประชากรสัตว์ป่าเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีความหลากหลายและความสม่ำเสมอ มีค่าน้อยมาก ซึ่งอาจเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ และสัตว์เลี้ยง ที่พบการเข้ามาใช้ประโยชน์พื้นที่แนวเชื่อมต่อสัตว์ป่า คิดเป็น 1 ใน 4 ของภาพถ่ายที่ได้ทั้งหมด ดังนั้น การจัดการแนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าต้องเน้นที่ควบคุมกิจกรรมของมนุษย์ ให้ลดลงโดยการประชาสัมพันธ์ ให้การศึกษา รวมถึงการใช้กฎระเบียบร่วมกันอย่างเข้มงวด เพื่อปรับปรุงให้แนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าเกิดประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการเคลื่อนย้ายสัตว์ป่าระหว่างอุทยานแห่งชาติทั้งสองแห่งตามวัตถุประสงค์

คำสำคัญ: ถนนหลวงหมายเลข304, แนวเชื่อมต่อป่า, สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม, อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่, อุทยานแห่งชาติทับลาน

Abstract

The study examined the diversity of mammal species in the area along Highway No. 304, which a wildlife corridor connecting Khao Yai National Park and Thap Lan National Park is located. The data was collected via camera traps at 24 locations between May 2018 and June 2022. Based on a total of 13,414 independent images, resulting in the identification of 27 species of mammals. The study also found 8 vulnerable species, 1 critically endangered species, and 1 endangered species. The total abundance of wild animals was 75.25% with a significant increase trend (F = 11.94, p = 0.08), while the biodiversity index was 0.62 in total with a significant decrease (F = 10.52, p = 0.01) and the uniformity index was 0.10 with a significant decrease (F = 14.56, p < 0.01) The results indicate that the abundance of wildlife tends to increase. However, the social stability of wildlife populations in terms of diversity and uniformity was found to be quite low. This may be due to various factors, including human activities in the wildlife corridor area. Therefore, wildlife corridor management must focus on controlling the disturbance to human activities. This includes strict sharing of rules and regulations to further improve the wildlife corridor for the purpose of moving wildlife.

Keywords: Corridor, Diversity mammals, Highway Route No. 304, Khao Yai National Park, Thap Lan National Park

คำนำ

การติดตามศึกษาความหลากชนิด ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม มีความสำคัญสำหรับการบริหารงานด้านการคุ้มครองถิ่นที่อาศัย และการจัดการสัตว์ป่าในธรรมชาติ ซึ่งสามารถใช้ประเมินผลในการจัดการพื้นที่ ด้วยการสำรวจประชากรของสัตว์ป่าและชนิดพันธุ์ ใช้เปรียบเทียบระดับประชากรในพื้นที่ศึกษา และพื้นที่อื่น ๆ เพื่อประเมินทางนิเวศ โดยในประเทศไทยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับพื้นที่ป่าอนุรักษ์มานาน และการทำงานวิจัยครั้งนี้เลือกที่จะทำการศึกษาความหลากชนิดของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในบริเวณที่มีการสร้างสะพานเชื่อมต่อ ระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 191+860 ถึง 195+360 รวมระยะทางประมาณ 3 กิโลเมตร ด้วยการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพภายในขอบเขตพื้นที่ประมาณ 1 กิโลเมตร จากแนวทางหลวง แนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าดังกล่าวมีการสร้างทางยกระดับเพื่อสัตว์ป่ารอด (Under pass) ความยาวประมาณ 700 เมตร และอุโมงค์สำหรับสัตว์ป่าข้าม (Over pass) ความยาวประมาณ 800 เมตร โดยเริ่มก่อสร้างปี พ.ศ. 2560 และเปิดใช้ ปี พ.ศ. 2564 การติดตามสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่เข้ามาใช้เส้นทางเชื่อมต่อสัตว์ป่าระหว่างอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และอุทยานแห่งชาติทับลาน สามารถใช้เป็นดัชนีตรวจวัดความสำเร็จของการเชื่อมต่อสัตว์ป่าตามวัตถุประสงค์ (นันทชัย และ ประทีป, 2553) อีกทั้งเพื่อการติดตามให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการประกาศพื้นที่มรดกโลกทางธรรมชาติดงพญาเย็นเขาใหญ่ ที่ต้องจัดให้มีเส้นทางเชื่อมต่อสัตว์ป่าระหว่างอุทยานแห่งชาติทั้งสองแห่งต่อไป การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามความหลากชนิด ความชุกชุม ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมบริเวณแนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าดังกล่าว ที่ถึงแม้มีระยะทางเพียง 3 กิโลเมตร แต่ซึ่งนับเป็นแนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าที่สำคัญที่สุดของทางหลวงสาย 304 ที่ตัดผ่านอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และอุทยานแห่งชาติทับลานและของประเทศไทย เพื่อสามารถใช้ในการจัดการเพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อสัตว์ป่าตามวัตถุประสงค์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการศึกษา

สำรวจพื้นที่ตามเส้นทางหลวง การเลือกตำแหน่งที่ตั้งกล้องดักถ่ายภาพ พิจารณาจากความเหมาะสมในแต่ละสภาพพื้นที่ ได้แก่ เส้นทางด่านสัตว์ บริเวณที่พบร่องรอยของสัตว์ป่า โดยตำแหน่งที่ติดตั้งกล้องอยู่ ในระยะห่างจากเส้นทางหลวงสาย 304 ขนานกับแนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าทั้งสะพานยกระดับ (Under pass) และอุโมงค์ (Over pass) โดยตั้งกล้องห่างจากแนวทางหลวงในระยะระหว่าง 100–1000 เมตร โดยทั่วไปติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพให้กล้องแต่ละชุดมีระยะห่างกันประมาณ 500 เมตร เพื่อความเป็นอิสระของการได้ภาพ ลดความน่าจะเป็นที่จะถ่ายภาพสัตว์ตัวเดียวกันโดยกล้องหลายตัว ติดตั้งกล้องทิ้งไว้ครั้งละ 15–20 ชุด ในแต่ละครั้ง ตำแหน่งละประมาณ 1 เดือน แล้วจึงเดินทางเข้าไปตรวจสอบ มีการเคลื่อนย้ายกล้องดักถ่ายภาพไปยังตำแหน่งใหม่ตามความเหมาะสม เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ตลอดความยาวของแนวเชื่อมต่อให้มากที่สุด ในการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพ จะติดตั้งให้สูงจากพื้นดินประมาณ 30–40 เซนติเมตร ห่างจากพื้นที่เป้าหมาย 3–4 เมตร หรือตามความเหมาะสมของสภาพพื้นที่ กำหนดให้ถ่ายภาพเมื่อระบบเซนเซอร์ตรวจพบการเคลื่อนไหว โดยถ่ายภาพ 3 ภาพ ห่างกันทุก ๆ 10 วินาที ตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 1 กับดักคืน (Trap day หรือ Trap night) โดยภาพถ่ายที่ได้ จัดจำแนกภาพลงในโปรแกรม Microsoft Excel ด้วยโปรแกรม Camera Trap Manager เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลความมากมาย จำแนกชนิดของสัตว์ป่า ใช้ชื่อสามัญและชื่อสัตวศาสตร์ตาม (Lekagul and McNeely, 1988) และตรวจสอบทั้งชื่อวิทยาศาสตร์ และสถานภาพทางการอนุรักษ์ กับ IUCN (2023) และใช้เกณฑ์ความเป็นอิสระต่อกัน (Criterion for independency of animal photographs) ได้แก่ (1) รูปที่ต่อเนื่องกันของสัตว์คนละตัว อาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน (2) รูปที่ต่อเนื่องกันของสัตว์ตัวเดียวกันในชนิดเดียวกัน ซึ่งมีระยะเวลาห่างกันมากกว่า 30 นาที (3) รูปที่ไม่ต่อเนื่องกันของสัตว์ตัวเดียวกันในชนิดเดียวกัน (O’Brien, 2011) โดยดำเนินการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพระหว่าง พ.ศ. 2561 ถึง พ.ศ. 2565 โดยพื้นที่ศึกษาดังแสดงดัง Fig 1

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ศึกษาประชากรของสัตว์ป่าโดยใช้กล้องดักถ่ายภาพ ด้วยวิธีการคำนวณค่าความมากมายสัมพัทธ์ (Relative abundance) ในพื้นที่แนวถนนหลวงหมายเลข 304 (กิตติวรา และคณะ, 2558) จากสูตร (Equation 1)

$$\%\ \text{relative abundance} = \frac{\text{trap success} \times 100}{\text{trap night}} \qquad (1)$$

เมื่อ

Trap Success = จำนวนภาพที่ถ่ายภาพสัตว์ได้

Trap Night = จำนวนกล้องที่ทำการวาง x ด้วยจำนวนวันทั้งหมด

เปรียบเทียบร้อยละความมากมาย (Percent relative abundance index) ของสัตว์ป่าแต่ละชนิด โดยเปรียบเทียบค่าดัชนีความหลากหลายของสัตว์ป่าระหว่างปี พ.ศ. 2561–2565 โดยจำแนกข้อมูลเป็นช่วงที่ดำเนินการติดตาม เปรียบเทียบในช่วงก่อนดำเนินการ ระหว่างดำเนินการ และหลังดำเนินการก่อสร้างเส้นทาง เพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของสัตว์ป่าต่อแนวทางเชื่อมสัตว์ป่า

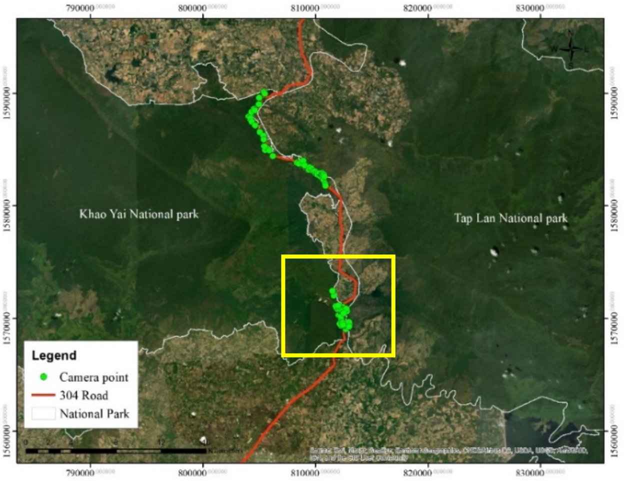


Fig. 1 The wildlife corridor, as marked by the yellow frame, is located between the 191+860-to-195+360-kilometer markers in Khao Yai national park and Thap Lan national park, Prachinburi province. Camera trap installation locations are indicated by green dots

2. การจำแนกชนิดของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่บันทึกภาพได้ จำแนกตาม Lekagul and McNeely (1988) เลือกเฉพาะรูปที่สามารถจำแนกชนิดได้ชัดเจนมีวันที่ เวลา บนภาพถ่าย การศึกษานี้ใช้เกณฑ์การคัดเลือกภาพจากกล้องดักถ่ายเฉพาะที่มีลักษณะเป็นอิสระต่อกัน โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกเหตุการณ์หรือรูปภาพสัตว์ป่าที่เป็นอิสระต่อกัน คำนวณค่าความหลากหลายของชนิดสัตว์ป่า โดยการคำนวณค่า Simpson’s index เป็นการวัดความหลากหลายทางชีวภาพที่คำนวณจากจำนวนในแต่ละชนิดพันธุ์ที่ปรากฏ (He and Hu, 2005) โดยใช้สูตร (Equation 2)

$$D = 1 - \left[\frac{\sum n(n-1)}{N(N-1)}\right] \quad (2)$$

เมื่อ

n = the total number of organisms of a particular species
N = the total number of organisms of all species

ค่าดัชนีความหลากหลายซิมป์สัน (Simpson’s diversity index: D) ใช้การคำนวณจากจำนวนในแต่ละชนิดที่ปรากฏ โดยใช้หลักการว่าหากมีจำนวนชนิดมาก และจำนวนของแต่ละชนิดที่พบมีจำนวนเท่ากัน ค่าความหลากหลายทางชีวภาพก็มาก โดยค่า D จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งหากเป็น 0 จะหมายถึงไม่มีความหลากหลายทางชีวภาพและหากเป็น 1 จะหมายถึงมีความหลากหลายชีวภาพมาก (Barcelona Field Studies Center, 2012)

คำนวณค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Evenness index) (Pielou, 1966; O Kvålseth, 2015) จากสูตร

Species Evenness = H / Ln((s-1) / Ln(n))

เมื่อ

s = Number of Species Recorded
n = Total Number of Individuals in the Sample
H = Shannon's Diversity Index

ดัชนีความสม่ำเสมอ (Simpson's Evenness index) โดยค่าที่ได้มีค่าตั้งแต่ 0–1 ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีโครงสร้างทางสังคมที่ซับซ้อน (Complex structure) คือมีความเด่นของชนิดมาก ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า โครงสร้างทางสังคมที่ไม่ซับซ้อน (Simple structure) คือมีความเด่นของชนิดน้อย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความหลากชนิดของสัตว์ป่า

ผลการศึกษาระหว่างปี พ.ศ. 2561 ถึง พ.ศ. 2565 รวม 16,354 กับดักคืน (Trap nights) ได้ภาพถ่าย 36,787 ภาพ พบสัตว์ป่าทั้งหมด 46 ชนิด 26 วงศ์ (Family) 14 อันดับ (Order) ที่เข้ามาใช้ประโยชน์เส้นทางเชื่อมต่อสัตว์ป่าเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จำนวน 27 ชนิด 16 วงศ์ 6 อันดับ ที่บันทึกภาพด้วยกล้องดักถ่าย โดยสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทั้ง 6 อันดับ

เมื่อพิจารณาสถานภาพทางการอนุรักษ์ตาม IUCN (2023) พบเป็นสัตว์ป่าที่มีแนวโน้มใกล้สูญพันธุ์ (Vulnerable) 8 ชนิด สัตว์ป่าใกล้สูญพันธุ์อย่างยิ่ง (Critically endangered) 1 ชนิด และสัตว์ป่าใกล้สูญพันธุ์ (Endangered) 1 ชนิด ชนิดที่พบมากที่สุด คือ กวางป่า หมูป่า ลิงกัง กระจ้อน กระรอกปลายหางดำ เม่นใหญ่ หมาใน เป็นต้น ตามลำดับ โดยพบว่าภาพกิจกรรมมนุษย์ สุนัขบ้านและแมวบ้าน คิดเป็น 1 ใน 4 ของจำนวนภาพถ่ายที่ได้ทั้งหมด พบว่าค่าความชุกชุมของสัตว์ป่ามีค่ารวม 75.25% (Table 1) ดังนี้

1. อันดับสัตว์กีบคู่ (Order Artiodactyla) พบ 6 ชนิด 4 วงศ์ ได้แก่ วงศ์วัวและควาย (Family Bovidae) พบ 2 ชนิด ได้แก่ เลียงผา (*Capricornis sumatraensis*) กระทิง (*Bos gaurus*) วงศ์กวาง (Order Cervidae) พบ 2 ชนิด ได้แก่ เก้ง (*Muntiacus muntjak*) และกวางป่า (*Rusa unicolor*) วงศ์หมูป่า (Family Suidae) พบ 1 ชนิด ได้แก่ หมูป่า (*Sus scrofa*) และวงศ์กระจง (Tragulidae) 1 ชนิด ได้แก่ กระจงหนู

2. อันดับสัตว์ป่ากินเนื้อ (Order Carnivora) พบ 13 ชนิด 6 วงศ์ ได้แก่ วงศ์เพียงพอน (Family Mustelidae) พบ 1 ชนิด คือ หมูหริ่ง (*Arctonyx collaris*) วงศ์หมาป่า (Family Canidae) พบ 2 ชนิด ได้แก่ หมาจิ้งจอก (*Canis aureus*) และหมาใน (*Cuon alpinus*) วงศ์แมวป่า (Family Felidae) พบ 2 ชนิด ได้แก่ เสือลายเมฆ (*Neofelis nebulosa*) และแมวดาว (*Prionailurus bengalensis*) วงศ์พังพอน (Family Herpestidae) พบ 2 ชนิด ได้แก่ พังพอนธรรมดา (*Herpestes javanicus*) และพังพอนกินปู (*Herpestes urva*) วงศ์ชะมดและอีเห็น (Family Viverridae) พบ 4 ชนิด ได้แก่ อีเห็นธรรมดา (*Paradoxurus hermaphroditus*) ชะมดแผงสันหางดำ (*Viverra megaspila*) ชะมดแผงหางปล้อง (*Viverra zibetha*) และชะมดเช็ด (*Viverricula indica*) และวงศ์หมี (Family Ursidae) ได้แก่ หมีหมา (*Ursus thibetanus*) เป็นต้น

3. อันดับวานร (Order Primates) จำนวน 1 ชนิด 1 วงศ์ คือ วงศ์ลิง (Family Cercopithecidae) ได้แก่ ลิงกัง (*Macaca leonine*)

4. อันดับสัตว์ป่าฟันแทะ (Order Rodentia) จำนวน 5 ชนิด 3 วงศ์ ได้แก่ วงศ์เม่น (Family Hystricidae) พบ 1 ชนิด คือ เม่นใหญ่ (*Hystrix brachyura*) วงศ์หนูป่า (Family Muridae) พบ 1 ชนิด คือ หนู (*Rattus spp.*) วงศ์กระรอก (Family Sciuridae) พบ 3 ชนิด ได้แก่ กระรอกปลายหางดำ (*Callosciurus caniceps*) กระรอกหลากสี (*Callosciurus finlaysonii*) และกระจ้อน (*Menetes berdmorei*)

5. อันดับกระแต (Order Scandentia) พบ 1 ชนิด 1 วงศ์ คือ กระแตเหนือ (*Tupaia belangeri*)

6. อันดับลิ่น (Pholidota) จำนวน 1 ชนิด 1 วงศ์ ได้แก่ วงศ์ลิ่นชวา (Manidae) คือ ลิ่นชวา (*Manis javanica*)

แนวโน้มของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่เข้ามาใช้แนวเชื่อมต่อสัตว์ป่า

พิจารณาแนวโน้มของสัตว์ป่าที่เข้ามาใช้เส้นทางเชื่อมต่อสัตว์ป่า ระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 191+860 ถึง 195+360 เมื่อใช้จำนวนภาพที่ถ่ายได้ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 เป็นต้นมา โดยพบว่าภาพสัตว์ป่าบ่งชี้ถึงการใช้ประโยชน์ของสัตว์ป่าจากสะพานเชื่อมต่อป่า และพบว่าสามารถบันทึกภาพสัตว์ป่าในช่วงก่อนการสร้างสะพานเชื่อมต่อป่า พ.ศ. 2561 และ พ.ศ. 2562 จำนวน 627 ภาพ 1,304 ภาพ ตามลำดับ ในช่วงระหว่างการสร้างสะพานเชื่อมต่อป่า พ.ศ. 2563 จำนวน 1,969 ภาพ ในช่วงหลังการสร้างสะพานเชื่อมต่อป่า ในปี พ.ศ. 2564 และ พ.ศ. 2565 จำนวน 4781 ภาพ และ 3,761 ภาพ ตามลำดับ แสดงว่ามีสัตว์ป่าเข้ามาใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นและลดลง เมื่อพิจารณาโดยรวม สอดคล้องกับค่าความมากมายของสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนม โดยรวม ที่พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามลำดับนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 ถึง ปี พ.ศ. 2565 โดยมีค่าความมากมายของสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนม รวม 20.78, 67.78, 44.35, 121.40, และ 130.60 ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (F = 11.94, p = 0.08) ดังรายละเอียดตาม Table 1

ดัชนีความหลากหลายและความสม่ำเสมอของสัตว์ป่า

พิจารณาค่าดัชนีความหลากหลายซิมป์สัน (Simpson's diversity index: D) พบว่าเมื่อวิเคราะห์รายปี ระหว่างปี พ.ศ. 2561–เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2565 พบว่าดัชนีความหลากหลายในปี พ.ศ. 2561 ถึง พ.ศ. 2562 ค่อนข้างสูง (0.95 และ 0.71 ตามลำดับ) แสดงว่ามีความหลากหลายทางชีวภาพในระดับสูงซึ่งเป็นช่วงก่อนการก่อสร้างสะพานเชื่อมต่อป่า และค่าสำหรับปี พ.ศ. 2563 พ.ศ. 2564 และ พ.ศ. 2565 ค่อนข้างต่ำลง (0.80, 0.56 และ 0.41 ตามลำดับ) ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (F = 10.52, p = 0.01) ซึ่งบ่งชี้ถึงการลดลงของความหลากหลายทางชีวภาพในระหว่างและหลังการก่อสร้างสะพานเชื่อมต่อป่า มีค่าเท่ากับ 0.62 ซึ่งถือว่ามีค่าความหลากหลายทางชีวภาพในสังคมของสัตว์ป่าที่ยังอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อนำค่าดัชนีความหลากหลายซิมป์สันไปเปรียบเทียบกับพื้นที่ป่าที่มีความคล้ายคลึงกันพบว่า ในการศึกษาของ กิตติวรา และคณะ, (2558) ได้บอกถึงข้อมูลดัชนีความหลากหลายบริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าสลักพระ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เป็นป่าสมบูรณ์ อยู่ที่ 0.76 ซึ่งถือว่ามีความหลากหลายทางชีวภาพมากกว่า

พิจารณาค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Simpson's Evenness index) พบว่าปี พ.ศ. 2561ถึง พ.ศ. 2562 มีค่าเฉลี่ย 0.45 (0.78 และ 0.12 ตามลำดับ) ซึ่งเป็นช่วงก่อนการสร้างทางเดินสัตว์ป่า และลดลงในช่วงปี พ.ศ. 2563 ถึง พ.ศ. 2565 (0.18, 0.07 และ 0.06 ตามลำดับ) มีค่าเฉลี่ย 0.10 โดยมีค่าเฉลี่ยของดัชนีความสม่ำเสมออยู่ที่ 0.10 ค่าดัชนีความสม่ำเสมอมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (F = 14.56, p < 0.01) ดังผลการวิเคราะห์ตาม Table 2

Table 1 The taxonomy, conservation status, and number of independent wildlife images of various species found in the area along the highway between Khao Yai National Park and Thap Lan National Park, between the kilometer markers 191+860 and 195+360, were recorded using camera traps

Year			Before construction				Under construction		Post construction				total analysis		IUCN, 2023
			2561		2562		2563		2564		2565				
No. of camera locations			21		23		24		17		16		24		
Number of trap days			3,172		1924		4440		3938		2880		16354		
No.	Common name	Family	Events	RAI	Events	RAI	Events	RAI	Events	RAI	Events	RAI	Events Combine	RAI	
Order Artiodactyla															
1	Gaur	Bovidae	4	0.13	0	0	0	0	0	0	9	0.31	13	0.08	VU
2	Serow	Bovidae	10	0.32	124	6.44	60	1.35	12	0.003	6	0.21	212	1.28	VU
3	Red Muntjac	Cervidae	45	1.42	0	0	39	0.88	201	0.051	53	1.84	338	2.04	LC
4	Sambar	Cervidae	139	4.38	655	34.04	749	16.87	2,807	0.713	2,178	75.63	6528	39.48	VU
5	Lesser Oriental Chevrotain	Tragulidae	16	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0.1	LC
6	Wild Boar	Suidae	59	1.86	75	3.9	384	8.65	987	0.251	1,072	37.22	2577	15.59	LC
Order Pholidota															
7	Malayan pangolin	Manidae	3	0.09	0	0	0	0	4	0.001	0	0	7	0.04	CR
Order Carnivora															
8	Golden Jackal	Canidae	47	1.48	6	0.31	0	0	17	0.004	6	0.21	76	0.46	LC
9	Dhole	Canidae	1	0.03	0	0	0	0	9	0.002	18	0.63	28	0.17	EN
10	Clouded Leopard	Felidae	0	0	0	0	3	0.07	0	0	0	0	3	0.02	VU
11	Leopard Cat	Felidae	7	0.22	0	0	93	2.09	42	0.011	4	0.14	146	0.88	LC
12	Small Asian Mongoose	Herpestidae	7	0.22	3	0.16	8	0.18	0	0	4	0.14	22	0.13	LC
13	Crab – eating Mongoose	Herpestidae	0	0	13	0.68	0	0	0	0	2	0.07	15	0.09	LC
14	Hog Badger	Mustelidae	12	0.38	164	8.52	33	0.74	59	0.015	9	0.31	277	1.68	VU
15	Asiatic Black Bear	Ursidae	7	0.22	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.04	VU
16	Sun Bear	Ursidae	1	0.04	0	0	0	0	4	0.001	4	0.14	9	0.05	VU
17	Common Palm Civet	Viverridae	39	1.23	76	3.95	117	2.64	128	0.033	67	2.33	427	2.58	LC

Table 1 (Con.)

Year			Before construction				Under construction		Post construction				total analysis		
			2561		2562		2563		2564		2565				
No. of camera locations			21		23		24		17		16		24		IUCN,
Number of trap days			3,172		1924		4440		3938		2880		16354		2023
No.	Common name	Family	Events	RAI	Events	RAI	Events	RAI	Events	RAI	Events	RAI	Events Combine	RAI	
18	Large-spotted Civet	Viverridae	6	0.19	0	0	1	0.02	3	0.001	6	0.21	16	0.1	EN
19	Large Indian Civet	Viverridae	5	0.16	0	0	0	0	3	0.001	0	0	8	0.05	LC
20	Small Indian Civet	Viverridae	18	0.57	0	0	21	0.47	48	0.012	15	0.52	102	0.62	LC
Order Primates															
21	Northern Pig-tailed Macaque	Cercopithecidae	44	1.39	39	2.03	305	6.87	238	0.06	98	3.4	724	4.38	VU
Order Rodentia															
22	Malayan Porcupine	Hystricidae	26	0.82	138	7.17	48	1.08	70	0.018	123	4.27	405	2.45	LC
23	Rattus spp.	Muridae	55	1.73	8	0.42	78	1.76	21	0.005	34	1.18	196	1.19	-
24	Grey-bellied Squirrel	Sciuridae	18	0.57	0	0	8	0.18	48	0.012	23	0.8	97	0.59	LC
25	Variable Squirrel	Sciuridae	14	0.44	0	0	15	0.34	3	0.001	0	0	32	0.19	LC
26	Indochinese Ground Squirrel	Sciuridae	44	1.39	3	0.16	7	0.16	67	0.017	30	1.04	151	0.91	LC
Order Scandentia															
27	Northern Treeshrew	Tupaiidae	0	0	0	0	0	0	10	0.003	0	0	10	0.06	LC
		Total	627	20.78	1304	67.78	1969	44.35	4781	121.4	3761	130.6	12442	75.25	

The abundance of mammals were 75.25% with a significant increase (F = 11.94, p = 0.08).

Table 2 The Simpson diversity index and evenness index of wildlife animals were analyzed by combining data collected via camera traps along the wildlife corridor area between kilometer markers 191+860 and 195+360. This data was recorded between 2018 and 2021

	Between Kilometers 191+860 to 195+360					Combined data
	before construction		under construction	post construction		
year	2561	2562	2563	2564	2565	
Terrestrial Mammal						
Simpson diversity index	0.95	0.71	0.80	0.56	0.41	0.62
Simpson's Evenness index	0.78	0.12	0.18	0.07	0.06	0.10

Simpson's diversity index significantly decreased (F=10.52, P=0.01). Simpson's Evenness index significantly decreased (F = 14.56, p < 0.01).

สรุป

ผลการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพ รวมจำนวน 24 ตำแหน่งรวม 16,354 กับดักคืน (Trap nights) ได้ภาพถ่าย 36,787 ภาพ พบสัตว์ป่าทั้งหมด 46 ชนิด จาก 14 อันดับ 28 วงศ์ ที่เข้ามาใช้ประโยชน์เส้นทางเชื่อมต่อสัตว์ป่า โดยเป็นสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนม จำนวน 27 ชนิด 16 วงศ์ 6 อันดับ ที่สามารถบันทึกภาพด้วยกล้องดักถ่าย เป็นสัตว์ป่ากินพืชในอันดับสัตว์กีบคู่ (Order Artiodactyla) จำนวน 6 ชนิด 4 วงศ์ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอันดับสัตว์ป่ากินเนื้อ (Order Carnivora) จำนวน 13 ชนิด 6 วงศ์ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอันดับวานร (Order Cercopithecidae) จำนวน 1 ชนิด 1 วงศ์ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอันดับสัตว์ป่าฟันแทะ (Order Rodentia) จำนวน 5 ชนิด 3 วงศ์ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอันดับกระแต (Order Scandentia) พบ 1 ชนิด 1 วงศ์ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอันดับลิ่น (Order Pholidota) จำนวน 1 ชนิด 1 วงศ์ และพบว่าระหว่างปี พ.ศ.2561–เดือนมิถุนายน พ.ศ.2565 พบว่าดัชนีความหลากหลายค่ารวมเท่ากับ 0.62 ซึ่งถือว่ามีค่าความหลากหลายทางชีวภาพในสังคมของสัตว์ป่าที่ยังอยู่ในระดับปานกลาง มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (F = 10.52, p=0.01) ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ(Simpson's Evenness index) พบว่ามีค่ารวมของดัชนีความสม่ำเสมออยู่ที่ 0.10 แสดงถึงโครงสร้างทางสังคมที่ไม่ซับซ้อนไม่มีเสถียรภาพ โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (F = 14.56, p < 0.01) ผลการศึกษาพบภาพของมนุษย์ ตลอดจนสุนัขบ้านและแมวบ้านที่เข้ามาใช้ประโยชน์พื้นที่แนวเชื่อมต่อสัตว์ป่า คิดเป็น 1 ใน 4 ของภาพถ่ายที่ได้ทั้งหมด อาจเป็นเหตุผลขัดขวางสัตว์ป่าเข้ามาใช้ประโยชน์แนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าที่แม้มีความชุกชุมมากและค่าดัชนีความสม่ำเสมอมีค่าน้อย การจัดการแนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าจึงต้องเน้นที่การควบคุมกิจกรรมของมนุษย์ที่รบกวนการเคลื่อนย้ายให้ลดลงอย่างเร่งด้วย โดยการประชาสัมพันธ์ ให้การศึกษา รวมถึงการใช้กฎระเบียบร่วมกันอย่างเข้มงวด เพื่อปรับปรุงให้แนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าเกิดประสิทธิภาพสูงสำหรับการเคลื่อนย้ายสัตว์ป่าตามวัตถุประสงค์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมทางหลวง หัวหน้าอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ หัวหน้าอุทยานแห่งชาติทับลาน ท่าน รศ.ดร.รองลาภ สุขมาสรวง และนิสิตปริญญาโท ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ที่ช่วยสนับสนุนงานครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กิตติวรา ศิริภัทรนุกุล, นริศ ภูมิภาคพันธ์, รองลาภ สุขมาสรวง. 2558. ความหลากชนิดและความมากมายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อ ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าสลักพระ จังหวัดกาญจนบุรี. วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย 22(1): 128–140.

นันทชัย พงศ์พัฒนานุรักษ์, ประทีป ด้วงแค. 2553. นิเวศวิทยาของการออกแบบแนวเชื่อมต่อสำหรับสัตว์ป่า:แนวความคิดในเบื้องต้นสำหรับประเทศไทย. วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย 17(1): 1–25.

Barcelona Field Studies Center. 2012. Simpson’s diversity index. http://geographyfieldwork. com/printIT.php3, 20 January 2023.

He, F., Hu, X.S. 2005. Hubbell's fundamental biodiversity parameter and the Simpson diversity index. Ecol. Lett. 8(4): 386-390. doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00729.x

IUCN. 2023. The IUCN Red List of Threatened Species. https://www.iucnredlist.org. 20 January 2023.

Kvålseth, T. 2015. Evenness indices once again: critical analysis of properties. SpringerPlus 4(1): 232. doi.org/10.1186/s40064-015-0944-4

Lekagul, B., McNeely, J.A. 1988. Mammals of Thailand. Association for the Conservation of Wildlife, Bangkok.

O'Brien, T.G. 2011. Abundance, density, and relative abundance: A conceptual framework. J. Wildl. Manag. 75(1): 71–96. doi.org/10.1007/978-4-431-99495-4_6

Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. J. Theor. Biol. 13: 131–144. doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0

ความหลากชนิด รูปแบบเวลาทำกิจกรรม และการซ้อนทับเชิงเวลาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมบนพื้นดิน ในพื้นที่ป่าฟื้นฟู และพื้นที่อนุรักษ์เทือกเขาหินปูน อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยใช้กล้องดักถ่ายภาพ

Species diversity, activity pattern and temporal overlap of terrestrial mammal in forest rehabilitation area and natural conservation area in limestone, Kaeng Khoi district, Saraburi Province using camera trap

บุญญาธิพร แก้วดี, รองลาภ สุขมาสรวง*

Bunyatiporn kaewdee, Ronglarp Sukmasuang*

ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Biology, Faculty Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fforrls@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในพื้นที่ป่าฟื้นฟูภายหลังการทำเหมืองหินปูน และพื้นที่อนุรักษ์เทือกเขาหินปูน อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยวิธีการตั้งกล้องดักถ่ายภาพ พบความหลากชนิดในพื้นที่ป่าฟื้นฟู 5 อันดับ 11 วงศ์ 12 ชนิด ขณะที่พื้นที่อนุรักษ์พบ 6 อันดับ 12 วงศ์ 15 ชนิด ชนิดที่พบเฉพาะพื้นที่อนุรักษ์ มีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ กระรอกปลายหางดำ (*Callosciurus caniceps*) ชะมดเช็ด (*Viverricula indica*) และลิ่นชวา (*Manis javanica*) กลุ่มสัตว์ป่าที่ทำกิจกรรมช่วงกลางคืนอย่างเข้มข้น เช่น เม่นใหญ่ (*Hystrix brachyura*) กลุ่มที่ทำกิจกรรมช่วงกลางคืน คือ เลียงผา (*Capricornis sumatraensis*) และกลุ่มที่ทำกิจกรรมช่วงกลางวันอย่างเข้มข้น คือ กระรอกหลากสี (*Callosciurus finlaysonii*) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซ้อนทับเชิงเวลา พบว่าการซ้อนทับเชิงเวลาของสัตว์ป่าทั้งสองพื้นที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ยกเว้นเลียงผาที่มีช่วงเวลาทำกิจกรรมแตกต่างจากพื้นที่อนุรักษ์ เนื่องจากกิจกรรมมนุษย์ จากการศึกษานี้พบว่าการจัดการพื้นที่ภายหลังทำเหมืองมีการปรากฏชนิดพันธุ์สัตว์ป่าเช่นเดียวกับในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ แต่ควรมีการจัดการลดกิจกรรมมนุษย์ในพื้นที่เพื่อรักษาสภาพแวดล้อมของเทือกเขาหินปูนต่อไป

คำสำคัญ: การซ้อนทับเชิงเวลา, ความหลากชนิดของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม, เทือกเขาหินปูน, เวลาทำกิจกรรม

Abstract

Studying wild mammals in the rehabilitated forests after limestone mining and the conservation area of limestone mountains in Kaeng Khoi District, Saraburi Province by camera trapping. The diversity was found in 5 orders, 11 families and 12 species in the rehabilitated forests while in the conservation area, 6 orders, 12 families and 15 species were found. Three species were found in only the conservation areas, namely grey-bellied squirrel (*Callosciurus caniceps*), small Indian civet (*Viverricula indica*), and Javan pangolin (*Manis javanica*). Groups of wildlife with intense nocturnal activity patterns such as Malayan porcopine (*Hystrix brachyura*). The nocturnal activity pattern was serow (*Capricornis sumatraensis*) and the Strongly diurnal activity was Finlayson's squirrel (*Callosciurus finlaysonii*). When considering coefficients of temporal overlap of mammals two areas found that serow have different activities from natural areas due to human activities. The study found that management of the area after mining has resulted in wildlife still appearing as in the conservation area. But should be management by reducing human activities in the area to preserve the environment of the limestone mountains.

Keyword: Activity pattern, Limestone, Mammalian biodiversity, Temporal overlap

คำนำ

พื้นที่เขาหินปูน เป็นแหล่งอาศัยของพืชและสัตว์เฉพาะถิ่นหลายชนิด ที่ไม่พบในแหล่งอาศัยแบบอื่น (ปราณี และคณะ, 2011) เป็นพื้นที่วิกฤตของความหลากหลายทางชีวภาพ (พิทักษ์ไทย และคณะ, 2564) เนื่องจากเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่า และพรรณไม้เฉพาะถิ่นที่มีวิวัฒนาการโดยสัมพันธ์กับการเปลี่ยนระดับของน้ำทะเล สภาพทางธรณีตลอดจนการยึดครองในเชิงวิวัฒนาการของสัตว์และพืชในพื้นที่มาอย่างต่อเนื่องยาวนาน (Latinne et al., 2011; ธราภรณ์, 2560) เทือกเขาหินปูนของประเทศไทยพบกระจายทุกภาค โดยเฉพาะภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ (กรมป่าไม้, 2551) จังหวัดสระบุรีเป็นจังหวัดในภาคกลางที่เป็นแหล่งเทือกเขาหินปูนที่สำคัญที่สุด (Latinne et al., 2011) เนื่องจากมีพื้นที่เขาหินปูนครอบคลุมอย่างกว้างขวาง ปัจจุบันยังคงมีการสัมปทานเพื่อทำเหมืองอยู่อย่างต่อเนื่อง จนทำให้ปรากฏเหมืองหินปูนร้างกระจายอยู่ทั่วไป มีผลคุกคามต่อสภาพธรรมชาติสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในพื้นที่ของเขาหินปูน นอกจากนี้ กิจกรรมของมนุษย์นอกเหนือจากการทำเหมืองหินปูน ที่สำคัญได้แก่ การเปลี่ยนสภาพพื้นที่ราบระหว่างเทือกเขาหินปูนให้เป็นพื้นที่เกษตร พื้นที่อยู่อาศัย การก่อสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐานที่ผ่านเทือกเขาหินปูนโดยตรง เช่น ถนน ทางรถไฟ การลักลอบเผาป่า ล่าสัตว์ ตลอดจนปัจจัยด้านความแปรปรวนของภูมิอากาศของโลกที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตอย่างหนักในพื้นที่เขาหินปูนช่วงฤดูร้อนของปี สิ่งเหล่านี้มีผลกระทบทั้งโดยตรงและโดยอ้อมต่อความหลากหลายทางชีวภาพของเทือกเขาหินปูน (Sodhi et al., 2010) การศึกษาความหลากชนิดของสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนมที่อาศัยอยู่ในเทือกเขาหินปูนด้วยกล้องดักถ่ายภาพนับเป็นการศึกษาที่มีประสิทธิภาพ แต่มีการศึกษาน้อยมาก (Leader and Dublin, 2000) โดยเฉพาะในพื้นที่เขาหินปูนตามธรรมชาติที่ยังไม่เคยมีกิจกรรมการทำเหมืองหินปูน การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความหลากชนิดของสัตว์ป่าโดยเปรียบเทียบพื้นที่เขาหินปูนที่ผ่านการทำเหมืองและอยู่ในระยะของการฟื้นฟูด้วยการปลูกป่าปกคลุม และพื้นที่เขาหินปูนที่เป็นธรรมชาติ ตลอดจนศึกษาช่วงเวลาทำกิจกรรม และการซ้อนทับเชิงเวลาของสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนมที่พบในพื้นที่ทั้งสองแบบ เพื่อตอบสมมุติฐานความหลากหลายของสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนม ตลอดจนความแตกต่างของช่วงเวลาการทำกิจกรรมของสัตว์ป่าเหล่านี้ในพื้นที่ทั้งสองแบบ ผลการศึกษาจักเพิ่มความเข้าใจระบบนิเวศของสัตว์ป่าในพื้นที่ เพื่อนำไปสู่การจัดการพื้นที่ และฟื้นฟูทรัพยากรสัตว์ป่าอย่างเหมาะสมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ภาคสนาม ได้แก่ กล้องดักถ่ายภาพ (Camera trap), อุปกรณ์เก็บข้อมูลอย่างถาวร และเครื่องระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ (GPS)

2. อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ คอมพิวเตอร์ โปรแกรม Microsoft office โปรแกรมจำแนกภาพสัตว์ (Camera trap file manager) และโปรแกรม R

วิธีการ

1. สำรวจพื้นที่ในพื้นที่ศึกษา และเลือกพื้นที่ที่มีการปรากฏรอยเท้า กองมูล หรือร่องรอยการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ เนื่องจากมีโอกาสบันทึกภาพสัตว์ได้มากกว่าพื้นที่ที่ไม่มีร่องรอยการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพ ตั้งค่ากล้องดักถ่ายภาพระบุวัน เดือน ปี และเวลา ณ ปัจจุบัน และกำหนดให้บันทึกภาพทุกจำนวน 3 ภาพ ในเวลา 10 วินาที ต่อเนื่องกันเมื่อมีสัตว์ป่าผ่านหน้ากล้อง พร้อมทั้งบันทึกวัน เดือน ปี ที่ติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพจนถึงวันที่สิ้นสุดการติดตั้งกล้อง ทำการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ จำนวน 16 ตำแหน่ง ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2558 ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ.2559 และในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ฯ จำนวน 24 ตำแหน่ง ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ.2562 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2563 (Fig. 1)

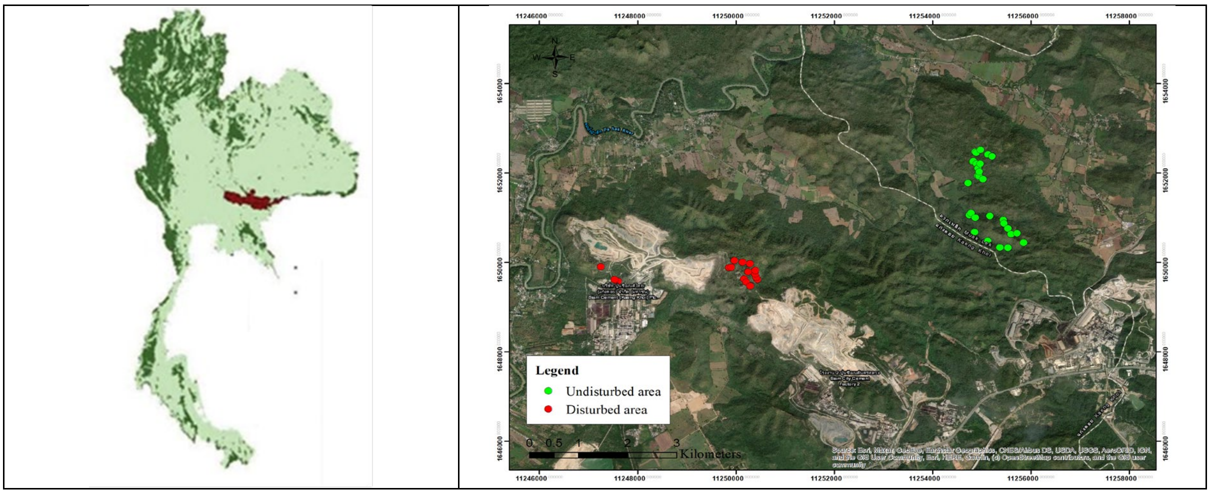


Fig. 1 Local GSP coordinates in forest rehabilitated area (Red point) and natural conservation area (Green point) of limestone mountains Kaeng Khoi district Saraburi province

2. ภาพถ่ายสัตว์ป่าที่ได้นำมาจำแนกชนิดสัตว์ด้วยโปรแกรมจำแนกภาพสัตว์ (Camera trap file manager) โดยโปรแกรมนี้สามารถกรอกวัน เดือน ปี และเวลาของภาพที่บันทึกไว้ได้โดยอัตโนมัติ โดยตัวของผู้วิจัยสามารถเห็นรายละเอียดของภาพพร้อมทั้งระบุชนิดสัตว์ป่า (Zaragozí et al., 2015)

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์ค่าร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์ (Relative abundance index: RAI%) บ่งบอกความชุกชุมสัมพัทธ์ของแต่ละชนิด โดยเลือกภาพแต่ละชนิดที่ห่างกันเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อความเป็นอิสระของข้อมูลที่ได้ โดยใช้สูตรคำนวณความชุกชุมสัมพัทธ์ Steinbeiser et al. (2019) (Equation 1)

$$\text{Relative abundance \%} = \frac{\text{Trap success}}{\text{Trap night}} \times 100 \qquad (1)$$

= =

ค่าที่คำนวณได้สามารถอธิบายถึงสัดส่วนของสัตว์ชนิดนั้นที่พบในพื้นที่ เมื่อเปรียบเทียบกับสัตว์ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ทั้งหมด เมื่อ Trap success คือ จำนวนภาพของสัตว์แต่ละชนิดที่ถ่ายภาพได้ และ Trap night คือ จำนวนกับดักคืน

2. การวิเคราะห์ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ โดยใช้ดัชนีความหลากชนิด (Shannon-Wiener index: H') Krebs (2014) (Equation 2)

$$H' = -\sum pi \ln (pi) \qquad (2)$$

เมื่อ H’ = ค่าดัชนีความหลากชนิด, s = จำนวนชนิด และ pi = จำนวนภาพของแต่ละชนิด/จำนวนภาพทั้งหมด

3. การวิเคราะห์ดัชนีความสม่ำเสมอ (Evenness index) บ่งบอกการกระจายของสัตว์แต่ละชนิดในแต่ละพื้นที่ศึกษา ซึ่ง Heip et al. (1998) ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อค่าที่คำนวณได้เข้าใกล้ 0 คือ การกระจายของสัตว์นั้นต่ำ และเมื่อค่าที่คำนวณได้เข้าใกล้ 1 คือ การกระจายของสัตว์นั้นสูง สูตรวิเคราะห์ดัชนีความสม่ำเสมอ Pielou (1966) (Equation 3)

$$E = H'/\ln(S) \qquad (3)$$

เมื่อ E คือ ดัชนีความสม่ำเสมอ, H’ คือ ดัชนีความหลากชนิด (Shannon-Wiener) และ S คือ จำนวนชนิดสัตว์

4. การวิเคราะห์ช่วงเวลาทำกิจกรรม (Activities pattern) แบ่งช่วงเวลาทำกิจกรรมเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ ทำกิจกรรมในช่วงกลางคืนอย่างเข้มข้น (Strongly - nocturnal) ≥ 85%, ทำกิจกรรมในช่วงกลางคืน (Mostly nocturnal) ระหว่าง 61–84%, ทำกิจกรรมในช่วงกลางวันและกลางคืน (Cathemeral) ระหว่าง 40–60, ทำกิจกรรมในช่วงกลางวัน (Mostly diurnal) ระหว่าง 61–84% และทำกิจกรรมในช่วงกลางวันอย่างเข้มข้น (Strongly diurnal) ≥ 85% (Schaik and Griffiths, 1996) และวิเคราะห์

การซ้อนทับเชิงเวลาในช่วงการปรากฏของสัตว์แต่ละชนิดที่สามารถบันทึกไว้ได้ โดยใช้ Overlap packet (Meredith and Ridout, 2014) แสดงช่วงเวลาทำกิจกรรมของสัตว์แต่ละชนิด โดยโปรแกรม R

ผลและการวิจารณ์ผลการศึกษา

พบสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในพื้นที่อนุรักษ์เทือกเขาหินปูนที่ยังไม่ผ่านการทำเหมือง 6 อันดับ 12 วงศ์ 15 ชนิด เลียงผา (*Capricornis sumatraensis*) ลิงกัง (*Macaca leonina*) กระจ้อน (*Menetes berdmorei*) กระรอกหลากสี (*Callosciurus finlaysonii*) อีเห็นธรรมดา (*Paradoxurus hermaphroditus*) หนู (*Rattus* sp.) พังพอนธรรมดา (*Herpestes javanicus*) เม่นใหญ่ (*Hystrix brachyura*) กระแตเหนือ (*Tupaia belangeri*) หมาจิ้งจอก(*Canis aureus*) แมวดาว (*Prionailurus bengalensis*) หมาหริ่ง (*Melogale personata*) กระรอกปลายหางดำ (*Callosciurus caniceps*) ลิ่นชวา (*Manis javanica*) และชะมดเช็ด (*Viverricula indica*) ขณะที่ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูภายหลังการทำเหมืองหินปูน พบ 5 อันดับ 11 วงศ์ 12 ชนิด ได้แก่ เลียงผา ลิงกัง กระจ้อน กระรอกหลากสี อีเห็นธรรมดา หนู พังพอนธรรมดา เม่นใหญ่ กระแตเหนือ หมาจิ้งจอก แมวดาว และหมาหริ่ง ชนิดของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่พบเฉพาะในพื้นที่อนุรักษ์ฯ พบ 3 ชนิด คือ กระรอกปลายหางดำ ชะมดเช็ด และลิ่นชวา ความชุกชุมสัมพัทธ์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ พบว่า เลียงผา (8.66%) มีค่าความชุกชุมสัมพัทธ์มากที่สุด รองลงมา คือ ลิงกัง (8.11%) เป็นต้น โดยมีค่าความชุกชุมรวม 24.66% ขณะที่ความชุกชุมสัมพัทธ์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในพื้นที่อนุรักษ์ฯ พบ ลิงกัง (8.11%) มีค่าความชุกชุมสัมพัทธ์มากที่สุด รองลงมา คือ เลียงผา (4.26%) โดยมีค่าความชุกชุมรวม 29.41%

ดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ (Shanon-Wiener index) ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ มีค่ารวม 1.89 ขณะที่ในพื้นที่อนุรักษ์ฯ มีค่ารวม 2.05 กรณีดัชนีความสม่ำเสมอ (Evenness index) พบว่า ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ และพื้นที่ป่าอนุรักษ์ฯ มีค่าเท่ากัน คือ 0.76 ดังรายละเอียดตาม Table 1

รูปแบบการทำกิจกรรมของสัตว์ป่าที่พบสามารถจำแนกเป็นกลุ่มทำกิจกรรมกลางคืนอย่างเข้มข้น ได้แก่ เม่นใหญ่ และอีเห็นธรรมดา กลุ่มทำกิจกรรมกลางคืน คือ เลียงผา ผลการศึกษานี้แตกต่างจากผลการศึกษาของ Ikeda et al. (2022a) ที่พบว่ารูปแบบกิจกรรมของเลียงผาที่ทำกิจกรรมทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน ซึ่งโดยช่วงเวลาทำกิจกรรมของเลียงผาสอดคล้องกับผลการศึกษาช่วงเวลาทำกิจกรรมของเลียงผาในพื้นที่อนุรักษ์ฯ ที่ทำกิจกรรมในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน แต่เลียงผาที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ มีรูปแบบกิจกรรมในช่วงเวลากลางคืนอย่างเข้มข้น บ่งบอกได้ว่าเลียงผาที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ มีพฤติกรรมการหลบหลีกช่วงเวลาการทำกิจกรรมของมนุษย์ที่เกิดขึ้นในเวลากลางวัน ส่งผลให้เลียงผาที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ มีรูปแบบการทำกิจกรรมในช่วงเวลากลางคืนอย่างเข้มข้น เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่เงียบสงบ และมีการรบกวนที่เกิดจากมนุษย์ และปัจจัยอื่น ๆ ค่อนข้างน้อย ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของ Cremonesi et al. (2021) ซึ่งรายงานกิจกรรมของสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนมขนาดกลางในพื้นที่ถูกรบกวน และพื้นที่ไม่ถูกรบกวนในประเทศเมียนมาร์ พบว่ามีความผันแปรในลักษณะที่หลีกเลี่ยงกิจกรรมของมนุษย์ และผลการศึกษาของ Ikeda et al. (2022b) พบว่าการรบกวนของมนุษย์เป็นปัจจัยที่เอื้อต่อการเปลี่ยนแปลงทางนิเวศวิทยาของสัตว์ป่า โดยเฉพาะการรบกวนของมนุษย์ทำให้สัตว์ป่าเปลี่ยนรูปแบบกิจกรรมจากกลางวันไปเป็นเวลากลางคืน ส่งผลให้สัตว์ป่ามักหลบหลีกช่วงเวลาทำกิจกรรมของมนุษย์ชั่วคราว กลุ่มทำกิจกรรมในช่วงคาบเกี่ยวระหว่างเวลากลางวันและกลางคืน คือ หมาจิ้งจอก และกลุ่มทำกิจกรรมในช่วงเวลากลางวันอย่างเข้มข้น ได้แก่ กระรอกหลากสี และลิงกัง ดังรายละเอียด Table 2

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซ้อนทับเชิงเวลาในสัตว์ป่าชนิดเดียวกันในพื้นที่ทั้งสอง พบว่า กระรอกหลากสีมีค่าเท่ากับ 0.76 ค่าสัมประสิทธิ์ของเลียงผา 0.76 ค่าสัมประสิทธิ์ของกระจ้อน 0.81 และค่าสัมประสิทธิ์ของลิงกัง 0.82 ซึ่งอธิบายได้ว่าช่วงเวลาทำกิจกรรมของสัตว์ทั้งสองพื้นที่ทำกิจกรรมในช่วงเวลาที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

Table 1 Comparison of species, abundance, Shannon-wiener index (H') and Evenness index (E) of terrestrial mammals in between limestone forest rehabilitation area (3,187 trap night) and natural limestone conservation area (3,121 trap night) in Limestone, Kaeng Khoi District, Saraburi Province

Order	Family	Species (Scientific name)	Forest Rehabilitation Area				Natural Conservation Area			
			NOP	RAI%	H'	E	NOP	RAI%	H'	E
Artiodactyla	Bovidae	Serow (*Capricornis sumatraensis*)	276	8.660	0.367	0.148	133	4.261	0.280	0.103
Canivora	Canidae	Golden jackal (*Canis aureus*)	15	0.471	0.076	0.031	113	3.621	0.258	0.095
	Felidae	Leopard cat (*Prionailurus bengalensis*)	8	0.251	0.047	0.019	12	0.384	0.057	0.021
	Herpestidae	Small Asian mongoose (*Herpestes javanicus*)	18	0.565	0.086	0.035	13	0.417	0.060	0.022
	Mustelidae	Large-toothed ferret badger (*Melogale personata*)	1	0.031	0.008	0.003	1	0.032	0.007	0.003
	Viverridae	Common palm civet (*Paradoxurus hermaphroditus*)	76	2.385	0.226	0.091	14	0.449	0.064	0.024
		Small Indian civet (*Viverricula indica*)	0	0.000	0.000	0.000	118	3.781	0.264	0.097
Pholidota	Manidae	Sunda Pangolin (*Manis javanica*)	0	0.000	0.000	0.000	2	0.064	0.013	0.005
Primata	Cercopithecidae	Pig-tailed macaque (*Macaca leonina*)	155	4.864	0.320	0.129	253	8.106	0.355	0.131
Rodentia	Hystricidae	East Asian porcupine (*Hystrix brachyura*)	17	0.533	0.083	0.033	43	1.378	0.143	0.053
	Muridae	Rat (*Rattus* sp.)	23	0.722	0.103	0.041	3	0.096	0.019	0.007
	Sciuridae	Grey-bellied Squirrel (*Callosciurus caniceps*)	0	0.000	0.000	0.000	7	0.224	0.037	0.014
		Indochinese ground squirrel (*Menetes berdmorei*)	95	2.981	0.255	0.103	91	2.916	0.229	0.085
		Variable squirrel (*Callosciurus finlaysonii*)	87	2.730	0.244	0.098	114	3.653	0.259	0.096
Scandentia	Tupaiidae	Northern treeshrew (*Tupaia belangeri*)	15	0.471	0.076	0.031	1	0.03	0.01	0.00
		Total	786	24.66	1.89	0.76	918	29.41	2.05	0.76

NOP; No. of Pictures and RAI%; Relative abundance.

Table 2 Comparison of activities patterns of terrestrial mammal between forest rehabilitation area and natural conservation area in limestone, Kaeng Khoi District, Saraburi Province

Common name	Forest Rehabilitation Area				Natural Conservation Area				Total
	NOP	%ADT	%ANT	TA	NOP	%ADT	%ADT	TA	
Serow	276	42(15%)	234(85%)	SN	133	52(39%)	81(61%)	C	MN
Pig-tailed macaque	155	153(99%)	2(1%)	SD	253	231(91%)	22(9%)	SD	SD
Indochinese ground squirrel	95	69(73%)	26(27%)	MD	91	82(90%)	9(10%)	SD	MD
Variable squirrel	87	81(93%)	6(7%)	SD	114	103(90%)	11(10%)	SD	SD
Common palm civet	76	0	76(100%)	SN	14	0	14(100%)	*N.C.	SN
Rat	23	1(4%)	22(96%)	*N.C.	3	0	3(100%)	*N.C.	*N.C.
Small Asian mongoose	18	16(89%)	2(11%)	*N.C.	13	11(85%)	2(15%)	*N.C.	*N.C.
East Asian porcupine	17	0	17(100%)	*N.C.	43	1(2%)	42(98%)	SN	SN
Northern treeshrew	15	15(100%)	0	*N.C.	1	0	1(100%)	*N.C.	*N.C.
Golden jackal	15	5(33%)	10(67%)	*N.C.	113	42(37%)	71(63%)	MN	C
Leopard cat	8	1(12%)	7(88%)	*N.C.	12	5(42%)	7(58%)	*N.C.	*N.C.
Large-toothed ferret badger	1	*N.C.	*N.C.	*N.C.	1	0	1(100%)	*N.C.	*N.C.
Gray-bellied Squirrel	0	0	0	0	7	7(100%)	0	*N.C.	*N.C.
Sunda Pangolin	0	0	0	0	2	1(50%)	1(50%)	*N.C.	*N.C.
Small Indian civet	0	0	0	0	118	5(4%)	113(96%)	SN	*N.C.

NOP; No. of Pictures, %ADT; %Activity Day time, %ANT; %Activity night time and TA; Time activity, SN; Strongly nocturnal (≥ 85%), MN; Mostly nocturnal (61–84%), SD; Strongly diurnal (≥ 85%), MD; Mostly diurnal (61–84%) and C; Cathemeral (40–60%)

*N.C. is Not classified

สรุป

การศึกษาความหลากชนิด เวลาทำกิจกรรม การซ้อนทับเชิงเวลาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมบนพื้นดิน พบว่าพื้นที่อนุรักษ์ฯ มีความหลากชนิดมากกว่าพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ 3 ชนิด ได้แก่ กระรอกปลายหางดำ ชะมดเช็ด และลิ่นชวา เมื่อคำนวนค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพโดยใช้ดัชนีความหลากชนิด พบว่า พื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ มีค่าดัชนีความหลากชนิดรวม 1.89 และพื้นที่อนุรักษ์ฯ มีค่าดัชนีความหลากชนิดรวม 2.05 ทั้งสองพื้นที่มีการกระจายของชนิดสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอย่างสม่ำเสมอ ช่วงเวลาการทำกิจกรรมของเลียงผา ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ ทำกิจกรรมในช่วงกลางคืนอย่างเข้มข้น แต่เลียงผาที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ฯ ทำกิจกรรมในช่วงกลางวันและกลางคืน ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาทำกิจกรรมของเลียงผาโดยทั่วไป ดังนั้นจากช่วงเวลาทำกิจกรรมเลียงผาที่แตกต่างกันของทั้งสองพื้นที่นั้น สามารถอธิบายได้ว่าช่วงเวลาทำกิจกรรมของเลียงผาในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ มีการหลีกเลี่ยง หรือหลบหลีกช่วงเวลาทำกิจกรรมของมนุษย์ เนื่องจากในพื้นที่ป่าฟื้นฟูฯ มีการทำกิจกรรมของมนุษย์ และมีการทำสัมปทานเหมืองหินปูน และการซ้อนทับเชิงเวลาของกระรอกหลากสี เลียงผา กระจ้อน และลิงกัง ของทั้งสองพื้นที่ แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่เขาหินปูนที่ศึกษายังคงเป็นที่อาศัยของสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนมจำนวนมากแม้ว่ามีกิจกรรมการทำเหมืองก็ตาม การจัดการพื้นที่ภายหลังการทำเหมืองมีผลให้ยังคงปรากฏชนิดสัตว์ป่าเช่นเดียวกับในพื้นที่ป่าเขาหินปูนธรรมชาติ การจัดการด้วยการลดกิจกรรมมนุษย์ในพื้นที่มีความจำเป็นต้องพิจารณาดำเนินการควบคู่กันเพื่อรักษาสภาพธรรมชาติบริเวณเทือกเขาหินปูนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. รองลาภ สุขมาสรวง ที่คอยสนับสนุน แนะนำ ชี้แนะแนวทางในการศึกษา ทีมสำรวจของบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ที่ค่อยอำนวยความสะดวกให้แก่คณะทำงาน ขอขอบคุณพ่อ แม่ และรุ่นพี่ที่ค่อยช่วยเหลือ และสนับสนุนตลอดจนเสร็จสิ้นภารกิจ

เอกสารอ้างอิง

ธราภรณ์ พันกันทะ. 2560. ความหลากชนิดและความมากมายของสัตว์ป่าในพื้นที่สัมปทานเหมืองหินปูน อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปราณี นางงาม, กฤษณธร ศรีภูเวียง, วสันต์ ภูพิชิต, สุชาติ วัทนะกาญจน์, จรัส ช่วยนะ. 2011. พรรณไม้บริเวณภูเขาหินปูน ในอุทยานแห่งชาติทุ่งแสลงหลวง จังหวัดพิษณุโลก. NU Science Journal 8(1): 72–86.

พิทักษ์ไทย ประโมสี, แหลมไทย อาษานอก, พระครูสังฆรักษ์ ณริชธันร์ อรุโณ (ศรีอิทธิมนต์). 2564. อิทธิพลของปัจจัยแวดล้อมต่อความหลากหลายของลักษณะเชิงหน้าที่ ของไม้ต้นในป่าเขาหินปูนเขตร้อน จังหวัดลพบุรี. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิจัยนิเวศวิทยาป่าไม้ประเทศไทย ครั้งที่ 10 มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ระหว่างวันที่ 4–5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564, หน้า 46–54

Cremonesi, G., Bisi, F., Gaffi, L., Zaw, T., Naing, H., Moe, K., Aung, Z., Mazzamuto, M.V., Gagliardi, A., Wauters, L.A. 2021. Camera trapping to assess status and compositionof mammal communities in a biodiversity hotspot in Myanmar. Animals 11(880): 2–17. doi.org/10.3390/ani11030880

Heip, C., Herman, P., Soetaert, K. 1998. Indices of diversity and evenness. Oceanis 24(4): 61–87.

Krebs, C.J. 2014. Ecological Methodology, 3rd ed. New York, NY, USA. https://www.zoology.ubc.ca/~krebs/books.html, 21 November 2022.

Ikeda, T., Nakamori, S., Ando, M. 2022a. Activity patterns and habitat use between Sika Deer and Japanese Serow. J. of Ecology. Sika Deer: Life History Plasticity and Management: 485–502.

Ikeda, T., Higashide, D., Shichijo, T. 2022b. Impact of human disturbance in Japan on the distribution and diel activity pattern of terrestrial mammals. J. Nat. Conserv. 70: 126293. doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126293

Latinne, A., Waengsothorn, S., Herbreteau, V., Michaux, J.R. 2011. Thai limestone karsts: An impending biodiversity crisis. In: Environmental supporting in food and energy security. Bangkok, Thailand. pp. 176–187.

Leader, W.N., Dublin, H. 2000. Charismatic megafauna as 'flagship species. In: Entwistle A., Dunstone N. (Eds.). Priorities for the conservation of mammalian diversity: Has the panda had its day? Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 53–81.

Meredith, M., Ridout, M. 2014. Overview of the overlap package. (Computer program). Central R Archive Network Online.

Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. J. Theor Biol. 13: 131–144. doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0

Schaik, C.P., Griffiths, M. 1996. Activity periods of Indonesian rain forest mammals. Biotropica 28(1): 105–112. doi.org/10.2307/2388775

Sodhi, N.S., Koh, L.P., Clements, R., Wanger, T.C., Hille, J.K., Hamer, K.C., Clough, Y., Tscharntke, T., Posa M.R.C., Lee, T.M. 2010. Conserving Southeast Asian Forest biodiversity in human-modified landscapes. Biol. Conserv. 143(10): 2375–2384.

Steinbeiser, C.M., Kioko, J., Maresi, A., Kaitilia, R., Kiffner, C. 2019. Relative abundance and activity patterns explain method-related differences in mammalian species richness estimates. J. mammal. 100(1): 192–201. doi.org/10.1093/jmammal/gyy175

Zaragozí, B., Beldac, A., Giméneza, P., Navarroa, J.T., Bonet, A. 2015. Advances in camera-trap data management tools: Towards collaborative development and integration with GIS. Ecol. Inform. 30: 6–15. doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.08.00

ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพกับการปรากฏปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาแหลม จังหวัดกาญจนบุรี

Spatial correlation between SMART patrol system indicators and threat occurrences in Khao Laem National Park, Kanchanaburi Province

พัทธ์ธีรา แก้วเกตุกาญจน์, วรงค์ สุขเสวต, ประทีป ด้วงแค*

Phattheera Keawketkarn, Warong Suksavate, Prateep Duengkae*

คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: prateep.du@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างตัวชี้วัดระบบการลาดตระเวนเชิงคุณภาพกับการปรากฏปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาแหลม จังหวัดกาญจนบุรี โดยใช้ข้อมูลการลาดตระเวนเชิงคุณภาพจากฐานข้อมูลโปรแกรม SMART แบบกริด ขนาด 1×1 กิโลเมตร รายเดือน ระหว่างปี พ.ศ. 2562–2564 (36 เดือน) โดยวิเคราะห์ข้อมูลตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ จำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ ระยะเวลา ระยะทาง ความถี่ และจำนวนวันในการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ และข้อมูลการปรากฏปัจจัยคุกคาม จำนวน 3 ประเภท ได้แก่ การล่าสัตว์ป่า การลักลอบตัดไม้ และการบุกรุกแผ้วถางป่า ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ลาดตระเวนเชิงคุณภาพครอบคลุมพื้นที่ 1,676 กริด มีค่าเฉลี่ยต่อกริดของตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ (Mean±SE) ดังนี้ จำนวนวัน 16.49±0.51 วัน ระยะเวลา 15.72±0.66 ชั่วโมง ระยะทาง 18.62±0.60 กิโลเมตร ความถี่ 12.89±0.38 ครั้ง และการปรากฏปัจจัยคุกคาม การล่าสัตว์ป่า จำนวน 0.14±0.01 ครั้ง การลักลอบตัดไม้ จำนวน 0.05±0.01 ครั้ง และการบุกรุกแผ้วถางป่า 0.01±0.003 ครั้ง เมื่อศึกษาความสัมพันธ์พบว่า ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปรากฏปัจจัยคุกคามอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$)

คำสำคัญ: ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่, ตัวชี้วัด, ปัจจัยคุกคาม, ระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ

Abstract

The research investigates the correlation between patrol indicators and threat occurrences in Khao Laem National Park, Kanchanaburi province. Analyze SMART patrol data from the SMART program database (Mean+SE) (grid type with 1×1 kilometer) monthly during 2019–2021 (36 months), using the form patrol of foot and ambush, studying SMART patrol system indicators 4 factors, namely patrol duration (days and hours), patrol distance (kilometers), and patrol frequency. Threat occurrences 3 factors: wildlife poaching, illegal logging, and forest encroachment. The result showed patrol area covered 1,676 square kilometers (1,676 grids). Average patrol indicators consist of accumulated days, hours, distance and patrol frequency were 26.09±0.77 days/grid, 20.55±0.839 hours/grid, 28.63±0.892 kilometers/grid and 20.20±0.579 times/grid, respectively. The average threat occurrences of wildlife poaching, illegal logging and forest encroachment were 0.21±0.015, 0.07±0.009 for, and 0.01±0.003 times/grid, respectively. Correlation between SMART patrol system indicators and threat occurrences were significantly and positively correlated ($p < 0.01$).

Keywords: Indicators, SMART patrol system, Spatial correlation, Threat occurrences

คำนำ

อุทยานแห่งชาติเขาแหลม มีพื้นที่ครอบคลุมอำเภอสังขละบุรีและอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี โดยมีสภาพป่าที่สมบูรณ์รอบเขื่อนวชิราลงกรณ (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2555) เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าและมีอาณาเขตติดต่อแหล่งมรดกโลกทางธรรมชาติ คือ ห้วยขาแข้ง-ทุ่งใหญ่นเรศวร และอยู่ในผืนป่าตะวันตก ซึ่งเป็นแหล่งคุ้มครองและอาศัยของสัตว์ป่าที่สำคัญ การจัดการประชากรและชนิดพันธุ์ของสัตว์ป่าและคุ้มครองรักษาพื้นที่จึงเป็นภารกิจสำคัญ ซึ่งระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ (SMART patrol system) ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการปกปักษ์รักษาทรัพยากรป่าไม้และสัตว์ป่า ผ่านการจัดเก็บข้อมูล การสืบค้น การวิเคราะห์ และการรายงานผลการลาดตระเวนอย่างเป็นระบบ เพื่อความสะดวกในการนำข้อมูลลาดตระเวนมาใช้ประกอบการบริหารจัดการพื้นที่อนุรักษ์ (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2560) ซึ่งมุ่งเน้นงานป้องกันคุ้มครองพื้นที่อนุรักษ์ เพื่อรักษาทรัพยากรป่าไม้และสัตว์ป่า ที่ปัจจุบันเหลือน้อยลง โดยการคุ้มครองพื้นที่จากระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพของอุทยานแห่งชาติเขาแหลม จังหวัดกาญจนบุรีประกอบกับข้อมูลจากงานวิจัยสามารถพิสูจน์ได้ว่าประชากรของเสือโคร่งมีจำนวนมากขึ้น (มูลนิธิฟรีแลนด์, 2565) โดยมีการอพยพเคลื่อนย้ายลงมาจากพื้นที่ป่าอนุรักษ์ใกล้เคียงและตั้งถิ่นฐานอาศัยอยู่ในอุทยานแห่งชาติเขาแหลมอย่างถาวร รวมถึงมีการรายงานการพบข้อมูลสัตว์ป่าหายากและใกล้สูญพันธ์อื่น ๆ แต่ในขณะเดียวกันยังพบการกระทำผิดกฎหมายในพื้นที่ด้วย โดยอุทยานแห่งชาติเขาแหลม ได้นำระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพมาใช้ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559 จนถึงปัจจุบัน

เนื่องจากยังขาดการวิเคราะห์ข้อมูลระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพในเชิงลึกเพื่อการวางแผนจัดการมาก่อน ดังนั้นเพื่อให้มีการพัฒนาระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพของอุทยานแห่งชาติเขาแหลมอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างตัวชี้วัดระบบการลาดตระเวนเชิงคุณภาพกับการปรากฏปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาแหลม เพื่อนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาปรับใช้ในการวางแผนการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ เกิดการพัฒนาระบบ ลดความเสี่ยงการเกิดปัจจัยคุกคาม อันเป็นการวางแผนในการบริหารจัดการพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาแหลมต่อไป โดยอาศัยข้อมูลทางวิชาการมาสนับสนุน

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

อุทยานแห่งชาติเขาแหลม มีเนื้อที่ประมาณ 1,479 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 924,358 ไร่ อยู่ในกลุ่มป่าตะวันตก มีพื้นที่ครอบคลุมอำเภอสังขละบุรี และอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งของแนวเทือกเขาตะนาวศรี มีความสูงประมาณ 100–1,800 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ยอดเขาสูงสุด คือ สันหนอกวัว มีความสูง 1,767 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง อุทยานแห่งชาติเขาแหลม มีสังคมพืชหลากหลาย เช่น ป่าเบญจพรรณ ป่าเต็งรัง ป่าดิบแล้ง เป็นต้น และมีทรัพยากรสัตว์ป่าที่สำคัญ เช่น เสือโคร่ง ช้างป่า เก้ง นกเงือกสีน้ำตาล เป็นต้น บริเวณตอนกลางของอุทยานแห่งชาติเป็นพื้นน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ โดยอำนวยประโยชน์หลักด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าและอำนวยประโยชน์ในด้านการชลประทาน และด้านการประมง พื้นที่น้ำเหนือเขื่อนกว่า 388 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 25.92 ของพื้นที่อุทยานแห่งชาติ

อุทยานแห่งชาติเขาแหลม มีเส้นทางศึกษาธรรมชาติระยะไกล (6–9 กิโลเมตร) ได้แก่ เส้นทางศึกษาธรรมชาติสันหนอกวัว และน้ำตกผาแตก และมีแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญทั่วทั้งพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ได้แก่ น้ำตกกระเต็งเจ็ง น้ำตกเกริงก

ระเวีย น้ำตกไดช่องถ่อง จุดชมวิวป้อมปี่ จุดชมวิววังปะโท่ บึงเกริงกระเวีย สะพานมอญ (สะพานอุตตมานุสรณ์) และเจดีย์โบอ่อง เป็นต้น

อุทยานแห่งชาติเขาแหลม มีหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ จำนวน 11 หน่วย และมีชุดลาดตระเวน จำนวน 9 ชุด ชุดละ 5–7 คน รวมเจ้าหน้าที่ลาดตระเวนประมาณ 53 คน (หรือมากกว่าตามภารกิจ)

วิธีการ

ศึกษาตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ เพื่อประเมินความครอบคลุมและความเข้มข้นของการเดินลาดตระเวนทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2565) จำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนวัน ระยะเวลา ระยะทาง และความถี่หรือจำนวนครั้งในการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ และศึกษาการปรากฏปัจจัยคุกคามจำนวน 3 ประเภท ได้แก่ การล่าสัตว์ป่า การลักลอบตัดไม้ และการบุกรุกแผ้วถางป่า เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน (Spearman’s rank correlation coefficient) ระหว่างตัวชี้วัดและการปรากฏปัจจัยคุกคาม โดยกำหนดพื้นที่ศึกษาให้อยู่ในรูปแบบกริดขนาด 1×1 กิโลเมตร หรือ 1 ตารางกิโลเมตร มีขนาดเท่ากับเกณฑ์การประเมินผลการลาดตระเวนเชิงคุณภาพของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช และทำการสืบค้นข้อมูลจากโปรแกรมฐานข้อมูล SMART ในระหว่างปี พ.ศ. 2562–2564 ระยะเวลา 3 ปี (36 เดือน)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การศึกษาตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพและการปรากฏปัจจัยคุกคาม ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาแหลม รวมพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 1,676 ตารางกิโลเมตรหรือ 1,676 กริด ปัจจัยคุกคามที่ตรวจพบ รวมจำนวน 341 ครั้ง โดยปัจจัยคุกคามที่ตรวจพบสูงที่สุด คือ การล่าสัตว์ป่า จำนวน 239 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 70.09 รองลงมา คือ การลักลอบตัดไม้ และการบุกรุกแผ้วถางป่า จำนวน 86 และ 16 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 25.22 และ 4.69 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย (Mean±SE) รายกริด ของตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ จำนวนวัน 16.49±0.51 วัน ระยะเวลา 15.72±0.66 ชั่วโมง ระยะทาง 18.62±0.60 กิโลเมตร ความถี่หรือจำนวนครั้ง 12.89±0.38 ครั้ง และการปรากฏปัจจัยคุกคาม การล่าสัตว์ป่า จำนวน 0.14±0.01 ครั้ง การลักลอบตัดไม้ จำนวน 0.05±0.01 ครั้ง และการบุกรุกแผ้วถางป่า 0.01±0.003 ครั้ง (Table 1)

Table 1 SMART patrol system indicators and threat occurrences

Factors	Total	Mean±SE (per gird in 36 months)	Mean±SE (per month all grids)
1. SMART Patrol System Indicators			
1.1 Duration (days)	27,643	16.49±0.51	767.86±21.17
1.2 Duration (hours)	26,344.85	15.72±0.66	731.80±3.37
1.3 Distance (kilometers)	31,210.20	18.62±0.60	866.95±4.85
1.4 Frequency	21,598	12.89±0.38	599±3.05
2. Threat Occurrences			
2.1 Wildlife Poaching	239	0.14±0.01	6.64±0.09
2.2 Illegal Logging	86	0.05±0.01	2.39±0.04
2.3 Forest Encroachment	16	0.01±0.003	0.44±0.02

2. ข้อมูลเชิงพื้นที่รายกริด ระหว่างปี พ.ศ. 2562–2564 ดังนี้

2.1 ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ พบว่า จำนวนวันที่ใช้ในการลาดตระเวน สูงสุด 163 วันต่อกริด ระยะเวลาในการลาดตระเวน สูงสุด 296.06 ชั่วโมงต่อกริด ระยะทางในการลาดตระเวน สูงสุด 199.33 กิโลเมตรต่อกริด ความถี่ในการลาดตระเวน สูงสุด 129 ครั้งต่อกริด (Fig. 1)

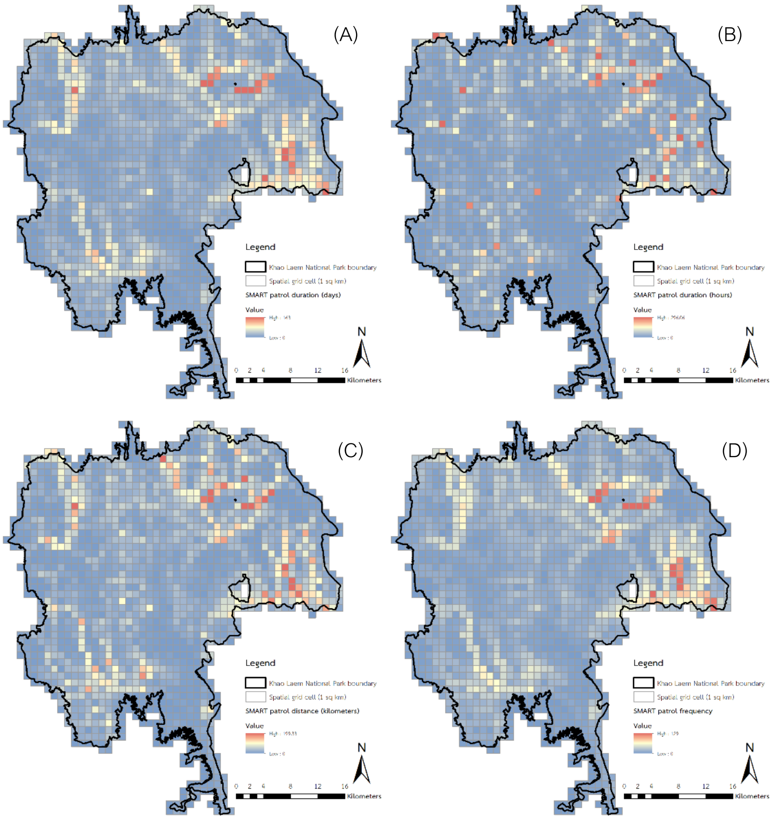


Fig. 1 SMART patrol system indicators during 2019–2021: (A) duration (days); (B) duration (hours); (C) distance (kilometers); and (D) frequency

2.2 การปรากฏปัจจัยคุกคาม พบว่า การล่าสัตว์ป่า สูงสุด 5 ครั้งต่อกริด การลักลอบตัดไม้ สูงสุด 5 ครั้งต่อกริด การบุกรุกแผ้วถางป่า สูงสุด 2 ครั้งต่อกริด (Fig. 2)

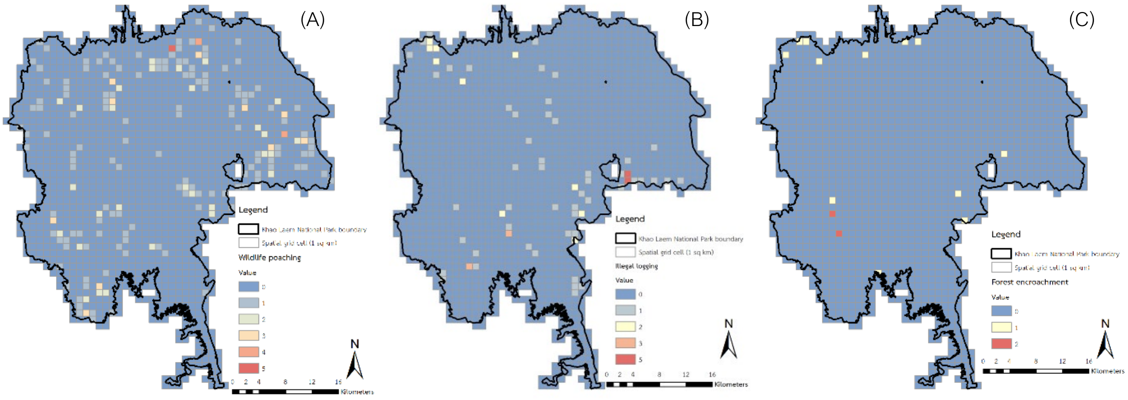


Fig. 2 Threat Occurrences during 2019–2021: (A) wildlife poaching; (B) illegal logging; and (C) forest encroachment

3. เมื่อศึกษาตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ และการปรากฏปัจจัยคุกคามรายกริด โดยสรุปรายปี ดังนี้

3.1 ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ พบว่า จำนวนวัน มากที่สุดในปี พ.ศ. 2562 จำนวน 9,535 วัน และมีแนวโน้มลดลง ระยะเวลาในการลาดตระเวน มากที่สุดในปี พ.ศ. 2564 จำนวน 10,220.05 ชั่วโมง ระยะทางในการลาดตระเวน พบมากที่สุดในปี พ.ศ. 2563 จำนวน 11,347.83 กิโลเมตร และความถี่ในการลาดตระเวน มากที่สุดในปี พ.ศ. 2562 จำนวน 7,696 ครั้ง และมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีการเปลี่ยนรูปแบบการลาดตระเวนให้ครอบคลุม โดยเฉพาะพื้นที่เขาสูงชัน หรือป่าลึก ในการลาดตระเวนแต่ละครั้ง จึงต้องใช้ระยะเวลาที่มากขึ้นจากเดิม เพื่อให้ลาดตระเวนครอบคลุมทั้งพื้นที่มากขึ้น

3.2 การปรากฏปัจจัยคุกคาม พบว่า การล่าสัตว์ป่า มากที่สุดในปี พ.ศ. 2562 จำนวน 98 ครั้ง และมีแนวโน้มลดลง การลักลอบตัดไม้ พบมากที่สุดในปี พ.ศ. 2563 จำนวน 37 ครั้ง และการบุกรุกแผ้วถางป่า พบมากที่สุด ในปี พ.ศ. 2563 จำนวน 7 ครั้ง (Fig. 3)

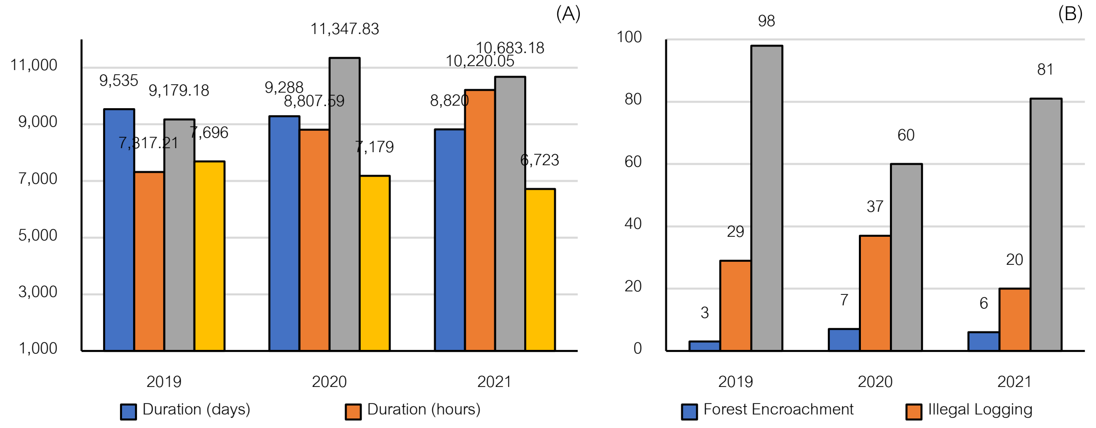


Fig. 3 SMART patrol system data (1 km^2 grid cell) during 2019–2021 in Khao Laem National Park: (A) SMART patrol system indicators; and (B) threat occurrence

4. การนำตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ จำนวน 4 ปัจจัย ไปทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) กับข้อมูลการปรากฏปัจจัยคุกคาม จำนวน 3 ประเภท ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2562–2564 ทั้งหมด 36 เดือน แบบรายเดือน รายกริด พบว่า ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปัจจัยคุกคาม จำนวน 3 ประเภท ได้แก่ การบุกรุกแผ้วถางป่า การลักลอบตัดไม้ และการล่าสัตว์ป่า โดยพบว่ามีค่าสหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) (Table 2)

Table 2 Correlation between SMART patrol system indicators and threat occurrence during 2019–2021

n = 60,336

SMART Patrol System Indicators	Threat Occurrences		
	Forest Encroachment	Illegal Logging	Wildlife Poaching
Duration (days)	0.028**	0.063**	0.107**
Duration (hours)	0.028**	0.068**	0.120**
Distance (kilometers)	0.028**	0.066**	0.112**
Frequency	0.029**	0.063**	0.101**

** = $p < 0.01$.

5. เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพและปัจจัยคุกคาม ในแต่ละปี ดังนี้

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพในปี พ.ศ. 2564 และปัจจัยคุกคาม พ.ศ. 2564 พบว่า ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปัจจัยคุกคาม ทั้ง 3 ประเภท โดยพบว่ามีค่าสหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$ และ $p < 0.01$) (Table 3)

Table 3 Correlation between SMART patrol system indicators and threat occurrence during 2021

n = 20,112

SMART Patrol System Indicators (2021)	Threat Occurrences (2021)		
	Forest Encroachment	Illegal Logging	Wildlife Poaching
Duration (days)	0.033**	0.055**	0.111**
Duration (hours)	0.030**	0.060**	0.123**
Distance (kilometers)	0.031**	0.058**	0.116**
Frequency	0.034**	0.057**	0.106**

* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$.

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพในปี พ.ศ. 2563 และปัจจัยคุกคาม พ.ศ. 2564 พบว่า ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปัจจัยคุกคามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$ และ $p < 0.01$) จำนวน 2 ประเภท ได้แก่ การบุกรุกแผ้วถางป่า และการล่าสัตว์ป่า (Table 4)

Table 4 Correlation between SMART patrol system indicators (2020) and threat occurrence (2021)

n = 20,112

SMART Patrol System Indicators (2020)	Threat Occurrences (2021)		
	Forest Encroachment	Illegal Logging	Wildlife Poaching
Duration (days)	0.018*	0.004	0.026**
Duration (hours)	0.020**	0.006	0.030**
Distance (kilometers)	0.021**	0.005	0.027**
Frequency	0.020**	0.005	0.025**

* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$.

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพในปี พ.ศ. 2562 และปัจจัยคุกคาม พ.ศ. 2564 พบว่า ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ มีความสัมพันธ์ไม่ชัดเจนกับปัจจัยคุกคาม โดยพบว่า มีค่าสหสัมพันธ์เชิงบวกกับปัจจัยคุกคามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$ และ $p < 0.01$) จำนวน 2 ประเภท ได้แก่ การลักลอบตัดไม้และการล่าสัตว์ป่า และตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปัจจัยคุกคามอย่างไม่มีมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จำนวน 1 ประเภท คือ การบุกรุกแผ้วถางป่า (Table 5)

Table 5 Correlation between SMART patrol system indicators (2019) and threat occurrence (2021)

n = 20,112

SMART Patrol System Indicators (2019)	Threat Occurrences (2021)		
	Forest Encroachment	Illegal Logging	Wildlife Poaching
Duration (days)	-0.003	0.029**	0.017*
Duration (hours)	-0.003	0.031**	0.022**
Distance (kilometers)	-0.004	0.028**	0.018*
Frequency	-0.003	0.030**	0.015*

* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$.

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพและปัจจัยคุกคาม แบบรายกริด รายเดือน ระหว่างปี พ.ศ. 2562–2564 มีค่าความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ซึ่งบริเวณที่มีการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ โดยใช้ระยะทาง ระยะเวลา และมีความถี่ในการลาดตระเวนมากขึ้น จะส่งผลให้ตรวจพบปัจจัยคุกคามมากยิ่งขึ้น โดยไม่สอดคล้องกับการศึกษาของสมโภชน์ (2560) ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการลาดตระเวน รายเดือน จำนวน 7 ปัจจัย ได้แก่ ระยะทาง การครอบคลุมพื้นที่ ร้อยละพื้นที่ลาดตระเวน จำนวนเจ้าหน้าที่ลาดตระเวน ระยะทางเฉลี่ยต่อคน ความถี่ในลาดตระเวน และจำนวนวันลาดตระเวน มีความสัมพันธ์เชิงลบกับการทำไม้ ซึ่งหากเพิ่มความเข้มข้นในการลาดตระเวนทั้ง 7 ปัจจัย จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการคุ้มครองป้องกันเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้งโดยลดการทำไม้ผิดกฎหมายที่เป็นผลกระทบโดยตรงต่อแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าได้เป็นอย่างดียิ่งขึ้น แต่เนื่องจากการศึกษาของอุทยานแห่งชาติเขาแหลมเป็นแบบรายกริด ซึ่งต่างจากการศึกษาของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้งที่ศึกษาในหนึ่งหน่วยพื้นที่ และจากการลาดตระเวนเชิงคุณภาพในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาแหลม ได้นำระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพมาใช้ในการป้องกันพื้นที่ ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559 โดยถือว่าเป็นกระบวนการใหม่ ซึ่งเจ้าหน้าที่ลาดตระเวน ต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการลาดตระเวนให้เหมาะสมกับพื้นที่ รวมถึงการปราบปรามการกระทำผิดมากขึ้น ซึ่งในระยะแรกของการนำระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพมาใช้ในพื้นที่ ทำให้มีบันทึกข้อมูลการปรากฏปัจจัยคุกคามต่าง ๆ และเมื่อเจ้าหน้าที่ลาดตระเวนสามารถป้องกันและปราบปรามการกระทำผิดที่ตรวจพบ รวมถึงมีความชำนาญในการลาดตระเวน โดยลาดตระเวนให้ครอบคลุมพื้นที่ในทุกปี จะส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกระทำผิดกฎหมายป่าไม้และสัตว์ป่าได้ การปรากฏของปัจจัยคุกคามในพื้นที่จะลดลง ซึ่งบริเวณพื้นที่ที่เกิดปัจจัยคุกคามนั้น ต้องมีการศึกษาถึงปัจจัยแวดล้อม และทรัพยากรป่าไม้และสัตว์ป่ามากขึ้น ในลักษณะเดียวกับงานวิจัยของ Kuiper et al (2020) ทำการศึกษาการลักลอบล่าช้างป่าแอฟริกา ในพื้นที่ Chewore Safari ประเทศซิมบับเว มีระบบการคุ้มครองพื้นที่โดยใช้ระบบการลาดตระเวน เพื่อป้องกันการลักลอบล่าช้าง หรือ ไมค์ (MIKE) โดยมีการลักลอบล่าช้างป่า 201 ครั้ง ซึ่งพบว่าช้างป่ามักอาศัยอยู่ใกล้แหล่งน้ำ และพบการลักลอบล่าช้างป่าบ่อยครั้งในบริเวณใกล้แหล่งน้ำเช่นกัน นอกจากนี้ วัฒนะ และคณะ (2565) ได้ทำการศึกษาปัจจัยของพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์ต่อความเสี่ยงในการลักลอบเข้ามากระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้ ในเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มากที่สุด ได้แก่ ความสูงจากระดับน้ำทะเล ซึ่งหากพื้นที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลต่ำมีโอกาสพบการกระทำผิดมากกว่าพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูง ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม หากมีระยะห่างจากเส้นทางคมนาคมมากขึ้น ทำให้มีโอกาสพบการกระทำผิดมากขึ้น และระยะห่างจากโป่ง หากมีระยะห่างจากโป่งน้อย มีโอกาสพบการกระทำผิดที่มากขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของป่าเหนือ และคณะ (2565) ที่ได้ทำการศึกษาปัจจัยคุกคามและปัจจัยแวดล้อมด้านกายภาพ ของอุทยานแห่งชาติทับลาน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามมากที่สุด ได้แก่ ระยะห่างจากหมู่บ้าน ระยะห่างจากถนน และความลาดชัน

สรุป

1. การลาดตระเวนเชิงคุณภาพในระหว่างปี พ.ศ. 2562–2564 พบปัจจัยคุกคาม รวม 341 ครั้ง ปัจจัยคุกคามที่ตรวจพบสูงที่สุด คือ การล่าสัตว์ป่า คิดเป็นร้อยละ 70.09 รองลงมา คือ การลักลอบตัดไม้ และการบุกรุกแผ้วถางป่า คิดเป็นร้อยละ 25.22 และ 4.69 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยรายกริดของตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ ระยะเวลา 15.72±0.66 ชั่วโมง ระยะทาง 18.62±0.60 กิโลเมตร และการปรากฏปัจจัยคุกคาม การล่าสัตว์ป่า จำนวน 0.14±0.01 ครั้ง การลักลอบตัดไม้ จำนวน 0.05±0.01 ครั้ง และการบุกรุกแผ้วถางป่า 0.01±0.003 ครั้ง

2. ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ 4 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนวัน ระยะเวลา ระยะทาง และความถี่ในการลาดตระเวน มีความสัมพันธ์กับการปรากฏปัจจัยคุกคาม 3 ประเภท ได้แก่ การล่าสัตว์ป่า การลักลอบตัดไม้ และการบุกรุกแผ้วถางป่า ดังนั้น เมื่อมีการลาดตระเวนเชิงคุณภาพมากขึ้น โดยการใช้ระยะเวลาและระยะทางมากขึ้น ในแต่ละกริด ทำให้ตรวจพบปัจจัยคุกคามมากขึ้น ซึ่งการลาดตระเวนเชิงคุณภาพหากให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการตรวจสอบพื้นที่และบันทึกข้อมูลในการลาดตระเวนอย่างละเอียด สามารถควบคุมและลดการเกิดปัจจัยคุกคามลงได้ในที่สุด

3. ตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ ปี พ.ศ. 2564 มีความสัมพันธ์กับการปรากฏปัจจัยคุกคาม พ.ศ. 2564 ซึ่งตัวชี้วัดระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพส่งผลโดยตรงกับการตรวจพบปัจจัยคุกคามในปีนั้น ๆ ดังนั้นการลาดตระเวนที่ครอบคลุมพื้นที่ในปีทุก ๆ ปี และมีการปรับเปลี่ยนแผนการลาดตระเวนให้เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน จะสามารถควบคุมปัจจัยคุกคามในปีนั้นให้ลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2555. 50 ปี อุทยานแห่งชาติไทย. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2560. เทคนิคการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ เพื่อจัดการพื้นที่อนุรักษ์. โครงการปฏิรูประบบลาดตระเวนพื้นที่อนุรักษ์ตามมาตรฐานระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2565. ระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพในพื้นที่ป่าอนุรักษ์: แนวทางการวิเคราะห์ผลการลาดตระเวนเชิงคุณภาพในพื้นที่ป่าอนุรักษ์. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

ป่าเหนือ ชีวธรรม, วรงค์ สุขเสวต, ปานวริศร์ ปานศรี, อิงอร ไชยเยศ, ประทีป ด้วงแค. 2565. การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการปรากฏปัจจัยคุกคาม บริเวณอุทยานแห่งชาติทับลาน. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60. 21–23 กุมภาพันธ์ 2565, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 604–611.

มูลนิธิฟรีแลนด์. 2565. รายงานความก้าวหน้า โครงการอนุรักษ์เสือเขาแหลม การประเมินประชากรเสือโคร่งและเหยื่อในอุทยานแห่งชาติเขาแหลม ในผืนป่าตะวันตกตอนใต้ของประเทศไทย (WEFCOM), กรุงเทพฯ.

วัฒนะ โรจนเกษตร, วรงค์ สุขเสวต, ปานวริศร์ ปานศรี, อิงอร ไชยเยศ, ประทีป ด้วงแค. 2565. การประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ของปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60. 21–23 กุมภาพันธ์ 2565, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 612–617.

สมโภชน์ มณีรัตน์. 2560. ระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพต่อประสิทธิภาพการคุ้มครองเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี และตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Kuiper, T., Kavhu, B., Ngwenya, N.A., Mandisodza-Chikerema, R., Milner-Gulland, E.J. 2020. Rangers and modellers collaborate to build and evaluate spatial models of African elephant poaching. Biol. Conserv. 243: 108486. doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108486

Particulate matter from residential and roadside areas in Bangkok, Thailand: Carbon composition and their sources

Thanaphum Manjantrarat[a], Rattaporn Saenmuangchin[b], Mushtaq Ahmad[a,c], Wachiraya Rattanawongsa[b], Wiyong Kangwansupamonkon[b], Thunyapat Thongyen[d], Prapat Pongkiatkul[e], Sirima Panyametheekul[a,*]

[a]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

[b]National Nanotechnology Center, National Science, and Technology Development Agency, Pathum Thani 12120, Thailand

[c]State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

[d]Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[e]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Sirima.P@chula.ac.th

Abstract

Daily samples of aerosol particles of various sizes are collected during high and low seasons at Din Daeng and Ari, in the metropolitan area of Bangkok, Thailand. Din Daeng has slightly higher concentration of various size fractions of particulate matter (PM) and their carbonaceous species in both the high and low seasons than Ari. There is a significant correlation between the organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) of PM0.1, PM >10, and PM0.5–1.0, (high season), and PM >10 and PM2.5–10 (low season) at Ari, whereas, PM >10, PM2.5–10, PM0.1 (high season), and PM >10, PM0.1 (low season) at Din Daeng. In both seasons, the mean OC/EC and EC/TC ratios were reported in the range of 0.2–4.2 and 0.1–0.3 at Ari and Din Daeng. The most abundant carbon fractions at both sampling sites are OC2, OC3, OC4, EC1, and EC2, indicating that coal combustion, road dust, and vehicle emissions are the major sources of emissions. At Ari and Din Daeng, SOC contributes more to OC than POC in PM0.5–1.0 and PM1.0–2.5 during the high and low seasons. In general, local primary emissions from industry, transportation, and cooking are the major sources of PM pollution in Bangkok, Thailand.

Keywords: Particulate matter (PM), Organic carbon (OC), Elemental carbon (EC), Residential area, Traffic area

Introduction

The air quality in Asia has recently worsened due to urbanization. Earth's radiation budget, visibility, air quality, and atmospheric chemistry are all significantly impacted by atmospheric aerosols (Ram et al., 2012). Carbonaceous species are the major components of atmospheric PM, due to its detrimental effects on human health, haze, the hydrological cycle, and climate change, has recently drawn significant attention (Banoo et al., 2020). Human health, visibility, and the global climate are all directly impacted by the chemical components of PM. In urban areas, the carbonaceous aerosol comprises organic carbon (OC) and elemental carbon (EC), which account for 20%–60% of the mass of the PM. The sources of PM can also be identified using the OC/EC and the char–EC/soot–EC ratios (Phairuang et al., 2019). Han et al. (2010; 2016) have extensively investigated the ratio of char-EC/soot-EC for source identification at different locations in China. However, most of the previous studies conducted over the Indian region have found the utility of OC/EC ratio to characterize the contribution of OC from its predominant source of emission (Ram and Sarin, 2010; Pachauri et al., 2013; Rajput and Sarin, 2014; Rajput, 2018; Singh et al., 2018). The average ratio of Char-EC to Soot-EC in $PM_{2.5}$ was 1.70, indicating that motor vehicle emission were the possible sources of $PM_{2.5}$ in Bangkok, Thailand (Duangkaew et al., 2013). The incomplete combustion of carbon-containing materials such as coal, diesel, gasoline, and biomass emit EC into the atmosphere. Combustion processes like biomass burning, fossil fuel combustion, cooking, and vehicle exhaust can release OC as primary organic carbon (POC) (Yang et al., 2005). Based on the different ranges of the OC/EC ratio, biomass burning had an OC/EC ratio of 3.8–13.2, diesel and gasoline vehicle exhaust emissions had an OC/EC ratio of 1.0–4.0, coal combustion had an OC/EC ratio of 2.5–10.5, secondary organic aerosol had an OC/EC ratio greater than 2.0 (Zhang et al., 2020). Alternately, it can be formed as secondary organic carbon (SOC) through gas-to-particle conversion process or atmospheric oxidation of precursor gases through various physical, chemical, and biological processes (Dan et al., 2004).

Particulate matter (PM) is categorized in three modes i.e. ultrafine (aerodynamic diameter below 0.1 μm), fine (aerodynamic diameter ≤ 2.5 μm), and coarse (aerodynamic diameter between 2.5 and 10 μm). The fine particles (PM2.5) and ultrafine particles as small as PM0.1 have caused severe air pollution for a long time in Bangkok, Thailand. Due to the limited number of studies on PM and its composition, it is important to understand the sources, effects, and levels of air pollution in Bangkok (Phairuang et al., 2019). Vehicle exhaust and biomass burning are the two major sources of air pollution in Bangkok (Phairuang et al., 2019; Panyametheekul et al., 2022).

The current study has been carried out to identify the effect of residential biomass burning for cooking and other purposes at Ari and vehicular emissions at Din Daeng on the carbon composition of PM. The carbon compistion of PM play a vital role in the heating and cooling processes of atmosphere. This study aims to examine the carbonaceous species in various size fractions of PM in urban areas of Bangkok, Thailand. The PM samples were collected in Bangkok at two locations, namely Ari and Din Daeng. The contributions of POC and SOC to OC and the relationship between OC, EC, and TC were identified. The Ari (13°46'59.6"N 100°32'25.8"E) station is in the Pollution Control Department's territory. This sampling site represents the residential area because several condominiums and dormitories surrounded it. The Din Daeng (13°45'45.2"N

100°33'01.1"E) station is located opposite to the Ministry of Labor and about 10 meters from Din Daeng Road. This station represents the roadside and the impacts of traffic emissions on the roadside environment. The current study's findings will help in the identification of the sources of pollution in Bangkok's residential and roadside areas.

Methods and Methodology

Sampling

The samples of various size fractions of PM were collected from Ari and Din Daeng. Samples of the various size fractions of PM were collected using a Nanosampler. $PM_{>10}$, $PM_{2.5–10}$, $PM_{1.0–2.5}$, $PM_{0.5–1.0}$, and $PM_{0.1}$ were the five inertial filter impactor stages of the Nanosampler. The Nanosampler's air inlet was calibrated to flow at a rate of 40 L/min (Furuuchi et al., 2010). Each sample was collected for 24 hours. A Nanosampler was installed 5 meters above the ground level and the PM samples were collected using quartz fiber filters with pore sizes of 0.45 μm (Pall, 2500 QAT-UP, diameter 55 mm). 18 samples were collected at each sampling location, 12 during the high season represent winter season (Jan-March, 2022) and 6 during the low season represent summer season (Apr-June, 2022). At 450 °C, the filters were baked in a furnace to burn the organics. The filters were weighed before and after sampling using an analytical balance and kept for 24 hours at a temperature of 25 °C and relative humidity of 50%. The filters were then stored for further analysis.

Carbon Analysis

A DRI THERMAL OPTICAL Carbon Analyzer was used to measure the organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) using the thermal/optical reflectance (TOR) protocol. Before being placed into a carbon analyzer for analysis, a punch of 1.5 cm^2 of the filter was heated in an entirely oxygen-free He atmosphere. At four different temperatures, 120 °C (OC1), 250 °C (OC2), 450 °C (OC3), and 550 °C (OC4), all the organic carbon on the filter was released. The He pure eluent was replaced with a 2% O_2/He mixture, and the concentration of EC was estimated at 550 °C (EC1), 700 °C (EC2), and 800 °C (EC3). The optical pyrolyzed carbon (OP) was monitored using a laser. OC1+OC2+OC3+OC4+OP produced OC, whereas EC1+EC2+EC3-OP produced EC.

POC and SOC estimation

According to Castro et al. (1999), the EC-tracer method with a minimum OC/EC ratio was used to estimate the SOC concentration in the ambient aerosol. The following equations were used to calculate the POC and SOC concentrations (Equation 1–2):

$$POC = EC \times (OC/EC)_{min} \quad (1)$$

$$SOC = OC - POC \quad (2)$$

where, OC denotes the measured OC concentration, and $(OC/EC)_{min}$ represents the minimum OC/EC ratio.

Results and Discussion

Characteristics of size segregated PM

Table 1 shows the average concentration of various size fractions of PM at both Ari and Din Daeng. The concentration of $PM_{2.5–10}$ is higher at Ari and Din Daeng during high and low seasons. The concentration of the various size fractions of PM at Ari and Din Daeng is in descending order: $PM_{2.5–10}$ > $P_{M0.5–1.0}$ > $PM_{>10}$ > $PM_{1.0–2.5}$ > $PM_{0.1}$. The mass concentration of various size fractions of PM in Din Daeng was higher than in Ari, as shown in Table 1. The concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} reported in a study at the three urban locations in Bangkok (Ari, Dindaeng, and Bangna) was slightly higher than in the current study (Ahmad et al., 2022). In the wet and dry seasons at Rangsit, the average $PM_{0.1}$ concentration was slightly lower than the high season of the current study (Boongla et al., 2020). Wood, coal, and other fossil fuels are commonly used for heating and cooking purposes in the winter. In a previous study, it was reported that the local sources of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Bangkok, Thailand were primary combustion sources, such as coal combustion, biomass burning, vehicle emissions, industrial emissions, dust sources, and secondary aerosol formation (Ahmad et al., 2022).

Table 1 The average and range of various size fractions of PM (μg/m^3) and the correlation coefficient (R) of OC and EC at Ari and Din Daeng in high and low pollution season

		Ari			Din Daeng		
		Mean±Stdv	Range	R	Mean±Stdv	Range	R
High	$PM_{0.1}$	14.9±4.2	9.2–24.4	0.41*	17.1±4.7	9.2–23.8	0.57**
	$PM_{0.5–1.0}$	27.0±6.1	18.8–41.4	0.49**	30.2±6.4	18.1–41.1	0.02
	$PM_{1.0–2.5}$	18.1±3.8	8.6–22.6	0.32	21.7±3.8	13.8–28.0	0.05
	$PM_{2.5–10}$	28.4±4.6	20.7–35.1	0.10	35.0±4.9	28.8–47.0	0.79**
	$PM_{>10}$	19.4±3.4	14.5–24.2	0.87**	24.1±5.6	10.8–33.5	0.96**
Low	$PM_{0.1}$	2.7±1.6	1.2–5.8	0.25	3.5±0.8	2.1–4.3	0.49**
	$PM_{0.5–1.0}$	6.5±4.3	3.1–14.3	0.09	12.0±5.4	7.8–21.4	0.01
	$PM_{1.0–2.5}$	5.3±2.6	3.2–10.1	0.14	8.4±4.1	4.3–16.4	0.29
	$PM_{2.5–10}$	10.1±3.8	7.6–17.4	0.38*	14.4±3.8	12.1–22.2	0.02
	$PM_{>10}$	5.2±2.4	3.5–10.0	0.89**	9.4±3.3	6.6–15.9	0.83**

Level of significance: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

The traditional minimum OC/EC ratio method was used to estimate the secondary organic aerosol (SOA) (Castro et al., 1999); $SOA = (OC – EC × (OC/EC)_{min}) × 1.6$. The formula $POA = OC × 1.6 – SOA$ was used to determine the primary organic aerosol (POA). Semi-volatile and intermediate VOCs are responsible for SOA formation in urban environments (Robinson et al., 2007). In all size fractions of PM at Ari and Din Daeng, the POA contribution to OA is predominant, except for $PM_{0.5–1.0}$, where the SOA contribution was reported to be

higher than the POA. The mean concentration of POA and SOA in various sized fractions of PM in high and low pollution season is shown in Table 2.

PM Variation of carbonaceous species

As shown in Fig. 1, the OC, EC, SOC, and POC concentrations in various size fractions of PM during the high and low seasons at Din Daeng were significantly higher than at the Ari sampling site. The highest OC concentration was reported in $PM_{0.5–1.0}$ during the high season (Din Daeng: 26.0 μg/m^3; Ari: 20.1 μg/m^3). However, the highest EC concentration was reported in $PM_{2.5–10}$ (Din Daeng: 3.8 μg/m^3; Ari: 1.4 μg/m^3). In contrast, the OC higher concentration in the low season was reported in $PM_{0.5–1.0}$ (Din Daeng: 14.2 μg/m^3; Ari: 4.7 μg/m^3), and the EC high concentration in the low season at Ding Daeng was 1.6 μg/m^3 in $PM_{0.5–1.0}$, and 1.0 μg/m^3 in $PM_{>10}$ at Ari. In high and low seasons, OC and EC showed similar variation trends in various PM-size fractions attributed to similar emission sources. As shown in Table 1, OC and EC are strongly correlated in $PM_{0.1}$, $PM_{2.5–10}$, and $PM_{>10}$ at Din Daeng during the high season, whereas at Ari, OC and EC are strongly correlated in $PM_{0.1}$ and $PM_{>10}$ in high season. The strong correlation between OC and EC in $PM_{>10}$ and $PM_{0.5-1.0}$ at Ari and $PM_{0.1}$, $PM_{2.5–10}$, and $PM_{>10}$ at Din Daeng in high season indicates their common emission sources (Salma et al., 2004). Strong OC-EC correlations suggest that atmospheric particulate matter may be emitted from similar sources.

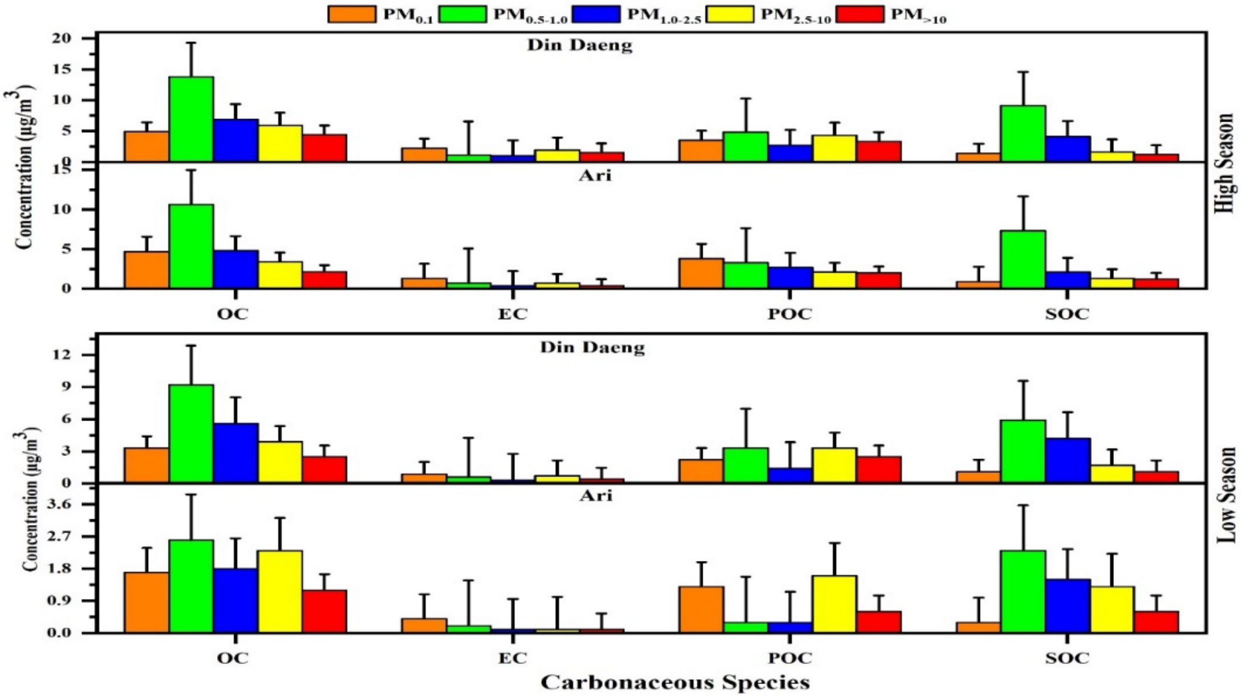


Fig. 1 OC, EC, POC, and SOC mean concentrations in high and low season in various size fractions of PM at Ari and Din Daeng, Bangkok, Thailand

Fig. 2 shows the concentrations of 8 carbon fractions (OC1, OC2, OC3, OC4, OP, EC1, EC2, and EC3) at Ari and Din Daeng during the high and low seasons. At Ari and Din Daeng, PM's most abundant carbon

species were OC2, OC3, OC4, EC1, and EC2. The eight carbon fractions are emitted from various sources of pollution. OC1 is emitted by biomass burning, OC2 represents coal combustion, and OC4 is enriched in the road dust profile (Chow et al., 2004). The main sources of OC3 emissions are biomass burning and vehicle exhaust (Phairuang et al., 2019). However, EC1 is primarily emitted by gasoline vehicle emissions, EC2 and EC3 are emitted by diesel vehicles, and OP is mainly composed of water-soluble OC (Cao et al., 2005). Road dust, coal combustion, and vehicle emissions were identified as potential sources of carbonaceous particles during the sampling period based on the distribution of eight carbon fractions.

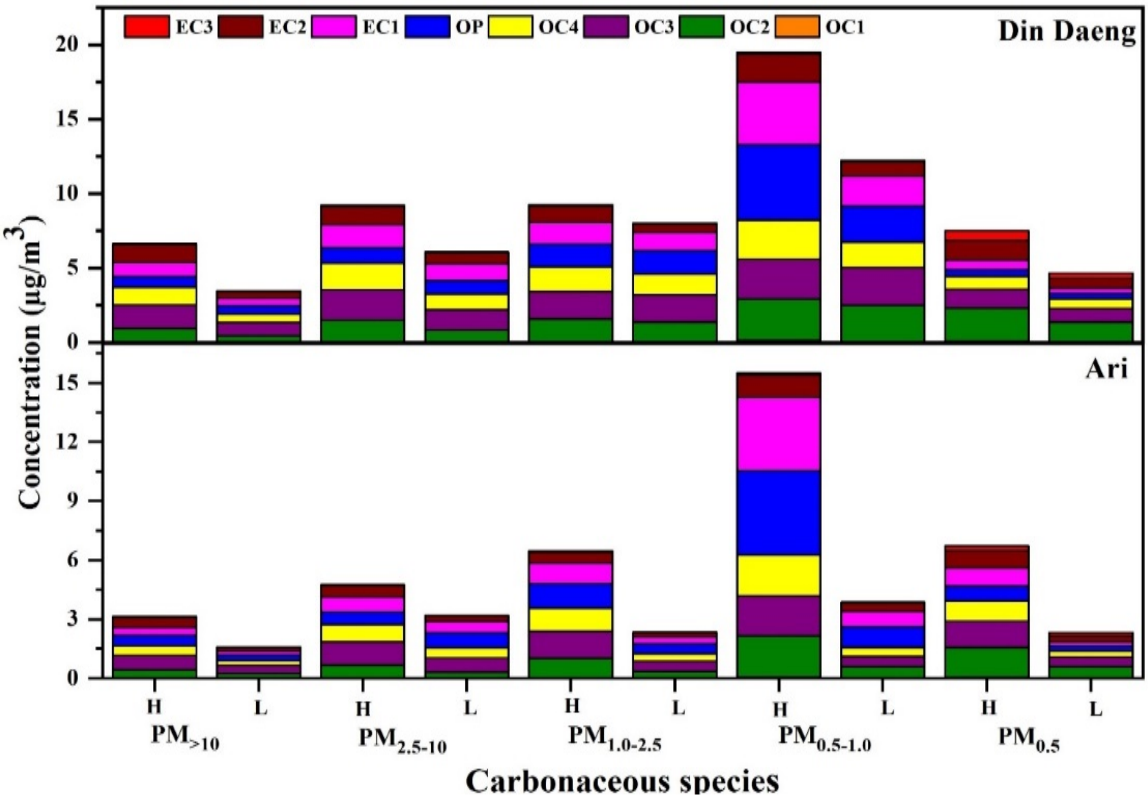


Fig. 2 The concentration of OC and EC fractions (OC1, OC2, OC3, OC4, EC1, EC2, and EC3) in high and low season in various size fractions of PM at Ari and Din Daeng, Bangkok, Thailand

OC/EC and EC/TC ratios

The sources of carbonaceous aerosols can be determined using the OC/EC and EC/TC ratios. In various PM-size fractions, the OC/EC ratio at Ari and Din Daeng ranged from 0.2 to 4.2 in both high and low seasons is shown in Table 2. The influence of biomass burning is indicated by a higher OC/EC ratio, whereas a lower ratio indicates the emission from burning of fossil fuels. The EC/TC ratio of the aerosol sample can also be used to determine the possible sources of OC and EC emissions. The emissions from biomass burning and fossil fuels burning are indicated by EC/TC ratios of 0.1 to 0.2 and > 0.5, respectively. The EC/TC ratio at Ari and Din Daeng varied between 0.1 and 0.3 in various PM–size fractions. Similar EC/TC ratio trends were observed in the ambient air of Delhi (Kumar et al., 2016).

Table 2 The average and standard deviation of POA and SOA (µg/m^3) and OC/EC and EC/TC ratios at Ari and Din Daeng in high and low pollution season

	High season				Low season			
	POA	SOA	OC/EC	EC/TC	POA	SOA	OC/EC	EC/TC
Ari								
$PM_{>10}$	1.6±1.4	1.9±1.1	4.2±0.7	0.1±0.1	0.9±1.1	1.0±0.8	2.6±0.7	0.1±0.1
$PM_{2.5–10}$	3.3±2.1	2.1±1.5	3.0±2.7	0.2±0.1	2.5±1.3	2.1±1.7	1.5±0.8	0.1±0.1
$PM_{1.0–2.5}$	4.3±2.9	3.4±2.9	2.5±1.9	0.1±0.0	0.5±2.2	2.3±1.9	1.2±0.5	0.1±0.1
$PM_{0.5–1.0}$	5.26±2.9	11.7±6.8	2.1±1.2	0.1±0.1	0.5±0.8	3.7±3.1	1.8±2.0	0.3±0.1
$PM_{0.1}$	6.0±2.2	1.4±1.3	2.6±0.5	0.2±0.0	2.1±0.5	0.6±0.5	3.1±0.5	0.2±0.0
Din Daeng								
$PM_{>10}$	5.2±3.4	1.9±1.4	2.8±2.3	0.2±0.1	4.0±2.3	1.8±1.0	2.2±1.1	0.1±0.1
$PM_{2.5–10}$	6.8±4.0	2.6±1.9	1.8±1.4	0.2±0.1	5.2±2.3	2.7±1.7	2.0±1.6	0.2±0.1
$PM_{1.0–2.5}$	4.4±3.3	6.6±4.1	2.3±1.9	0.1±0.1	2.2±1.8	6.8±3.8	0.2±1.4	0.1±0.1
$PM_{0.5–1.0}$	7.6±6.6	14.5±9.5	1.9±0.6	0.1±0.1	5.3±5.0	9.4±7.4	2.1±2.3	0.1±0.1
$PM_{0.1}$	5.5±2.4	2.3±1.6	2.7±1.3	0.3±0.1	3.6±1.0	1.7±1.1	2.6±0.7	0.2±0.0

Estimation of Secondary Organic Carbon (SOC)

Due to the lack of analytical methods for calculating secondary formation, the POC and SOC direct measurement and separation are difficult (Castro et al., 1999). The minimum OC/EC ratio was used to estimate SOC and POC. Table 1 shows the mean POC and SOC concentrations in various PM-size fractions at Ari and Din Daeng. SOC contributes significantly higher to OC than POC at Ari and Din Daeng in $PM_{0.5–1.0}$ and $PM_{1.0–2.5}$, while the POC contribution to OC in $PM_{0.1}$, $PM_{2.5–10}$, and $PM_{>10}$ is higher than SOC in both the high and low seasons. Compared to SOC, the high contribution of POC to OC could increase the atmospheric warming effects of combustion aerosols and reduce their scattering properties. The incomplete combustion of fossil fuels, biomass burning, and the breakdown of carbon-containing products contribute to primary organic carbon (POC). Secondary organic carbon (SOC) can be formed when organic carbon gases undergo gas-to-particle conversion through aqueous phase and photochemical reactions (Dinoi et al., 2017).

Conclusions

This study investigated the concentration of various PM–size fractions and their carbonaceous components in high and low seasons at Ari and Din Daeng, Bangkok, Thailand. Din Daeng was reported to have significantly higher PM concentrations of various size fractions than Ari. The concentrations of OC and EC in various PM–size fractions at Ari and Din Daeng were slightly higher in the high season than in the low season. Except for $PM_{0.5–1.0}$, the POA contribution to OA was significantly higher than the SOA in various PM–size fractions. The possible sources of the various PM–size fractions determined by the OC/EC and EC/TC ratios were coal combustion, biomass burning, and vehicle emissions during the high and low seasons. The POC and

SOC concentrations were estimated based on the minimum OC/EC ratio. In both seasons, SOC contributes more to OC than POC in $PM_{0.5–1.0}$ and $PM_{1.0–2.5}$ at Ari and Din Daeng. The significant contribution of POC to OC results in an increase in the warming effect and a decrease in the scattering properties of combustion aerosols. The sources of various size fractions of PM that contributed to its carbonaceous species would help to investigate the health problems and the associated sources. The findings will also support to design the effective countermeasures and control strategies for air pollution related to transportation and residential activities in Bangkok. Thailand. More detail studies needed to be carried out at different locations to highlight the potential sources of PM pollution.

Acknowledgments

This work was supported by National Research Council of Thailand (NRCT) and National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Thailand through the Thailand Graduate Institute of Science and Technology. The authors would like to thank the National Nanotechnology Center Faculty of Engineering, Chulalongkorn University for full support with the research facilities. We also thank the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment Thailand for data information and sampling location.

References

Ahmad, M., Manjantrarat, T., Rattanawongsa, W., Muensri, P., Saenmuangchin, R., Klamchuen, A., Aueviriyavit, S., Sukrak, K., Kangwansupamonkon, W., Panyametheekul, S. 2022. Chemical composition, sources, and health risk assessment of PM2.5 and PM10 in urban sites of Bangkok, Thailand. Int. J. Environ. Res. Public Health 19(21): 14281–14297. doi.org/10.3390/ijerph192114281

Banoo, R., Sharma, S.K., Gadi, R., Gupta, S., Mandal, T.K. 2020. Seasonal variation of carbonaceous species of PM10 over urban sites of national capital region of India. Aerosol Sci. Eng. 4(2): 111–123. doi.org/10.1007/s41810-020-00058-2

Boongla Y., Chanonmuang, P., Hata, M., Furuuchi, M., Phairuang, W. 2021. The characteristics of carbonaceous particles down to the nanoparticle range in Rangsit city in the Bangkok Metropolitan Region, Thailand. Environ. Pollut. 272: 115940. doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115940

Cao, J.J., Wu, F., Chow, J.C., Lee, S.C., Li, Y., Chen, S.W., An, Z.S., Fung, K.K., Watson, J.G., Zhu, C.S., Liu, S.X. 2005. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China. Atmos. Chem. Phys. 5(11): 3127–3137. doi.org/10.5194/acp-5-3127-2005

Castro, L.M., Pio, C.A., Harrison, R.M., Smith, D.J.T. 1999. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations. Atmos. Environ. 33 (17): 2771–2781. doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00331-8

Chow, J.C., Watson, J.G., Kuhns, H., Etyemezian, V., Lowenthal, D.H., Crow, D., Kohl, S.D., Engelbrecht, J.P., Green, M.C. 2004. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the big bend regional aerosol visibility and observational study. Chemosphere 54: 185–208. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.07.004

Dan, M., Zhuang, G.S., Li, X.X., Tao, H.R., Zhuang, Y.H. 2004. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM2.5 in Beijing. Atmos. Environ. 38: 3443–3452. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.052

Dinoi, A., Cesari, D., Marinoni, A., et al. 2017. Inter-comparison of carbon content in PM2.5 and PM10 collected at five measurement sites in Southern Italy. Atmosphere 8: 243. doi.org/10.3390/atmos8120243

Duangkaew, S., Limpaseni, W., Suwattiga, P. 2013. Carbon composition of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Bangkok ambient air from a city center sampling site. Rangsit J. Arts Sci. 3(1): 17–23.

Furuuchi, M., Eryu, K., Nagura, M., Hata, M., Kato, T., Tajima, N., Sekiguchi, K., Ehara, K., Seto, T., Otani, Y. 2010. Development and performance evaluation of air sampler with inertial filter for nanoparticle sampling. Aerosol Air Qual. Res. 10: 185–192. doi.org/10.4209/aaqr.2009.11.0070

Han, Y.M., Chen, L.W.A., Huang, R.J., Chow, J.C., Watson, J.G., Ni, H.Y., Liu, S.X., Fung, K.K., Shen, Z.X., Wei, C., Wang, Q.Y., Tian, J., Zhao, Z.Z., Prévôt, A.S.H., Cao, J.J. 2016. Carbonaceous aerosols in megacity Xi'an, China: Implications of thermal/optical protocols comparison. Atmos. Environ. 132: 58–68. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.023

Han, Y.M., Cao, J.J., Lee, S.C., Ho, K.F., An, Z.S. 2010. Different characteristics of char and soot in the atmosphere and their ratio as an indicator for source identification in Xi'an, Chin. Atmos. Chem. Phys. 10: 595–607. doi.org/10.5194/acp-10-595-2010

Kumar, P., Kumar, R., Yadav, S. 2016. Water-soluble ions and carbon content of size-segregated aerosols in New Delhi, India: direct and indirect influences of firework display. Environ. Sci. Pollut. Res. 23(20), 20749–20760. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7313-x

Pachauri, T., Satsangi, A., Singla, V., Lakhani, A., Kumari, K.M. 2013. Characteristics and sources of carbonaceous aerosols in $PM_{2.5}$ during wintertime in Agra, India. Aerosol. Air Qual. Res. 13: 977–991. doi.org/10.4209/aaqr.2012.10.0263

Panyametheekul, S., Kangwansupamonkon, W., Anuchitchanchai, O., Pongkiatkul, P. 2022. Research Program on Integrated Technology for mitigating PM2.5: A case study in Bangkok Metropolitan Region (BMR). National Research Council Fund. September 2022. [in Thai]

Phairuang, W., Suwattiga, P., Chetiyanukornkul, T., Hongtieab, S., Limpaseni, W., Ikemori, F., Hata, M., Furuuchi, M. 2019. The influence of the open burning of agricultural biomass and forest fires in Thailand on the carbonaceous components in size-fractionated particles. Environ. Pollut. 247: 238–247. doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.001

Rajput, P. 2018. OM/OC ratio of polar and non-polar organic matter during wintertime from Indo-Gangetic Plain: Implications to regional-scale radiative forcing. Aerosol Sci. Eng. 2: 153–164. doi.org/10.1007/s41810-018-0032-6

Rajput, P., Sarin, M.M., Sharma, D., Singh, D. 2014. Organic aerosols and inorganic species from post-harvest agricultural-waste burning emissions over northern India: Impact on mass absorption efficiency of elemental carbon. Environ. Sci. Process. Impacts 16: 2371–2379. doi.org/10.1039/c4em00307a

Ram, K., Sarin, M.M., Sudheer, A.K., Rengarajan, R. 2012. Carbonaceous and secondary aerosols during wintertime fog and haze over urban sites in the Indo-Gangetic Plain. Aerosol Air Qual. Res. 12: 359–370. doi.org/10.4209/aaqr.2011.07.0105

Ram, K., Sarin, M.M. 2010. Spatio-temporal variability in atmospheric abundances of EC, OC and WSOC over Northern India. J. Aerosol Sci. 41: 88–98. doi.org/10.1016/j.jaerosci.2009.11.004

Robinson, A.L., Donahue, N.M., Shrivastava, M.K., Weitkamp, E.A., Sage, A.M., Grieshop, A.P., Lane, T.E., Pierce, J.R., Pandis, S.N. 2007. Rethinking organic aerosols: Semi volatile emissions and photochemical aging. Science 315(5816): 1259–1262. doi.org/10.1126/science.1133061

Salam, A., Bauer, H., Kassin, K., Ullah, S.M., Puxbaum, H. 2004. Aerosol chemical characteristics of a mega-city in Southeast Asia (Dhaka–Bangladesh). Atmos. Environ. 37(18): 2517–2528. doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00135-3

Singh, N., Banerjee, T., Raju, M.P., Deboudt, K., Sorek-Hamer, M., Singh, R.S., Mall, R.K. 2018. Aerosol chemistry, transport, and climatic implications during extreme biomass burning emissions over the Indo-Gangetic Plain. Atmos. Chem. Phys. 18: 14197–14215. doi.org/10.5194/acp-18-14197-2018

Yang, H., Yu, J.Z., 2002. Uncertainties in charring correction in the analysis of elemental and organic carbon in atmospheric particles by thermal/optical methods. Environ. Sci. Technol. 36: 5199–5204. doi.org/10.1021/es025672z

Yang, F., He, K., Ye, B., Chen, X., Cha, L., Cadle, S.H., Chan, T., Mulawa, P.A. 2005. One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai. Atmos. Chem. Phys. Discuss. 5, 217–241. doi.org/10.5194/acp-5-1449-2005

Zhang, X., Li, Z., Wang, F., Song, M., Zhou, X., Ming, J. 2020. Carbonaceous Aerosols in PM_1, $PM_{2.5}$, and PM_{10} Size Fractions over the Lanzhou City, Northwest China. Atmosphere 11: 1368. doi.org/10.3390/atmos11121368

Effect of pond depth on water quality and bacterial vertical variability in oxidation pond

Chalisa Tudsnaton[a,b], Thanit Pattamapitoon[a,b,*], Onanong Phewnil[a,b], Watcharapong Wararum[a,b], Sathapat Saneha[a], Sudaporn Sukchinda[a], Sivanh Khonesavanh[a], Parkin Maskulrath[a,b]

[a]Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok 10700, Thailand

[*]Corresponding author. E-mail address: Thanit.pa@ku.th

Abstract

The oxidation pond of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project: Phetchaburi Province, in Thailand is dependent on the biochemical digestion of aerobic bacteria, where it is suggested that the water quality is the indicator of the bacteria activity. From this study, it can be stated that dissolved oxygen within the oxidation is produced by the process of photosynthesis of phytoplankton as the dominant family was the Cyanobiaceae. Oxygen that produced during the process is used for the digestion of organic matter by bacteria in every level of the pond and it was found that there was no significant different in the bacteria diversity. All the aerobic bacteria and anaerobic bacteria that were found in each sampling depth consisted of Nitrifying bacteria, Ammonia oxidizing bacteria, Denitrifying bacteria, Methanogenic bacteria, Methanotrophic bacteria, and Carbon utilizing bacteria (Breakdown of organic carbon complex). According to the result of this research, it was suggested that these bacteria found in municipal wastewater provide positive benefits has the ability to support the treatment system in which the depth (2.23m) of the oxidation is found to be at an appropriate depth.

Keywords: Bacterial variability, Domestic wastewater treatment, Oxidation pond, Water quality

Introduction

Municipal wastewater can be regarded as anthropogenic waste that are released from activities of human being such as washing and cooking. As a result, this wastewater contains contaminants that are in the form of biodegradable organic substances (Protein, Carbohydrate and Lipid). In a specific case, the Phetchaburi's municipal wastewater is transferred from the combine sewer system in which it is transferred through the 18-kilometer closed pipeline to the King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environment Research and Development Project (LERD project). According to the study of Jinjaruk et al. (2018) and Bella and Rao(2021), they have suggested that anaerobic degradation process by anaerobic bacteria reduces the concentration of the wastewater during the transfer process in the pipeline. The activity of aerobic biochemical degradation is based on the action of a variety of aerobic bacteria and facultative anaerobic bacteria in terms of a consortium of bacteria spp. in a suitable condition (Aziz et al., 2019; Mathew et al., 2022). From the results of the process, the output nutrients are Nitrate (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+), Phosphate (PO_4^{3-}), etc., using in the growth of Phytoplankton within the oxidation ponds system. For this reason, the pond system is an open system and located in an open area allowing for the natural process that relies on process of thermosiphon and photosynthesis that are depended on wind speed and sunlight in the addition of natural oxygen into the water. (Srichomphu et al., 2015; Noikondee, 2019). Emphasis on the impacts of the photonic zone, being the byproduct is the driving force of the vertical oxygen-driven aerobic degradation activity, as it is one of the key factors with the pond's depth. In many cases, oxidation is found in the deepest part of the pond as the result from this physical impact, the oxygen will circulate vertically but will not reach the bottom of the pond. For such, an anaerobic degradation will occur in the area, resulting in smelly gases such as Ammonia (NH_3) and Hydrogen sulfide (H_2S) that can react with iron in the sediment of the pond, which is the structure of the system that is resulting in black water from Iron sulfide (FeS) which is toxic to the oxygen generation process of Phytoplankton and bacterial growth (Cohen et al., 1986; Kushkevych et al., 2019; Tudsanaton et al., 2021,) as overall this can affect the efficiency of the aeration system. Therefore, in order to prevent these kind effects, this research aims to study the appropriate depth of wastewater treatment system using desiccant ponds to promote aerobic decomposition of organic matter.

Material and Methods

Site Study

The study area of this research is located at the King's Royally initiated Laem Phak Bia Environment Research and Development Project, Laem Phak Bia Subdistrict, Ban Laem District Phetchaburi Province, (UTM 1442240 to 1443480 N and 0619271 to 0619271 E). The oxidation ponds of the project are arranged into series that are interconnected. The system receives municipal wastewater from the Phetchaburi Municipality by

gathering through a combine sewer system that is collected at the Ban Khlong Yang pumping station and transfer through a closed HDPE pipe for a distance of 18 kilometers as shown in Figure 1.

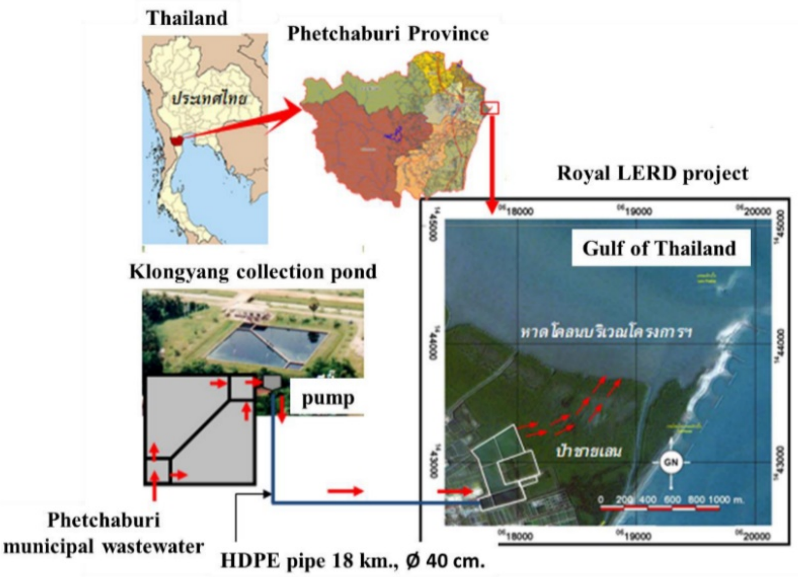


Fig. 1 Location of study site in the oxidation pond area of the LERD project

Sampling

Water samples were collected in the middle of the first oxidation pond (pond no.2 : which acts to decompose organic matter using aerobic and oxygen by the process of Photosynthesis and Thermosiphon) with the depth of 2.23 meters at 11:00 a.m. Depth for the samplings were divided into 3 levels into 1) 0–60 cm. (Top layer), 2) 60–150 cm., (Middle layer) and 3) more than 150 cm. (Bottom layer) (Noikondee et al., 2019; Maskulrath, 2020, Srichomphu et al., 2020). The samples were collected by using a water sampler pumped into polyethylene (PE) bottles to analysis chemical water quality and store samples at 4°C. An aseptic technique was used for the analysis of bacterial diversity.

Sample analysis

In this research, measurement and analysis of chemical water quality consist of Dissolved oxygen (DO), Oxidation reduction potential (ORP), Biochemical oxygen demand (BOD), Nitrate-nitrogen (NO_3^--N) and Ammonia-nitrogen (NH_3) according to the standard methods of APHA (2005) and APHA, AWWA and WEF (2017). For the analysis of bacterial diversity was achieved by the method of "Next generation sequencing" method. In the statical analysis, both the chemical and physical parameters were analyzed statistically to find variance in the data by using Analysis of Variance (ANOVA) as the differences were compared by the DMRT method at the 95% confidence level ($p < 0.05$).

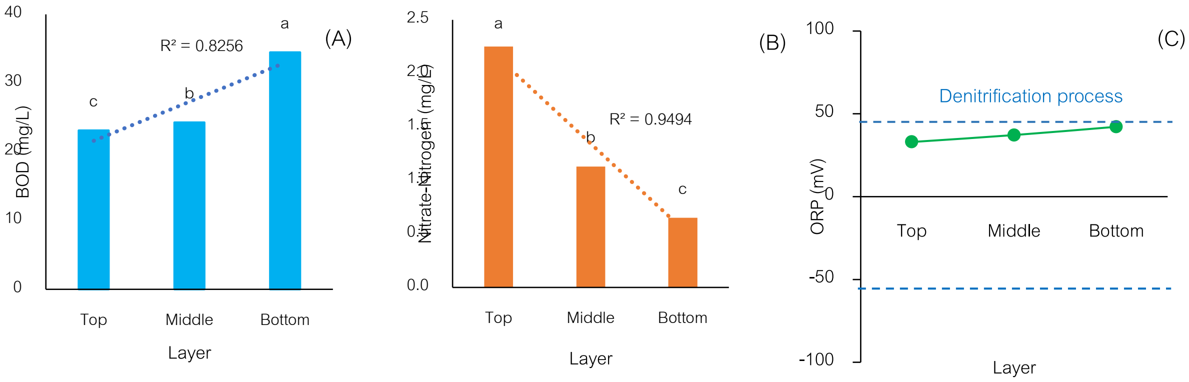
Results and Discussion

Water Quality

The water quality was the key parameters in suggested biological digestion that was the products of the bacteria and phytoplankton within the oxidation pond. The results have suggested that all the sampled depth were in an aerobic stage. It is necessary in the digestion of organic matter within the pond measured in the biochemical oxygen demand (BOD), however, the depth of the pond increases the higher significant rate of BOD ($p < 0.05$, $R^2 = 0.8256$) (Fig. 1A) was found as this was a suggestion for the organic matter from both the decaying phytoplankton and bacteria within the bottom of sediment of the pond. (Mayo and Abbas, 2014). This finding was also supported by the Oxidation and reduction potential of the water sample in which the process of denitrification process is occurring. (Fig. 1C). Explaining statistically significant depth-dependent decrease in nitrate. ($p < 0.05$, $R^2 = 0.9494$) as showing on the biological nitrogen transformation mechanisms. (Fig. 1 B). where this shows that the depth directly affected the changes in BOD and NO_3- with the correlation coefficient; R^2 being as high as 0.8256 and 0.9494, respectively (Fig. 2). However, the ammonia content did not have different with depth as shown in Table 1.

Table 1 Duncan's statically of water qualities

Parameters	Top	Middle	Bottom	F-test
DO (mg/L)	7.76	7.45	7.42	-
ORP (mV)	+33.00	+37.20	+42.20	-
BOD (mg/L)	23.11±0.62[c]	24.27±0.06[b]	34.48±0.13[a]	*
NO_3^- (mg/L)	2.25±0.16[a]	1.13±0.08[b]	0.65±0.09[c]	*
NH_3 (mg/L)	1.55±0.12	1.44±0.19	1.33±0.18	ns



* = Statistical variances at a level of 95% confidence, ns= No statistical differences at 95% confidence leve

Fig. 2 Water qualities in term of: (A) Biochemical oxygen demand; (B)Nitrate-nitrogen; (C) Oxidation-reduction potential

Bacteria Variability

55 families of aerobic and anaerobic bacteria was found in oxidation pond at 3 different depths (top, middle and bottom). (Fig. 3 and Fig. 4). Whereas the diversity of bacteria species was not different according to the depth of the pond. Besides 4 families of oxygenic photosynthesis bacteria were found in all of the depths, and they are Cyanobiaceae (Dominant family), Cyanobacteriaceae, Nostocaceae, and Synechococcaceae (Fig. 5) They were all classified by as oxygen producer as they were accounted for more than 80% of the dissolve oxygen within the water (Yin et al., 2021), as this suggested in Table 1 as DO were over 7 mg/L at all depths.

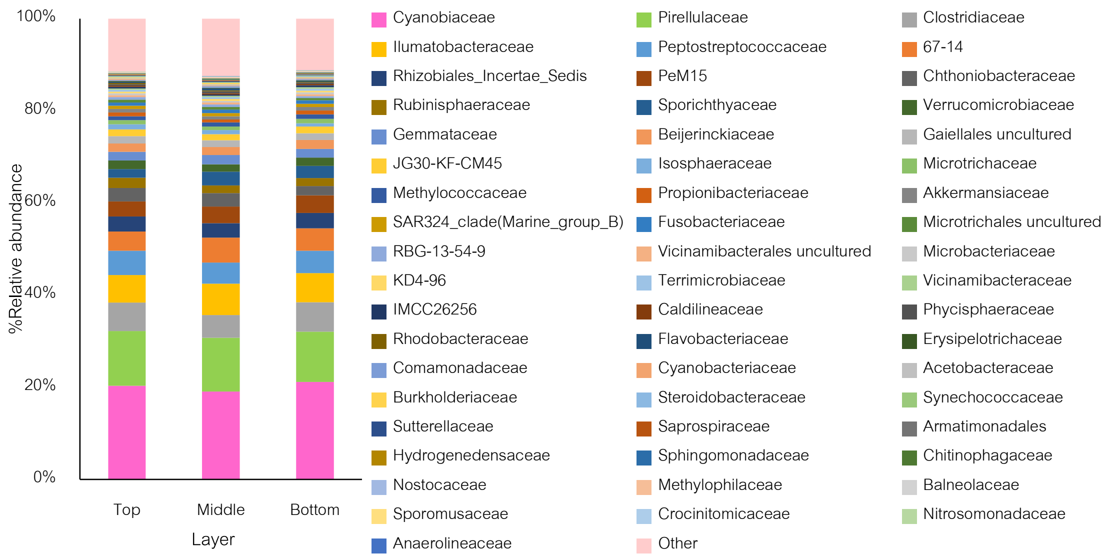


Fig. 3 Relative abundance of the families obtained in Oxidation pond

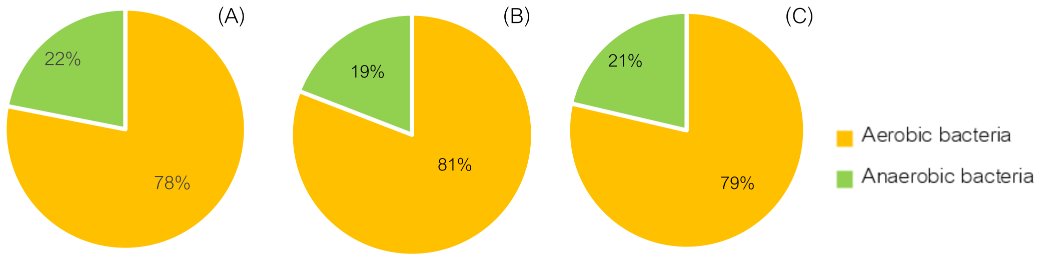


Fig. 4 Proportion of an aerobic bacteria and anaerobic bacteria in different layer: (A) top; (B) bottom; (C) middle layer

The study also found that the bacteria were important in the changing nitrogen forms in 3 different depths of the pond. And aerobic bacteria and anaerobic bacteria species which consist of Nitrosomonadaceae (Ammonia oxidizer) oxidating of ammonia to nitrite (Bollmann et al., 2011 Prosser et al., 2014). Comamonadaceae (Nitrifying

bacteria) (Jia et al., 2019) and Denitrifying bacteria in the family of Rhizobiales (Incertae Sedis), and Steroidobacteraceae which reduces nitrate into nitrogen gas decreasing the nitrogen concentration in the pond (Jia et al., 2019; Deng et al., 2022). 4 different families of aerobic bacteria was found and they play important role in reducing the organic carbon in the form of BOD and they are Pirellulaceae (Dominant family), Rhodobacteraceae, Flavobacteriaceae, and Saprospiraceae (McIlroy and Nielsen, 2014; Waskiewicz and Irzykowska, 2014; Pohlner et al., 2019, Fuerst and Butler, 2022) (Fig. 5) In the relative abundance in accordance to the depth with the BOD can see increasing with the depth (Fig. 2A). Moreover, the oxidation system still relies on an anaerobic digestion because anaerobic bacteria (Fig. 6) were found at all depths, as this is calculated to be 19–22% of all bacteria found (Fig. 4). Expanding on the anaerobic found was the Methanogenic bacteria of family, Steroidobacteraceae (Jia et al., 2019) that can produce methane (CH_4). From the generation of methane can then be used in as a carbon source of Methanotrophic bacteria in the family Rubinisphaeraceae (Cattaneo et al., 2022) and Methylococcaceae (Bowman, 2014).

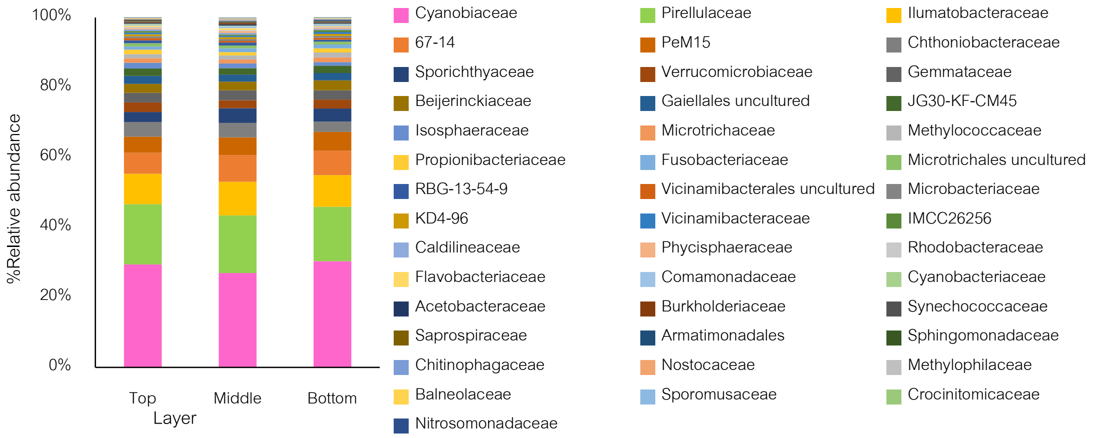


Fig. 5 Relative abundance of aerobic bacteria obtained in oxidation pond

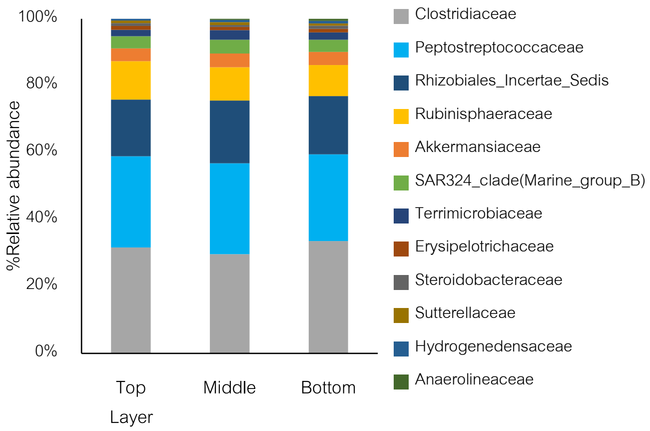


Fig. 6 Relative abundance of anaerobic bacteria obtained in oxidation pond

However, the pond depth has a direct effect on the dissolved oxygen content, with studies by Noikondee et al (2019) and Kattinanon (2015) found that increasing depth will decrease in oxygen content. This can promote the transformation of bacteria from aerobic bacteria to anaerobic bacteria that degrade organic matter without oxygen. The product from anaerobic degradation also inhibits the growth of aerobic bacteria, which will reduce the efficiency of aerobic wastewater treatment. (Wang et al., 2002; Tudsanaton et al., 2021; Li et al., 2022)

From the phenomena that was found in the oxidation pond, the biological and physical results suggested that at each sampling depths were consisted of aerobic bacteria and anaerobic bacteria. From this, it can be concluded that the depth of 2.23 meters for the oxidation pond can be categories as an appropriate depth of municipal wastewater treatment pond making it as suitable for aerobic decomposition

Acknowledgements

The authors of this research would like the appreciate The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project as well as the professors of the Department of Environmental Science Faculty of Environment Kasetsart University, Thailand for their support of this research.

References

APHA, AWWA, WEF. 2017. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. America Public Health Association. Washington, DC, USA.

APHA. 2005. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Washington DC, USA.

Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Irfanullah, Khan, S.U., Farooqi, I.H. 2019. Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. Sci. Total environ. 686: 681–708. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295

Bella, K., Rao, P.V. 2021. Anaerobic digestion of dairy wastewater: Effect of different parameters and co-digestion options-a review. Biomass Conv. Bioref. doi.org/10.1007/s13399-020-01247-2

Bollmann, A., French, E., Laanbroek H.J. 2011. solation, Cultivation, and Characterization of Ammonia-Oxidizing Bacteria and Archaea Adapted to Low Ammonium Concentrations. In: Klotz, M.G. (Eds.). Methods in Enzymology. Academic Press. US. pp. 55–88.

Bowman, J.P. 2014. The family Methylococcaceae. In: Rosenberg, E., DeLong, E.F., Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds.). The prokaryotes. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 441–440.

Cattaneo, C. R., Rodríguez, Y., Rene, E. R., García-Depraect, O., Muñoz, R. 2022. Biogas bioconversion into poly(3-hydroxybutyrate) by a mixed microbial culture in a novel Taylor flow bioreactor. J. Waste manag. 150: 364–372. doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.017

Cohen, Y., JØrgensen, B.B., Revesbech, N.P. Poplawski, R. 1986. Adaptation to Hydrogen Sulfide of Oxygenic and Anoxygenic Photosynthesis among Cyanobacteria. Appl. Environ. Microbiol. 51(2): 398–407. doi.org/10.1128/aem.51.2.398-407.1986

Deng, P., Yan, X., Liu, R., Ding, T., Chen, J., Wu, Z. 2022. Effect of cow dung on anaerobic digestion characteristics of poplar fuel ethanol wastewater. Biomass Conv. Bioref. doi.org/10.1007/s13399-022-02549-3

Fuerst, J.A. and Butler, M.K. 2022. *Pirellula*. In M.E. Trujillo, S. Dedysh, P. DeVos, B. Hedlund, P. Kämpfer, F.A. Rainey, W.B. Whitman. (Eds.). Bergey's manual of systematics of archaea and bacteria. John Wiley & Sons, Inc. ,New York, United states. pp.1–7.

Jia, L., Jiang, B., Huang, F., Hu, X. 2019. Nitrogen removal mechanism and microbial community changes of bioaugmentation subsurface wastewater infiltration system. Bioresour. Technol. 294: 1–10

Jinjaruk, T., Chunkao, K., Pongput, K., Choeihom, C., Pattamapitoon, T., Wararam, W., Thaipakdee, S. Srichompu, M., Maskulrath, P. 2018. HDPE pipeline length for conditioning anaerobic process to decrease BOD in municipal wastewater. EnvironmentAsia. 11(1):31–44. doi.org/10.14456/ea.2018.3

Kattinanon, S. 2005. Study on water quality of difference profile depth in oxidation ponds, Chanthaburi municipality changwat Chanthaburi. M.Sc. Thesis, Faculty of Environment, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Kushkevych, I., Dodević , D., Vítězová, M. 2019. Toxicity of hydrogen sulfide toward sulfate-reducing bacteria *Desulfovibrio piger* Vib-7. Arch Microbiol. 201(3): 389–397. doi.org/10.1007/s00203-019-01625-z.

Li, X., Chen, F., Wang, X., Xiong, Y., Liu, Z., Lin, Y., Ni, K., Yang, F. 2022. Innovative utilization of herbal residues: Exploring the diversity of mechanisms beneficial to regulate anaerobic fermentation of alfalfa. Bioresour. Technol. 360: 127429. doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127429

Maskulrath. P. 2020. Determining wind profile in calculating the rates of evaporation in community wastewater oxidation ponds surface of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project. M.Sc. Thesis, Faculty of Environment, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Mathew, M.M., Khatana, K., Vats, V., Dhanker, R., Kumar, R., Dahms, H.U., Hwang, J.S. 2022. Biological approaches integrating algae and bacteria for the degradation of wastewater contaminants-A review. Front Microbiol. 12: 1–16. doi: 10.3389/fmicb.2021.801051

Mayo, A., Abbas, M. 2014. Removal mechanisms of nitrogen in waste stabilization ponds. Phys. Chem. Earth. 72–75: 77–82. doi.org/10.1016/j.pce.2014.09.011

McIlroy, S.J., Nielsen, P.H. 2014. The Family Saprospiraceae. In: Rosenberg, E., DeLong, E.F., Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds). The Prokaryotes. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 863–889

Noikondee, R., Chunkao, K., Bualert, S., Pattamapitoon, T. 2019. Evaluation of Dissolved Oxygen Stratification in an Oxidation Pond for Community Wastewater Treatment through King's Royally Initiated "Nature by Nature" Process. Evironmentasia. 12(1): 169–177. doi.org/10.14456/ea.2019.19

Pohlner, M., Dlugosch, L., Wemheuer, B., Mills, H., Engelen, B., Reese, B.K. 2019. The majority of active rhodobacteraceae in marine sediments belong to uncultured genera: A molecular approach to link their distribution to environmental conditions. Front. Microbiol. 10: 1–16

Prosser, J.I., Head I.M., Stein, L.Y. 2014. The Family Nitrosomonadaceae. In: Rosenberg, E., DeLong, E.F., Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (Eds) The Prokaryotes. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 901–918.

Srichomphu, M., Pattamapitoon,T., Phewnil, O., Chunkao, K., Chanthasoon. C. 2020. Optimal Sampling Interval for Qualitative Analysis of Phytoplankton on Community Wastewater. In: The 17th National Kasetsart University Kampheang Saen Conference, Nakhonpathom, Thailand, pp. 2971–2979. [in Thai]

Srichoomphu. M., Boonprakong, T., Chunkao, K., Pattamapitoon,T., Semvimol, N. 2015. Effects of *Microcystis aeruginosa* Blooming on community wastewater quality in pond technology system. KKU Sci. J. 43(1): 126–136.

Tudsanaton, C., Pattamapitoon, T., Phenil, O., Semvimol, N., Wararam, W., Chanthasoon, C., Thaipakdee, S. 2021. Limiting factor of durian rind composting by natural technology during the wet period. Eco. Env. and Cons. 27(2): 590–598

Wang, Q., Narita, J. Y., Xie, W., Ohsumi, Y., Kusano, K., Shirai, Y., Ogawa, H. I. 2002. Effects of anaerobic/aerobic incubation and storage temperature on preservation and deodorization of kitchen garbage. Bioresour. Technol. 84(3), 213–220. doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00062-7

Waśkiewicz, A., Irzykowska, L. 2014. *Flavobacterium* spp. – Characteristics, occurrence, and toxicity. In: Batt, C.A., Tortorello, M.L. (Eds). Encyclopedia of Food Microbiology. Academic Press, US. pp. 938–942.

Yin, L., Fu, L., Wu, H., Xia, Q., Jiang, Y., Tan, J., Guo, Y. 2021. Modeling dissolved oxy gen in a crob pond. Eco. Model. 440: 109385. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109385

การผลิตโพลีไฮดรอกซีแอลคาโนเอตด้วยสลัดจ์ร่วมกับการเติม *Thauera mechernichensis* (TL1) ภายใต้สภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน

Polyhydroxyalkanoate production from sludge bioaugmented with *Thauera mechernichensis* (TL1) under feast and famine conditions

<u>จรัสอรุณ เจริญสวัสดิ์</u>[a], กฤตยพงษ์ จันทรเดช[a], ภริณดา ทยานุกูล[b], เบญจพร สุวรรณศิลป์[a,*]

<u>Jarataroon Jaroensawat</u>[a], Krittayapong Jantharadej[a], Parinda Thayanukul[b], Benjaporn Suwannasilp[a,*]

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ

[a]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

[b]Department of Biology, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: benjaporn.bo@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเติมจุลินทรีย์ *Thauera mechernichensis* ในตะกอนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งเพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (พีเอชเอ) และลดระยะเวลาในการคัดเลือกกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการสะสมพีเอชเอ โดยทดสอบที่อัตราส่วนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมต่อ *T. mechernichensis* ที่ 100:0, 97.5:2.5 และ 75:25 % g mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) ที่สภาวะให้อาหารเกินพอสลับกับขาดแคลนในถังปฏิกรณ์แบบกึ่งเท ผลการศึกษาพบว่าถังปฏิกรณ์ที่เติม *T. merchernichensis* ที่อัตราส่วน 97.5:2.5 % g MLVSS ได้ผลผลิตพีเอชเอสูงที่สุดในปริมาณ 30.2% ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ซึ่งมากกว่าถังที่ไม่ได้เติม *T. mechernichensis* ซึ่งได้พีเอชเอเพียง 14.3% ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเติม *T. merchernichensis* เพียง 2.5% g MLVSS สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตพีเอชเอรวมถึงลดระยะเวลาการในการคัดเลือกกลุ่มจุลินทรีย์ในระบบได้

<u>คำสำคัญ</u>: การให้อาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน, จุลินทรีย์สายพันธุ์ผสม, พีเอชเอ, *Thauera mechernichensis*

Abstract

This research investigated the bioaugmentation of *Thauera mechernichensis* in mixed microbial cultures from an activated sludge system to increase polyhydroxyalkanoate (PHA) production and shorten the enrichment period for PHA-accumulating microorganisms. Mixed microbial cultures to *T. mechernichensis* ratios of 100:0, 97.5:2.5, and 75:25% g mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) were studied under feast/famine conditions in sequencing batch reactors. Maximum PHA accumulation was achieved at a ratio of 97.5:2.5% g MLVSS at the PHA content of 30.2% of cell dry weight, whereas the bioreactor without *T. mechernichensis* bioaugmentation had a maximum PHA content of 14.3% of cell dry weight. From this study, the bioaugmentation of only 2.5% *T. mechernichensis* can increase PHA production and shorten the enrichment period in mixed microbial cultures.

Keywords: Feast and Famine Feeding (F/F), mixed microbial cultures, PHA, *Thauera mechernichensis*

คำนำ

ขยะพลาสติกเป็นขยะที่ย่อยสลายได้ยากตามธรรมชาติ ทำให้ตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานานก่อให้เกิดเป็นปัญหาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการคิดค้นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ โดยพลาสติกชีวภาพชนิดโพลีไฮดรอกซีแอลคาโนเอต หรือ พีเอชเอ เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนจึงสามารถนำมาใช้ทดแทนได้ ในการศึกษาช่วงแรกนักวิจัยใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์บริสุทธิ์ เช่น *Ralstonia eutropha* (Sudesh et al., 2000) และ *Acaligenes latus* (Wang et al., 2013) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์และสะสมพีเอชเอได้ แต่การใช้เชื้อบริสุทธิ์ในการผลิตพีเอชเอมีต้นทุนการดำเนินการสูง เนื่องจากมีการใช้เทคนิคปลอดเชื้อและอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้องมีความบริสุทธิ์ ทำให้พีเอชเอที่ผลิตได้มีราคาสูงเมื่อเทียบกับพลาสติกจากปิโตรเลียมที่ใช้ในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดแนวคิดที่จะใช้เชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมจากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียเป็นหัวเชื้อและใช้น้ำเสียที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิตพีเอชเอให้ต่ำลงได้ ซึ่งการศึกษาการผลิตพีเอชเอด้วยเชื้อสายพันธุ์ผสมในหลายงานวิจัย พบว่าสามารถผลิตพีเอชเอได้ในปริมาณใกล้เคียงกับการผลิตด้วยเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์บริสุทธิ์เมื่อเลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน (feast and famine condition) ซึ่งสภาวะดังกล่าวเป็นหนึ่งในแนวทางในการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่สามารถสะสมพีเอชเอให้มีจำนวนมากขึ้นในระบบ โดยจุลินทรีย์ที่สามารถสะสมพีเอชเอได้จะสะสมพีเอชเอเป็นแหล่งคาร์บอนสำรองในสภาวะที่มีอาหารเกินพอ และเมื่อเข้าสู่สภาวะขาดแคลนอาหารจะยังคงอยู่รอดได้โดยอาศัยพีเอชเอที่สะสมไว้เป็นแหล่งคาร์บอน ในขณะที่จุลินทรีย์ที่ไม่สามารถสะสมพีเอชเอจะไม่สามารถอยู่รอดในช่วงขาดแคลนอาหารได้ ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่สามารถสะสมพีเอชเอได้มีความได้เปรียบในการแข่งขัน และเพิ่มจำนวนมากขึ้นเมื่อผ่านรอบการเดินระบบแบบมีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน งานวิจัยที่ผ่านมาเมื่อทดลองภายใต้สภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน พบการสะสมโพลีไฮดรอกซีบิวทิเรตหรือพีเอชบีถึง 89% ของน้ำหนักแห้ง เมื่อใช้อาหารสังเคราะห์คืออะซิเตท (Johnson et al., 2009) และสะสมพีเอชบีได้ 75% ของน้ำหนักแห้ง เมื่อใช้กากน้ำตาลหมักเป็นอาหาร (Albuquerque et al., 2010) นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ถึงชนิดของประชากรจุลินทรีย์ในระบบ มักพบจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Thauera* sp. เป็นกลุ่มที่โดดเด่นและอยู่ร่วมกับประชากรกลุ่มอื่นๆในระบบที่ได้ปริมาณการผลิตพีเอชเอสูงอยู่บ่อยครั้ง เช่น งานวิจัยของ Jiang et al. (2011) พบประชากรของ *Thauera selenatis* อยู่ร่วมกับ *Plasticicumulans acidivorans* โดยที่สามารถผลิตพีเอชบีได้ 84% ของน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ยังพบจุลินทรีย์ในจีนัส *Thauera* สามารถอยู่ร่วมกับจุลินทรีย์ในจีนัส *Azoarcus* และจีนัส *Paracoccus* โดยที่ปริมาณของประชากร *Thauera* มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของเอชวีพอลิเมอร์ เมื่อมีจีนัส *Thauera* มากขึ้น สัดส่วนของเอชวีพอลิเมอร์ก็จะมากขึ้นด้วย (Carvalho et al., 2014) อีกทั้งงานวิจัยของ Bhalerao et al. (2020) ทดลองโดยใช้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมยีสต์ พบกลุ่มประชากร *Thauera* มากกว่า 90% และสามารถผลิตพีเอชเอได้สูงสุดที่ 72% ของน้ำหนักแห้ง โดยที่มีสัดส่วนเอชบี 57% และเอชวี 15% จากการศึกษาที่ผ่านมานี้ยืนยันได้ว่าแบคทีเรียสกุล *Thauera* มีความสามารถในการสังเคราะห์และสะสมพีเอชเอได้มากในการเลี้ยงแบบสายพันธุ์ผสมภายใต้สภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน

จุลินทรีย์สายพันธุ์ *T. mechernichensis* TL1 เป็นอีกหนึ่งสายพันธุ์ที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นจุลินทรีย์ที่ได้รับการยืนยันว่ามีความสามารถในการสะสมพีเอชเอ (Scholten et al., 1999) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการผลิตพีเอชเอด้วย *T. mechernichensis* ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งภายใต้สภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน เพื่อให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการเติม *T. mechernichensis* ในระบบเพื่อลดระยะเวลาในการคัดเลือกกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการสะสมพีเอชเอ

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์

T. mechernichensis สายพันธุ์ TL1 (ATCC 700857T) ที่ใช้ในการทดลองนี้มาจากบริษัท ATCC (Virginia, USA) เป็นจุลินทรีย์ชนิดแบบใช้อากาศ โดยเริ่มต้นจะนำเชื้อ *T. mechernichensis* ที่ผ่านการเลี้ยงจนได้ค่าการดูดกลืนแสง (optical density) ที่ความยาวคลื่น 600 nm เท่ากับ 0.4 เติมลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ R2A ชนิดเหลว ปริมาณ 2% โดยปริมาตร โดยมีค่าพีเอชของอาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 7.2 เลี้ยงที่อุณหภูมิ 37 °C และเขย่าที่ 200 rpm เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างทุก 3 ชั่วโมงใน 24 ชั่วโมงแรกของการทดลอง จากนั้นเก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 48 ของการทดลอง นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 nm แล้วพล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลา เพื่อหาการเจริญเติบโตของเชื้อ *T. mechernichensis* ในช่วง log phase โดยพบว่าเชื้อเริ่มเข้าสู่ระยะ log phase ในชั่วโมงที่ 24 และการเจริญเติบโตจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงสุดในชั่วโมงที่ 36 โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 0.625±0.102 หลังจากนั้นค่าการดูดกลืนแสงจะลดลง ส่วนหนึ่งเนื่องจากเชื้อเกิดการจับรวมตัวเป็นฟล็อก เมื่อพิจารณาจากช่วงการเจริญเติบโตของเชื้อ *T. mechernichensis* ในระยะ log phase พบว่าจะอยู่ในช่วงค่าการดูดกลืนแสงระหว่าง 0.3–0.6 ที่ชั่วโมง 32–36

หลังจากทราบค่าการดูดกลืนแสงของเซลล์ในช่วง log phase แล้ว ทำการเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มจำนวนเชื้อให้เพียงพอสำหรับการทดลองในถังปฏิกรณ์ซึ่งจำเป็นต้องเพาะเลี้ยงเชื้อจำนวนหลายรอบ ในการทดลองจะทำการเลี้ยงเชื้อ *T. mechernichensis* ให้อยู่ในระยะ log phase ทำการปั่นเหวี่ยงเก็บเซลล์แล้วทำการเก็บตัวอย่างแต่ละรอบมาวัดน้ำหนักเซลล์แห้งในรูปของแข็ง (mixed liquor suspended solids, MLSS) และของแข็งระเหยได้ (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS) จากนั้นนำค่ามาคำนวณปริมาณเชื้อ *T. mechernichensis* ให้เพียงพอต่อการดำเนินงานในถังปฏิกรณ์ในการทดลองในขั้นถัดไป โดยถังปฏิกรณ์ที่ทดสอบการเติมเชื้อ *T. mechernichensis* จะเติมเชื้อที่ปริมาณ 2.5% และ 25% ซึ่งในแต่ละถังปฏิกรณ์จะกำหนดค่าความเข้มข้น MLVSS เริ่มต้นเท่ากับ 2,400 mg/l เชื้อจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงได้จะเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C ภายในระยะไม่เกิน 2 สัปดาห์ก่อนการทดลอง

ทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตะกอนจุลินทรีย์ผสมกับ T. mechernichensis ในการผลิตพีเอชเอ

การทดลองนี้ใช้ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งเท (sequencing batch reactor, SBR) ขนาด 0.25×0.2×0.35 m ปริมาตรใช้งาน 12 Lจำนวน 3 ถัง แต่ละถังปฏิกรณ์จะติดตั้งปั๊มพร้อมหัวทรายกระจายอากาศ 4 หัว จากนั้นทำการเตรียมตะกอนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมและเชื้อ *T. mechernichensis* โดยตะกอนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทปทุมธานี บริวเวอรี่ จำกัด ก่อนเติมตะกอนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมลงถังปฏิกรณ์จะทำการล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและตกตะกอน จำนวน 3 รอบ เพื่อล้างสารอินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียที่ตกค้างในตะกอนออกก่อน ส่วนเชื้อ *T. mechernichensis* จะล้างด้วยสารละลาย 0.85% NaCl จำนวน 2 รอบ แล้วทำการผสมตะกอนจุลินทรีย์สายผสมต่อ *T. mechernichensis* ในอัตราส่วน 100:0 % g MLVSS (ไม่มีการเติมเชื้อ *T. mechernichensis*), 97.5:2.5 % g MLVSS และ 75:25 % g MLVSS ในแต่ละถัง ตามลำดับ โดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกอนในถังปฏิกรณ์เท่ากันที่ 2,400 mg/l

ในการทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน โดยกำหนดค่า COD เริ่มต้นอยู่ที่ 3,000 mg/l มีองค์ประกอบดังนี้: CH_3COONa 3,845.16 mg/l, NH_4Cl 382.07 mg/l, KH_2PO_4 87.8 mg/l, $MgSO_4$ 500 mg/l และธาตุอาหารรองใส่ในปริมาณ 1 ml/l ประกอบด้วย : $FeCl_3$ 10 mg/l, H_3BO_3 4 mg/l, $CuSO_4{\cdot}5H_2O$ 2 mg/l, $MnCl_2{\cdot}2H_2O$ 0.3 mg/l, $NaMoO_4{\cdot}2H_2O$ 2 mg/l, $CaCl_2$ 10 mg/l, $ZnSO_4{\cdot}7H_2O$ 2 mg/l, $CoCl_2{\cdot}6H_2O$ 8 mg/l, $CoCl_2{\cdot}6H_2O$ 2 mg/l บัฟเฟอร์ $NaHCO_3$ 840 mg/l และ Thiourea 20 mg/l (ดัดแปลงจาก Sruamsiri et al., 2020) ในถังปฏิกรณ์ดำเนินการทดลองภายใต้สภาวะที่มี

อาหารเกินพอสลับกับขาดแคลนและมีการเติมอากาศมากเกินพอ ควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 6.5–9.5 อายุตะกอน (sludge retention time, SRT) ที่ 10 วัน และ ระยะเวลากักเก็บน้ำ (hydraulic retention time, HRT) ที่ 2 วัน ในแต่ละรอบของการเดินระบบจะทำการเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าไปในระบบแล้วทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 46 ชั่วโมง แล้วหยุดเติมอากาศเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อตกตะกอนแล้วถ่ายส่วนน้ำใสออกนับเป็น 1 รอบการเดินระบบ โดยช่วงต้นของการทดลองจะเป็นสภาวะที่มีอาหารเกินพอ (feast) เมื่อจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์จนหมดจะเกิดเป็นสภาวะขาดแคลนอาหาร (famine) จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ใหม่กลับเข้าไปอีกครั้งสำหรับเดินระบบรอบถัดไป ในแต่ละถังปฏิกรณ์ เก็บตัวอย่างทุกชั่วโมงที่ 0, 24 และ 48 ของแต่ละรอบ นำมาวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพีเอชและอุณหภูมิ วัดด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์แบบโพรบ ยี่ห้อ Mettler Toledo, ค่าออกซิเจนละลายตรวจวัดด้วยเครื่องวัดออกซิเจนแบบโพรบ ยี่ห้อ Lutron รุ่น DO-5512SD, ค่า SV30 วัดด้วยวิธีตกตะกอนในกรวยอิมฮอฟฟ์, ค่าCOD วิเคราะห์ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด และ ค่า MLSS และ MLVSS ตรวจวัดด้วยวิธี gravimetric methods (APHA, 2003) โดยค่าพีเอช, อุณหภูมิ, ออกซิเจนละลาย และ SV30 วัดตัวอย่างล่ะ 1 ซ้ำ ส่วนค่า COD, MLSS และ MLVSS วัดแต่ล่ะตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ นอกจากนี้ยังทำการเก็บตัวอย่างอย่างละเอียดในรอบการเดินระบบที่ 3, 17, 31, 49, 66 และ 82 โดยจะเก็บตัวอย่างในชั่วโมงที่ 0, 2, 4, 6, 8, 24, 32, และ 48 ของการเดินระบบ เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ก่อนหน้านี้และวิเคราะห์ปริมาณการสะสมพีเอชเอ (PHA) ในระบบเพิ่มเติม โดยวัดแต่ละตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณพีเอชเอ

การสกัดและวิเคราะห์ปริมาณพีเอชเอ อ้างอิงจาก Woraittinun and Suwannasilp (2017) โดยนำตะกอนตัวอย่าง 200 ml มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000xg เป็นระยะเวลา 10 นาที นำตะกอนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง และพักในเดซิเคเตอร์จนเย็นแล้วนำมาบดให้ละเอียด ชั่งตะกอน 20 mg (±2 mg) ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมคลอโรฟอร์ม 2 ml และสารละลาย Internal Standard ที่ความเข้มข้น 3% กรดซัลฟิวริกในเมทานอลที่มีกรดเบนโซอิก 2 g/l ปริมาตร 2 ml จากนั้นปิดฝาให้แน่นแล้วต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80 °C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายคลอโรฟอร์มซึ่งอยู่ที่ชั้นล่างสุดไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีชนิดเฟลมไอออไนเซชัน (Gas Chromatography with a Flame Ionization Detector, GC-FID) ยี่ห้อ Algilent Technologies โดยใช้แคปพิลลารีคอลัมน์ชนิด INNOWAX ขนาด 30 m ×0.32 ml×0.25 μm ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิของ injector 250 °C (Isotermal) อุณหภูมิของ column 130 °C 6 นาที เพิ่มอุณหภูมิเป็น 150 °C ด้วยอัตรา 5 °C/min อุณหภูมิของ detector (FID) 250 °C (Isotermal) โดยใช้แก๊สฮีเลียมเป็นตัวพาด้วยอัตราการไหล 2 ml/min ปริมาตรการฉีด 1 μl ต่อครั้ง (นฤมล, 2557) ทำการวิเคราะห์เทียบกับสารละลายมาตรฐานซึ่งเตรียมด้วยวิธีเดียวกัน โดยใช้สารมาตรฐานคือ Poly(3-hydroxybutyriate-co-3-hydroxyvalerate) ของบริษัท Sigma-Aldrich Co., Ltd

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตะกอนจุลินทรีย์ผสมกับ T. mechernichensis ในการผลิตพีเอชเอ

การทดสอบนี้ต้องการหาอัตราส่วนของจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมต่อ *T. mechernichensis* ที่ผลิตพีเอชเอได้มากที่สุดโดยมี 3 อัตราส่วนที่ 100:0, 97.5:2.5 และ 75:25 % g MLVSS ตามลำดับ ดำเนินการในถังปฏิกรณ์แบบกึ่งเทภายใต้สภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน และมีการเติมอากาศมากเกินพอ

ผลการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ที่อัตราส่วนระหว่างตะกอนจุลินทรีย์ผสมกับ *T. mechernichensis* ที่อัตราส่วน 100:0, 97.5:2.5 และ 75:25 % g MLVSS พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของการเดินระบบแต่ละรอบจะอยู่ที่ช่วง 8.15–8.96 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดที่ท้ายรอบการเดินระบบ ซึ่งมีค่า 9.15–9.64 อุณหภูมิของระบบมีค่า 24.7–31.5 °C ตลอด

การทดลอง ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศภายนอกไม่ได้มีการควบคุม DO เริ่มต้นควบคุมไม่น้อยกว่า 2 mg/l และจะลงลดต่ำสุดในชั่วโมงที่ 2-6 ของรอบการเดินระบบ ซึ่งมีค่าน้อยสุดที่ 0.7 mg/l เนื่องจากจุลินทรีย์มีความต้องการใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ หลังจากนั้นค่า DO จึงเพิ่มขึ้นจนค่อนข้างคงที่หลังชั่วโมงที่ 24 ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 6.4±2.5 mg/l ค่าดัชนีปริมาณตะกอน (Sludge Volume Index, SVI) ในถังปฏิกรณ์ที่เติมเชื้อ *T. mechernichensis* ที่อัตราส่วน 97.5:2.5 และ 75:25% g MLVSS จะมีค่า SVI อยู่ในช่วง 206±157 ml/g และ 164±122 ml/g ตามลำดับ ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์ที่ไม่เติมเชื้อ *T. mechernichensis* ที่มีค่า SVI 344±290 ml/g คาดว่าการเติม *T. mechernichensis* จะช่วยให้ระบบตกตะกอนได้ดีขึ้น เนื่องจากเชื้อชนิดนี้มีความสามารถในการจับรวมตัวเป็นฟล็อก

ความเข้มข้นของ COD และ MLSS ของการเดินระบบที่ชั่วโมงที่ 0, 24 และ 48 แสดงดัง Fig. 1 โดย COD เริ่มต้นการเดินระบบของทุกถังปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ย 2,880±582 mg/l เมื่อพิจารณาค่า COD ในชั่วโมงที่ 24 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับชั่วโมงที่ 48 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 424.91±738.73, 165.32±146.72, และ 169.06±303.07 mg/l ของถังปฏิกรณ์ที่อัตราส่วน 100:0, 97.5:2.5 และ 75:25 %MLVSS ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ใช้อาหารหมดก่อนชั่วโมงที่ 24 จากนั้นจะเข้าสู่สภาวะขาดแคลนอาหาร ประสิทธิภาพในการกำจัด COD จะมีค่าอยู่ที่ 85.16±30.54%, 94.19±5.71% และ 94.12±9.03% ตามลำดับ จะเห็นว่า ถังปฏิกรณ์ที่เติม *T. mechernichensis* สามารถกำจัด COD ได้ดีกว่ากว่าถังที่ไม่เติม *T. mechernichensis* ในส่วนของค่า MLSS ตลอดการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ที่อัตราส่วน 100:0, 97.5:2.5 และ 75:25 % g MLVSS จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2,894±1,315 mg/l, 2,721±1,406 mg/l และ 2,530±1,671 mg/l ตามลำดับ โดยที่ค่า MLSS จะเพิ่มขึ้นในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการเดินระบบในทุกๆรอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์หลังจากการเติมอาหารเข้าไปในระบบเมื่อวัด MLSS ในชั่วโมงที่ 48 ของการเดินระบบจะลดลง อันเนื่องมาจากสารอินทรีย์ได้หมดไป จุลินทรีย์จึงขาดอาหารและเกิดการสลายตัว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sruamsiri et al. (2020) ซึ่งใช้อะซิเตทเป็นอาหารหลักและดำเนินการในสภาวะที่มีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลนเช่นกัน

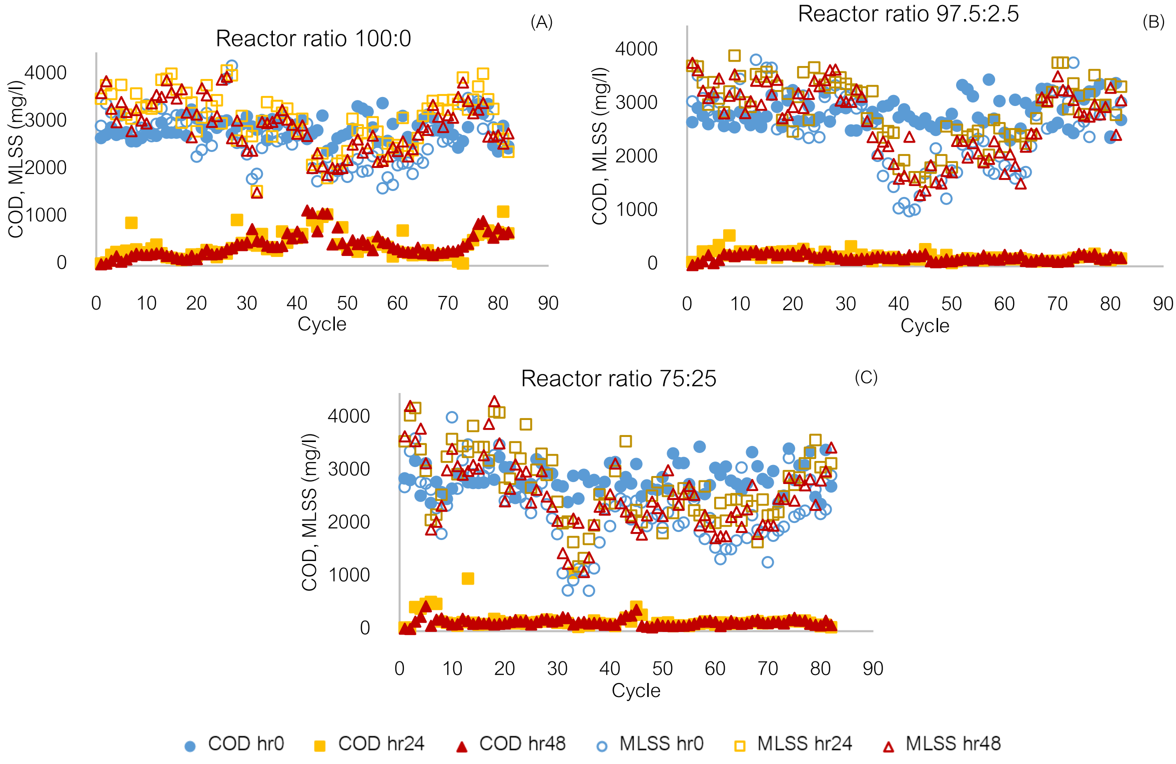


Fig. 1 COD and MLSS concentrations at 0, 24, and 48 h of each cycle in SBRs bioaugmented with *T. mechernichensis* at the sludge: *T. mechernichensis* ratio of (A)100:0; (B) 97.5:2.5; and (C) 75:25

จากนั้นทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในบางรอบการเดินระบบโดยละเอียด (รอบที่ 3, 17, 31, 49, และ 66) เพื่อดูการสะสมพีเอชเอ ควบคู่กับการกำจัด COD และความเข้มข้นของ MLSS แสดงดัง Fig. 2 (A, C, E, F, I) จากค่า COD ของการเดินระบบ ทำให้ทราบอัตราส่วนของระยะมีอาหารต่อระยะขาดแคลน (feast/famine ratio, F/F) กล่าวคือในระบบจะมีอาหารในช่วงระยะเวลา 6 ชั่วโมงแรกและขาดอาหารเป็นระยะเวลา 42 ชั่วโมง ทำให้อัตราส่วนของระยะมีอาหารต่อระยะเวลาขาดแคลนเท่ากับ 0.143 ซึ่งการอดอาหารที่ยาวนานจะทำให้ค่าอัตราส่วนน้อยลงและช่วยกระตุ้นการผลิตพีเอชเอของจุลินทรีย์ได้ดี (Albuquerque et al., 2010)

Fig. 2 (B, D, F, H, J) แสดงปริมาณพีเอชเอที่ผลิตได้ในแต่ละรอบการเดินระบบ พบว่าปริมาณพีเอชเอสูงที่สุดในแต่ละรอบอยู่ที่ชั่วโมงที่ 2–6 ซึ่งสอดคล้องกับค่า COD ซึ่งเป็นแหล่งอาหารจากภายนอก แล้วหลังจากนั้นจะลดลงเนื่องจากระบบเข้าสู่ระยะขาดแคลนจุลินทรีย์จึงใช้พีเอชเอที่สะสมไว้ภายในเซลล์เป็นแหล่งพลังงานทดแทน ในช่วงแรกของการเดินระบบ รอบที่ 3 และ 17 ในทุกถังปฏิกรณ์ พบปริมาณพีเอชเอน้อยกว่า 10% ของน้ำหนักเซลล์แห้ง (%wt) จากนั้นเมื่อตรวจวัดปริมาณพีเอชที่รอบ 31 ถังปฏิกรณ์ที่เติม *T. mechernichensis* จะมีการปรับตัวและผลิตพีเอชเอได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์ที่ไม่ได้เติมเชื้อ โดยในถังปฏิกรณ์ที่อัตราส่วน 97.5:2.5 ได้ผลผลิตพีเอชเอมากที่สุดปริมาณ 30.2%wt. และที่อัตราส่วน 75:25 ผลิตพีเอชเอได้มากที่สุด 23.1% wt ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ได้เติมเชื้อ ที่อัตราส่วน 100:0 ในรอบที่ 31 ผลิตพีเอชเอได้เพียง 3.8% และในรอบการเดินระบบที่ 49 พบการผลิตพีเอชเอได้สูงสุดอยู่ที่ 14.3%wt แต่การผลิตพีเอชเอของถังปฏิกรณ์ที่ไม่ได้เติมเชื้อค่อนข้างไม่เสถียร เช่น ในรอบการเดินระบบที่ 66 จุลินทรีย์กลับไม่ผลิตพีเอชเอ ซึ่งต่างจากถังปฏิกรณ์ที่เติม *T. mechernichensis* ที่อัตราส่วนที่ 97.5:2.5 และ 75:25 ที่มีการผลิตพีเอชเออย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเติม *T. mechernichensis* จะช่วยลดระยะเวลาการปรับตัวและเพิ่มความเสถียรของการผลิตพีเอชเอในระบบได้ และการเติม *T. mechernichensis* เพียงแค่ 2.5% ก็เพียงพอต่อการกระตุ้นให้เกิดการผลิตพีเอชเอได้ดี โดยพีเอชเอที่ผลิตได้เป็นโพลีไฮดรอกซีบิวทิเรต (polyhydroxybutyrate, PHB)อย่างไรก็ตาม ในขณะนี้ยังไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจนถึงสาเหตุที่ระบบซึ่งมีการเติม *T. mechernichensis* เริ่มต้นเพียงแค่ 2.5% สามารถผลิตพีเอชเอได้ดีกว่าระบบซึ่งเติม *T. mechernichensis* เริ่มต้น 25% โดยผู้วิจัยยังอยู่ระหว่างการวิเคราะห์กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในแต่ละระบบเพิ่มเติม ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอาจเชื่อมโยงกับกลุ่มประชากรจุลินทรีย์อื่น ๆ ในระบบด้วย นอกเหนือจาก *T. mechernichensis* ที่อาจส่งเสริมการทำงานร่วมกัน

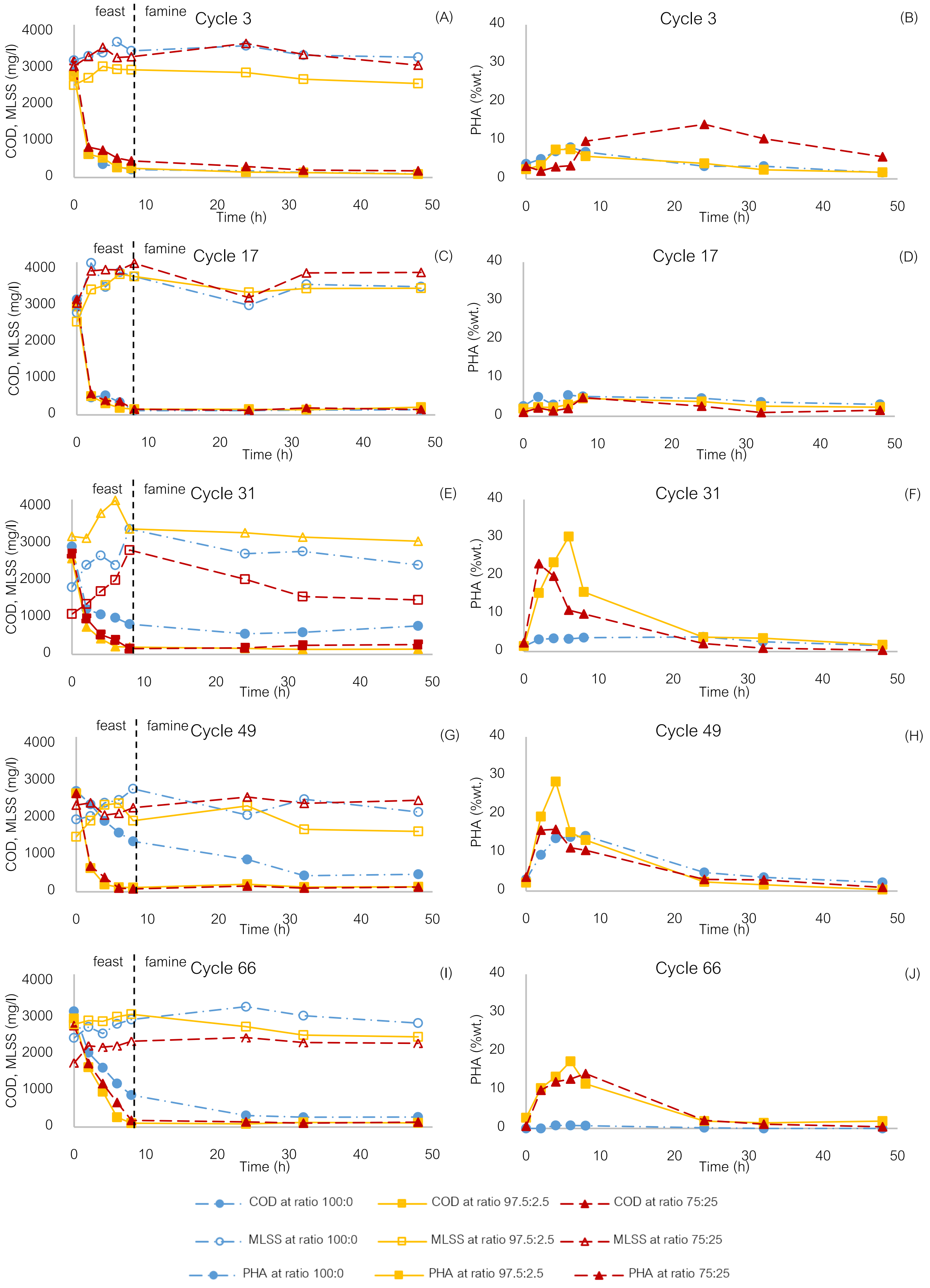


Fig. 2 COD and MLSS concentrations (A, C, E, G, I) and PHA contents (B, D, F, H, J) in 3rd, 17th, 31st, 49th, and 66th cycles of SBR operation

ทั้งนี้ การใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมยังคงมีจุดอ่อนที่สำคัญ คือ ความไม่คงที่ของระบบ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของการเดินระบบซึ่งยังอยู่ในระหว่างการคัดเลือกกลุ่มประชากรสำหรับการผลิตพีเอชเอ อย่างไรก็ตาม จากผลงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการเติม *T. mechernichensis* ช่วยให้การผลิตพีเอชเอมีประสิทธิภาพมากขึ้น และมีความคงที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติม *T. mechernichensis*

สรุปผล

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติม *T. mechernichensis* ลงในระบบที่ดำเนินการแบบมีอาหารเกินพอสลับกับขาดแคลน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งเทแล้ว พบว่าถังปฏิกรณ์ที่เติม *T. mechernichensis* ที่อัตราส่วน 97.5:2.5 สามารถกระตุ้นการผลิตพีเอชเอได้ดีที่สุด โดยในรอบการเดินระบบที่ 31 จะผลิตพีเอชเอได้ปริมาณ 30.2%wt ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ชนิดพีเอชบี จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้ทราบว่าการเติมจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตพีเอชเอลงไปในระบบจะช่วยกระตุ้นให้เกิดการผลิตพีเอชเอได้ และอาจนำไปประยุกต์ทดสอบกับน้ำเสียจริงเพื่อเป็นแนวทางวิจัยในระดับอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท ปทุมธานี บริวเวอรี่ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตะกอนจุลินทรีย์สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

นฤมล วรอิทธินันท์. 2557. ผลของแหล่งคาร์บอนต่อการผลิตโพลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอตของจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมโดยการให้อาหารแบบเกินพอสลับกับขาดแคลน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

American Public Health Association (APHA). 2003. Standard Method for the Examination of Water and Wastewaters, 21st ed. American Public Health Association. Washington, DC, USA.

Albuquerque, M.G.E., Torres, C.A.V., Reis, M.A.M. 2010. Polyhydroxyalkanoate (PHA) production by a mixed microbial culture using sugar molasses: Effect of the influent substrate concentration on culture selection. Water Res. 44: 3419–3433. doi.org/10.1016/j.watres.2010.03.021

Bhalerao, A., Banerjee, R., Nogueira, R. 2020. Continuous cultivation strategy for yeast industrial wastewater-based polyhydroxyalkanoate production. J. Biosci. Bioeng. 129: 595–602. doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.11.006

Carvalho, G., Oehmen, A., Albuquerque, M.G.E., Reis, M.A.M. 2014. The relationship between mixed microbial culture composition and PHA production performance from fermented molasses. New Biotechnology. 31: 257-263. doi.org/10.1016/j.nbt.2013.08.010

Jiang, Y., Marang, L., Kleerebezem, R., Muyzer, G., van Loosdrecht, M.C. 2011. Polyhydroxybutyrate production from lactate using a mixed microbial culture. Biotechnol. Bioeng. 108: 2022-2035. doi.org/10.1002/bit.23148

Johnson, K., Jiang, Y., Kleerebezem, R., Muyzer, G., van Loosdrecht, M.C. 2009. Enrichment of a Mixed Bacterial Culture with a High Polyhydroxyalkanoate Storage Capacity. Biomacromolecules 10: 670–676. doi.org/10.1021/bm8013796

Scholten, E., Lukow, T., Auling, G., Kroppenstedt, R.M., Rainey, F.A., Diekmann, H. 1999. *Thauera mechernichensis* sp. nov., an aerobic denitrifier from a leachate treatment plant. Int. J. Syst. Bacteriol. 49(3): 1045–1051. doi.org/10.1099/00207713-49-3-1045

Sruamsiri, D., Thayanukul, P., Suwannasilp, B.B. 2020. In situ identification of polyhydroxyalkanoate (PHA)-accumulating microorganisms in mixed microbial cultures under feast/famine conditions. Sci Rep. 10: 3752. doi.org/10.1038/s41598-020-60727-7

Sudesh, K., Abe, H., Doi, Y. 2000. Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: Biological polyesters. Prog. Polym. Sci. 25: 1503–1555. doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6

Wang, B., Sharma-Shivappa R. R., Olson, J.W., Khan, S.A. 2013. Production of polyhydroxybutyrate (PHB) by Alcaligenes latus using sugarbeet juice. Industrial Crops and Products 43: 802–811. doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.011

Woraittinun, N., Suwannasilp, B.B. 2017. Polyhydroxyalkanoate production from different carbon substrates using sludge from a wastewater treatment plant: Microbial communities, polymer compositions, and thermal characteristic. Environ. Prog. Sustain. Energy 3: 1754–1764. doi.org/10.1002/ep.12645

การผลิต 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอลจากซังข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชันที่ใช้สารละลายร่วมของอะซิโตไนไตรล์และน้ำโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก

Production of 5-hydroxymethylfurfural from corncobs by dehydration reaction using acetonitrile and water mixture with sulfuric acid and phosphoric acid catalyst

ฐานพัฒน์ พิมายกลาง[a], **เก้ากันยา สุดประเสริฐ**[a,*], **จักรกฤษณ์ เตชะอภัยคุณ**[b]

Thannapat Pimaiklang[a], Kaokanya Sudaprasert[a,*], Chakrit Tachaapaikoon[b]

[a]หลักสูตรเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[b]ศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีเอนไซม์และการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

[a]Energy Technology Program, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

[b]Excellent Center of Enzyme Technology and Microbial Utilization, Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi Bangkhuntien, Bangkok 10150, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kaokanya.sud@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิต 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล (5-HMF) จากน้ำตาลกลูโคสในซังข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่นโดยทำการศึกษาอิทธิพลของอะซิโตไนไตรล์กับน้ำ เวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ทำปฏิกิริยาร่วมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต 5-HMF คือ ที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 140 °C และ 45 นาที ตามลำดับ โดยใช้สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำเข้มข้น (80%v/v) และมีตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ทำปฏิกิริยาร่วมกับกรดฟอสฟอริก 2 โมลาร์ สามารถผลิต 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอลได้ (52.19±0.38%)

คำสำคัญ: ซังข้าวโพด, น้ำตาลกลูโคส, ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล

Abstract

This work aims to study the synthesis of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) from glucose in corncobs by dehydration reaction by investigating the influences of acetonitrile with water, concentration of phosphoric acid reacted with sulfuric acid, temperature and duration of reaction. From the results, it has been found that the optimum conditions for production 5-hydroxymethyl furfural are the reaction temperature at 140 degree Celsius and the duration of 45 min where the concentration of acetonitrile is (80%) by volume and 2 mol/L sulfuric acid is reacted with 0.2 mol/L phosphoric acid sulfuric acid, giving the yield of 5-hydroxymethyl furfural at (52.19±0.38%).

Keyword: 5-hydroxymethyl furfural, Corncobs, Glucose

คำนำ

ปัจจุบันพลังงานจากชีวมวลได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะซังข้าวโพดที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรซึ่งมีน้ำตาลกลูโคสประกอบอยู่มาก (Boonchuay et al., 2021) โดยทั่วไปแล้วชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) ประกอบด้วยเซลลูโลส (40–50%), เฮมิเซลลูโลส (25-35%) และลิกนิน (15–20%) (Tong et al., 2010) น้ำตาลที่ได้จากเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสสามารถนำมาผลิตเป็น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล (5-Hydroxymethylfurfural, 5-HMF) ซึ่ง 5-HMF นี้สามารถใช้ผลิตสารเคมีได้หลากหลายรวมไปถึงเชื้อเพลิงเหลว 2,5-ไดเมทิลฟูแรน (2,5-Dimethylfuran; DMF) ที่มีความหนาแน่นพลังงาน ค่าออกเทน และจุดเดือดที่สูงเมื่อเทียบกับการใช้เอทานอล (Yang et al., 2017) จึงจัดได้ว่า DMF เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จากชีวมวล โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนในการผลิต 5-HMF เริ่มจากน้ำตาลกลูโคสถูกเปลี่ยนเป็น 5-HMF โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดที่มีตำแหน่งว่องไวเป็นกรดบรอนเสตดผ่านปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชั่นเพื่อเปลี่ยนจากน้ำตาลกลูโคสให้กลายเป็นน้ำตาลฟรุกโตส ต่อจากนั้นน้ำตาลฟรุกโตสจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่มีตำแหน่งว่องไวเป็นกรดลิวอิสเพื่อเปลี่ยนเป็น 5-HMF (Pumrod et al., 2020) งานวิจัยของธันพงศ์ รัตตัญญู และคณะ (2565) ศึกษาการผลิต 5-HMF จากซังข้าวโพดพบว่าเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียวและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริก 0.2 โมลาร์ สามารถผลิต 5-HMF ได้ปริมาณ (0.84%) ซึ่งได้ผลผลิตน้อยมาก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีไฮเดรชั่นกับน้ำเกิดเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ เช่น กรดเลวูลินิก (Levulinic acid; LA) และกรดฟอร์มิก (Formic acid) อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile; MeCN) กับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) สามารถผลิต 5-HMF ได้ (20.17%) ที่อุณหภูมิ 120 °C เวลา 30 นาที ดังนั้นการพัฒนาการผลิต 5-HMF โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ที่มีสภาวะเป็นกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น จึงได้รับความนิยมในปัจจุบัน นอกจากนี้งานวิจัยของ Li et al., 2017 ศึกษาการผลิต 5-HMF จากน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเท่ากัน คือ 0.2 โมลาร์ และใช้สารละลายแกมมาวาเลอโรแลคโตนกับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) สามารถผลิต 5-HMF ได้สูงสุดที่ (52.99%) ที่อุณหภูมิ 140 °C เวลา 60 นาที อีกทั้งงานวิจัยของ Okano et al. (2013) ศึกษาการผลิต 5-HMF จากน้ำตาลฟรุกโตสโดยใช้สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำเนื่องจากอะซิโตไนไตรล์จัดเป็นสารละลายอินทรีย์ที่มีขั้วปานกลาง โดยเลือกใช้ความเข้มข้น (60–100%v/v) พบว่าความเข้มข้น (87%v/v) ที่เร่งปฏิกิริยาด้วยกรดไฮโดรคลอริก สามารถผลิต 5-HMF มากที่สุดคิดเป็น (77%) เนื่องจากแกมมาวาเลอโรแลคโตนและอะซิโตไนไตรล์เป็นสารละลายซึ่งทำหน้าที่ลดความมีขั้ว (Polarity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของน้ำลงมา เพื่อให้สารที่มีขั้วต่ำสามารถละลายได้ อีกทั้งงานวิจัยของ Sansuk and Subsadsana (2019) ใช้สารตั้งต้นคือน้ำตาลกลูโคส มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสาร H-Beta Zeolite 1 กรัม มาปรับสภาพด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ แล้วนำมาละลายใน Tetrahydrofuran/H_2O/NaCl ในเครื่องเตาปฏิกรณ์ สามารถสังเคราะห์ 5-HMF ได้มากที่สุดที่ (54%) ที่อุณหภูมิ 150 °C เวลา 90 นาที แต่มีข้อเสียคือต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการปรับสภาพซังข้าวโพดด้วยสารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริกเพื่อเพิ่มผลผลิต 5-HMF เมื่อเปรียบเทียบกับใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียว และลดต้นทุนการผลิตเมื่อเทียบกับการใช้สารละลายชนิดกรดแบบวิวิธพันธ์ เช่น ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide; DMSO) และเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran; THF) เป็นต้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

ซังข้าวโพดจากพื้นที่ทำการเกษตรในจังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย ตำแหน่ง GPS 12.816561, 99.94166 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.4 มิลลิเมตร, น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) สารเคมียี่ห้อ Merck, Germany ประกอบด้วยกรดซัลฟิวริก (95–97%), กรดฟอสฟอริก (85%), อะซิโตไนไตรล์ และเมทานอล

การเตรียมตัวอย่างซังข้าวโพด

ซังข้าวโพดที่ทำความสะอาดแล้วถูกนำไปไปตากแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (T-BOTA รุ่น QM-3SP4, China) หลังจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 40 ขนาดเฉลี่ย 0.4 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรง (Cisa RP200N Serial No.01738, Spain)

การตรวจสอบองค์ประกอบของซังข้าวโพด

องค์ประกอบทั้งหมดของซังข้าวโพดวิเคราะห์โดยอ้างอิงวิธีการตาม The National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Sluiter et al., 2008) เป็นการนำสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (72%v/v) เติมลงไปในซังข้าวโพด ที่อุณหภูมิห้อง 30±2 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเจือจางสารละลายกรดซัลฟิวริกเหลือความเข้มข้น (4%v/v) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจึงคำนวณเป็นระดับน้ำตาลกลูโคส, ไซโลส และอะราบิโนส ตามลำดับ โดยกลูโคส, ไซโลส และอะราบิโนสถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) ด้วย Refractive index detector (RID-10A; Hitachi Co.,Ltd., Japan) โดยใช้ Biorad Aminex HPX-87P column ซึ่งใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 4.0 มิลลิโมลาร์ เป็นสารชะล้าง อัตราการไหล 0.6 mL/min ที่อุณหภูมิ 60°C และลิกนินที่ละลายน้ำกับลิกนินที่ไม่ละลายน้ำถูกทดสอบโดยวิธี Klason lignin ตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์ของ National Renewable Energy Laboratory (Kuntapa et al., 2021)

ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของซังข้าวโพดที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน

องค์ประกอบของซังข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนแสดงในตารางที่ 1 เป็นซังข้าวโพดล็อตเดียวกันกับที่ผู้วิจัยนำมาศึกษาการผลิต 5-HMF จากซังข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่นที่ใช้สารละลายของอะซิโตไนไตรล์และน้ำโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส (39.31±0.33%), เฮมิเซลลูโลส (35.26±0.29%) และลิกนิน (19.19±0.41%) (Kuntapa et al., 2021)

Table 1 Composition of untreated corncobs (dry basis), n = 3 (Kuntapa et al., 2021)

Corncobs	Component (%)
Cellulose	39.31±0.33
Hemicellulose	35.26±0.29
Total lignin	19.19±0.41
Insoluble lignin	14.81±0.19
Acid-soluble lignin	4.91±0.33
Other	6.24±0.17

การวิเคราะห์ 5-HMF และผลผลิตภัณฑ์พลอยได้ LA ในสารละลายตัวอย่างด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC)

การวิเคราะห์ 5-HMF ด้วยเทคนิค HPLC ชนิดวัฏภาคย้อนกลับ (Reverse phase column) โดยใช้คอลัมน์ขนาด 4.6x150 mm ที่บรรจุด้วยคาร์บอน 18 ขนาดอนุภาค 5 μm (SunFire, Ireland) โดยมีเฟสที่เคลื่อนที่ คือ เมทานอล (สารละลาย C) น้ำปราศจากไอออน (สารละลาย A) ที่อัตราส่วน 40:60 ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งใช้ความยาวคลื่น 280 nm อัตราการไหล 0.6 mL/min

การวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์พลอยได้ LA ด้วยเครื่อง HPLC ชนิดวัฏภาคย้อนกลับ (Reverse phase column) โดยใช้คอลัมน์ขนาด 4.6x150 mm ขนาดอนุภาค 5 μm (Newcrom BH, U.S.A.) โดยมีเฟสที่เคลื่อนที่ คือ อะซิโตไนไตรล์ (สารละลาย A) กรดฟอสฟอริก (สารละลาย B) และน้ำปราศจากไอออน (สารละลาย C) ที่อัตราส่วน 20:0.05:19.95 ในสภาวะอุณหภูมิห้อง โดยใช้ความยาวคลื่น 210 nm อัตราการไหล 1 mL/min

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐาน 5-HMF และ LA (Sigma Aldrich, U.S.A.) ทั้งหมด 5 ความเข้มข้นที่บรรจุในหลอดไมโครทิวบ์ 1.5 mL ประกอบด้วย 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 โมลาร์ รวมถึงสารละลายตัวอย่างที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยาการผลิต 5-HMF แล้วจึงนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเขย่าสาร (Scientific Industries, U.S.A.) แล้วใส่ลงไปใน vial 2 mL ที่บรรจุ Micro insert จากนั้นทำการปิเปตสารละลาย 100 μL โดยในส่วนของสารละลายมาตรฐานทั้ง 5 ความเข้มข้นใช้สำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) จากนั้นทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค HPLC และคำนวณค่า %HMF Yield, %LA Yield (Cai et al., 2017) ตาม Equation 1 และ Equation 2 ตามลำดับ

$$\%\text{HMF Yield} = \frac{\text{Peak area}}{m_1} \times \frac{1}{\%\text{Glucose}} \qquad (1)$$

โดยที่ Peak area คือ มาจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC ของสารละลายตัวอย่าง

m_1 คือ ค่าความชันได้จากการสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของ 5-HMF

%Glucose คือ ค่าร้อยละของกลูโคสในซังข้าวโพดที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC

$$\%\text{LA Yield} = \frac{\text{Peak area}}{m_2} \times \frac{1}{\%\text{Glucose}} \qquad (2)$$

โดยที่ Peak area คือ มาจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC ของสารละลายตัวอย่าง

m_2 คือ ค่าความชันได้จากการสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของ LA

%Glucose คือ ค่าร้อยละของกลูโคสในซังข้าวโพดที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC

การเตรียมตัวอย่าง

ชั่งซังข้าวโพดปริมาณ 1.6 กรัม ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 5 ตำแหน่ง (EX125; OHAUS, U.S.A.) ใส่ลงไปในหลอดฟอลคอนขนาด 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นใส่สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) และใช้น้ำปราศจากไอออนเพียงอย่างเดียวเป็นตัวทำละลาย โดยปล่อยให้สารละลายทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมีปริมาตรรวมทั้งหมดเป็น 40 มิลลิลิตร แล้วจึงนำเข้าตู้อบลมร้อน (Memmert UF100, Germany) ที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 30 นาที (ธันพงศ์ และคณะ, 2565), (Li et al., 2017) และ (Sansuk & Subsadsana, 2019) ดังแสดงในตารางที่ 2 3 4 และ 5 ตามลำดับ

Table 2 Influence of co-solvent at 140 °C and reaction time 30 minutes

n = 3

Corncobs (grams)	Solvent concentration of MeCN (%v/v)	Catalyst	
		Concentration of H_2SO_4(mol/L)	Concentration of H_3PO_4(mol/L)
1.6	0	0.2	2
1.6	80	0.2	2

นำตัวอย่างที่ทำการปรับสภาพแล้วมาควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในตู้อบลมร้อนดังแสดงในตารางที่ 3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในระหว่างการทำปฏิกิริยาของสารละลายตัวอย่าง

Table 3 Influence of reaction time in a hot air oven at 140 °C for 30, 45 and 60 min

n = 3

Corncobs (grams)	Solvent concentration of MeCN (%v/v)	Catalyst		Temperature (°C)	Time (minutes)
		Concentration of H_2SO_4(mol/L)	Concentration of H_3PO_4(mol/L)		
1.6	80	0.2	2	140	30 45 60

นำตัวอย่างที่ศึกษาอิทธิพลของเวลามาแล้วมาควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในระหว่างการทำปฏิกิริยาของสารละลายตัวอย่างภายในตู้อบลมร้อน

Table 4 Influence of reaction temperature in a hot air oven at 130, 140, 150 and 160 °C

n = 3

Corncobs (grams)	Solvent concentration of MeCN (%v/v)	Catalyst		Temperature (°C)
		Concentration of H_2SO_4(mol/L)	Concentration of H_3PO_4(mol/L)	
1.6	80	0.2	2	130 140 150 160

นำตัวอย่างที่ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิมาแล้วมาปรับความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยากรดฟอสฟอริกดังแสดงในตารางที่ 5 เพื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยากรดฟอสฟอริกที่เหมาะสมที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก 0.2 โมลาร์

Table 5 Influence on 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 and 4 molar of phosphoric acid used as catalyst in combination with 0.2 molar of sulfuric acid

n = 3

Corncobs (grams)	Solvent concentration of MeCN (%v/v)	Catalyst	
		Concentration of H_2SO_4(mol/L)	Concentration of H_3PO_4(mol/L)
1.6	80	0.2	1 1.5 2 2.5 3 3.5 4

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลจากการทดลอง 3 ซ้ำ นำมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Version 26 ด้วยการหาค่า *t*-test ซึ่งระบุความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น (95%) ($p < .05$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการนำเสนอผลการผลิต 5-HMF จากซังข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่นโดยใช้สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก การวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย การศึกษาอิทธิพลของสารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำ เวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดฟอสฟอริก ดังนี้

การศึกษาอิทธิพลสารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก

สารตัวอย่างซังข้าวโพดเมื่อใส่สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) เทียบกับใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ทำปฏิกิริยาภายในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 30 นาที จากการวิเคราะห์ 5-HMF ด้วยเทคนิค HPLC พบว่าเมื่อใช้สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำสามารถผลิต 5-HMF ได้มากกว่าตัวทำละลายที่ใช้น้ำเพียงอย่างเดียวคิดเป็น (37.20±0.23%) เนื่องจากอะซิโตไนไตรล์ทำหน้าที่ลดสภาพขั้วหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำลงมาเพื่อให้สารที่มีขั้วต่ำละลายได้ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งสรุปได้ว่าการใช้สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำมีอิทธิพลในการสลายโครงสร้างของลิกนินเพื่อให้ได้เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ก่อนที่จะทำส่งเสริมปฏิกิริยาของกรดที่มีตำแหน่งว่องไวเป็นกรดบรอนเสตด คือ กรดซัลฟิวริก ผ่านปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชั่นเพื่อเปลี่ยนจากน้ำตาลกลูโคสให้กลายเป็นน้ำตาลฟรุกโตส สุดท้ายน้ำตาลฟรุกโตสเกิดปฏิกิริยาโอลิโกเมอไรเซชั่นและน้ำตาลกลูโคสเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดฟอสฟอริกเพื่อเปลี่ยนเป็น 5-HMF

Table 6 The results of the study on the effect of acetonitrile and water on the catalytic reaction between sulfuric acid and phosphoric acid

n = 3

Solvent	Temperature (˚C)	Reaction Time (Minutes)	Concentration of H_2SO_4(mol/L)	Concentration of H_3PO_4 (mol/L)	%5-HMF Yield
MeCN (80%v/v)	140	30	0.2	2	37.72±0.23**
DI	140	30	0.2	2	2.45±0.02**

**Means±*SD* in the same column followed by different superscripts is significantly different ($p < .01$).

การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการผลิต 5-HMF

ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เมื่อใส่สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ พบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิต 5-HMF เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที สามารถผลิต 5-HMF คิดเป็น (52.19±0.38%) มีค่าใกล้เคียงกับเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ซึ่งสามารถผลิต 5-HMF คิดเป็น (53.02±0.07%) ดังแสดงในตารางที่ 7 เมื่อทำการทดสอบด้วย Paired samples *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น (95%) พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 45 นาที เป็น 60 นาที ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า *p*-Value > .05 ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมและประหยัดเวลาต่อการทำปฏิกิริยาดีที่สุดคือ 45 นาที

Table 7 The results of the study on the influence of reaction time

n = 3

Solvent	Temperature (˚C)	Reaction Time (Minutes)	Concentration of H_2SO_4(mol/L)	Concentration of H_3PO_4 (mol/L)	%5-HMF Yield
MeCN (80%v/v)	140	30	0.2	2	37.72±0.23**
	140	45	0.2	2	52.19±0.38**
	140	60	0.2	2	53.02±0.07**

**Means±*SD* in the same column followed by different superscripts is significantly different ($p < .01$).

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการผลิต 5-HMF

ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาภายในตู้อบลมร้อนที่เวลา 45 นาที เมื่อใส่สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก 0.2 โมลาร์ และกรดฟอสฟอริก 2 โมลาร์ โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 130–160 ˚C พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่สามารถผลิต 5-HMF คืออุณหภูมิที่ 140–160 ˚C โดยผลการศึกษาอุณหภูมิที่ 140 ˚C สามารถผลิต 5-HMF ได้สูงสุดคิดเป็น (52.19±0.38%) จากนั้นเมื่อปรับอุณหภูมิเป็น 150 ˚C สามารถผลิต 5-HMF คิดเป็น (31.97±1.16%) และอุณหภูมิสุดท้ายที่ 160 ˚C สามารถผลิต 5-HMF ได้เพียง (5.14±0.87%) ดังแสดงในตารางที่ 8 ดังนั้นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิต 5-HMF อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ 5-HMF ถูกไฮโดรไลซ์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริกเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นกรดพอลิโปรติกจึงเกิดเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ คือ กรดเลวูลินิกและกรดฟอร์มิก นอกจากนี้เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160 ˚C พบว่าสารละลายเกิดการไหม้หลังสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาภายในตู้อบลมร้อน ซึ่งส่งผลให้ปริมาณกรดเลวูลินิกและกรดฟอร์มิกไม่ปรากฏ จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิต 5-HMF ที่ดีที่สุดในการทำปฏิกิริยาคือ 140 ˚C

Table 8 The results of the study on the influence of reaction temperature

n = 3

Reaction Time (Minutes)	Temperature (˚C)	%5-HMF Yield	%LA Yield	%Formic acid Yield
45	130	N/A	N/A	N/A
	140	52.19±0.38**	0.34±0.01**	5.45±0.30**
	150	31.97±1.16**	4.16±0.16**	2.94±0.13**
	160	5.14±0.87*	N/A	N/A

**Means±*SD* in the same column followed by different superscripts is significantly different ($p < 0.01$) and ($p < 0.05$) as depicted by a single asterisk (*). N/A data is not available.

การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกันกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ต่อการผลิต 5-HMF

ผลการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกตั้งแต่ 1–4 โมลาร์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกันกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ โดยใช้สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) ทำปฏิกิริยาภายในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เวลา 45 นาที พบว่าเมื่อปรับความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกสูงขึ้นจนถึง 2 โมลาร์ สามารถผลิต 5-HMF ได้มากกว่าความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 2 โมลาร์ คิดเป็น (52.19±0.38%) มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ คิดเป็น (52.72±0.08%) แต่เมื่อปรับความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกมากกว่า 2.5 โมลาร์ ส่งผลให้ 5-HMF ลดลง เนื่องจากปริมาณของสารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำลดลงหากปรับความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 9 ดังนั้นความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกจึงเป็นปัจจัยต่อการผลิต 5-HMF เมื่อทำการทดสอบด้วย Paired samples *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น (95%) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกจาก 2 โมลาร์ เป็น 2.5 โมลาร์ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเนื่องจากค่า p-Value > .05 จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 โมลาร์

Table 9 The results of the study on the influence of phosphoric acid concentration used as a catalyst together with 0.2 molar concentrated sulfuric acid

n = 3

Solvent	Temperature (°C)	Reaction Time (Minutes)	Concentration of H_2SO_4(mol/L)	Concentration of H_3PO_4 (mol/L)	%5-HMF Yield
				1	6.01±0.03**
				1.5	44.55±0.16**
				2	52.19±0.38**
MeCN (80%v/v)	140	45	0.2	2.5	52.72±0.08**
				3	49.39±0.42**
				3.5	47.88±0.08**
				4	50.02±1.68**

**Means±*SD* in the same column followed by different superscripts is significantly different ($p < .01$).

สรุปผล

การผลิต 5-HMF จากซังข้าวโพดโดยใช้สารละลายอะซิโตไนไตรล์กับน้ำที่ความเข้มข้น (80%v/v) ด้วยการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 45 นาที ให้ผลผลิตของ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอลมากที่สุดที่ (52.19±0.38%) และการใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอลลดน้อยลงเนื่องจาก 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอลถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นผลผลิตภัณฑ์พลอยได้อย่างอื่น เช่น กรดเลวูลินิก และกรดฟอร์มิก

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ.2566 ภายใต้รหัสโครงการ FRB660073/0164 (แผนงาน พลังงานและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน)

เอกสารอ้างอิง

ธันพงศ์ รัตตัญญู, จักรกฤษณ์ เตชะอภัยคุณ, และเก้ากันยา สุดประเสริฐ. (27–29 ตุลาคม 2565). การผลิต 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล (HMF) จากซังข้าวโพดโดยการใช้กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริกร่วมกับสารละลายอะซิโตไนไตรล์ [Paper Presentation]. การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.

Boonchuay, P., Techapun, C., Leksawasdi, N., Seesuriyachan, P., Hanmoungjai, P., Watanabe, M., Srisupa, S., Chaiyaso, T. 2021. Bioethanol Production from Cellulose-Rich Corncob Residue by the Thermotolerant Saccharomyces Cerevisiae TC-5. Journal of Fungi. 7: 547. doi.org/10.3390/jof7070547

Cai, C., Liu, Q., Tan, J., Wang, T., Zhang, Q., Ma, L. 2017. Conversion of Cellulose to 5-Hydroxymethylfurfural Using Inorganic Acidic Catalysts in the Presence of Pressurized Water Steam. BioRes. 12: 1201–1215. doi.org/10.15376/biores.12.1.1201–1215

Kuntapa, M., Sudaprasert, K., Tachaapaikoon, C. 2021. Pretreatment of corn cobs using 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate and dimethyl sulfoxide to enhance enzymatic saccharification. Biomass Conversion and Biorefinery 1–12. doi.org/10.1007/s13399-021-01702-8

Kuster, B.F.M. 1990. 5-Hydroxymethylfurfural (HMF). A review focussing on its manufacture. Starch-Stärke. 42: 314–321. doi.org/10.1002/star.19900420808

Li, M., Li, W., Lu, Y., Jameel, H., Chang, H., Ma, L. 2017. High conversion of glucose to 5-ydroxymethylfurfural Using hydrochloric acid as a catalyst and sodium chloride as a promoter in a water/γ-Valerolactone system. RSC Advances. 7: 14330. doi.org/10.1039/C7RA00701A

Okano, T., Qiao, K., Bao, Q., Tomida, D., Hagiwara, H., Yokoyama C. 2013. Dehydration of Fructose to 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) in an aqueous acetonitrile biphasic system in the presence of acidic ionic liquids. Applied Catalysis A: General. 451: 1–5. doi.org/10.1016/j.apcata.2012.11.004

Pumrod, S., Kaewchada, A., Roddecha, S., Jaree, A. 2020. Synthesis of 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) from glucose using ion exchange resin and aluminium oxide as catalysts in a biphasic system. RSC Advances. 10: 9492–9498. doi.org/10.1039/C9RA09997B

Sansuk, S., Subsadsana, M. 2019. Synthesis of 5-hydroxymethylfurfural from glucose using h-beta catalyst treated with phosphoric acid in one-pot biphasic solvent system. Energy Sources. 41: 2769–2777. doi.org/10.1080/15567036.2019.1576072

Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker, D. 2008. Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. Laboratory Analytical Procedure. 1617: 1–16.

Tong, X., Ma, Y., Li, Y. 2010. Biomass into chemicals: Conversion of sugars to furan derivatives by catalytic processes. Applied Catalysis A: General. 385: 1–13. doi.org/10.1016/j.apcata.2010.06.049

Yang, Y., Liu, Q., Li, D., Tan, J., Zhang, Q., Wang, C., Ma, L. 2017. Selective hydrodeoxygenation of 5-hydroxymethylfurfural to 2,5-dimethylfuran on Ru–MoO_x/C catalysts. RSC Advances. 7: 16311. doi.org/10.1039/C7RA00605E

การศึกษารูปแบบการอุดตันเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสสำหรับบำบัดไดโคลฟีแนคในน้ำสังเคราะห์

Study of fouling characteristics on reverse osmosis membrane during treatment of diclofenac in synthetic water

อิสรีย์ สนธิรัตน์*, ชลอ จารุสุทธิรักษ์, ปวีร์ คล่องเวสสะ

Issaree Sonthiratana*, Chalor Jarusutthirak, Pawee Klongvessa

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environment Technology and Management, Faculty of Environmental, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: issaree.son@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกักกันไดโคลฟีแนคในน้ำสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองชนิดรีเวอร์สออสโมซิสและการลดลงของค่าฟลักซ์ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความดัน (40, 60 psi) ค่าพีเอช (3 7 และ 9) และความเข้มข้นเริ่มต้นของไดโคลฟีแนค (1 20 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการทดลองพบว่า ที่ความดัน 40 และ 60 psi ค่าการกักกันใกล้เคียงกัน ได้แก่ 61.90% และ 60.70% ตามลำดับ ที่พีเอช 7 และ 9 ค่าการกักกัน 61.92% และ 63.07% ตามลำดับซึ่งสูงกว่าที่พีเอช 3 (55.96%) การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไดโคลฟีแนคส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักกันลดลง ที่สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความดัน 40 psi พีเอช 7 และความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกักกันไดโคลฟีแนค 98.86% เมื่อเดินระบบ 180 นาที โดยอาศัยกลไกการคัดแยกด้วยขนาดและแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต การศึกษารูปแบบการอุดตันด้วยแบบจำลองอนุกรมความต้านทานพบว่าการลดลงของค่าฟลักซ์ส่วนใหญ่เกิดจากความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{CP}) เนื่องจากการสะสมตัวของสารที่ถูกกักกันบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

คำสำคัญ: ไดโคลฟีแนค, การลดลงของค่าฟลักซ์, การอุดตัน, รีเวอร์สออสโมซิส

Abstract

This research studied the rejection efficiency and flux decline in treatment of diclofenac containing in synthetic water using reverse osmosis membranes. Factors affecting rejection efficiency and flux decline, including transmembrane pressure (40, 60 psi), pH (3 7 and 9), and initial concentration (1, 20 and 50 mg/L), were investigated the results showed that at transmembrane pressures of 40 and 60 psi, the rejection efficiencies were similar, i.e. 61.90% and 60.70%, respectively. At pH of 7 and 9, the rejection efficiencies were 61.92% and 63.07%, respectively, higher than that at pH of 3 (55.96%). An increase of initial concentration led to the decrease of rejection efficiency. At optimum condition, i.e., transmembrane pressure of 40 psi, pH of 7, and initial concentration of 1 mg/L, the rejection efficiency was found to be up to 98.86%. Major contribution of rejection mechanisms were size exclusion and electrostatic repulsion effects. Characteristics of membrane fouling were studied by using resistance-in-series model. It was found that the main resistance causing flux decline was the resistance from concentration polarization (R_{CP}) caused by an accumulation of rejected materials nearby membrane surface.

Keywords: Diclofenac, Flux decline, Fouling, Reverse Osmosis

คำนำ

ไดโคลฟีแนค (Diclofenac) มีสูตรทางเคมีคือ 2-(2-(2,6-Di chlorophenyl amino)phenyl)acetic acid (DCF) เป็นยาในกลุ่มยาต้านการอักเสบของร่างกายที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ (Non-steroidal anti-inflammatory drugs: NSAIDs) ช่วยบรรเทาอาการปวด บวมจากการอักเสบ ปวดตามข้อ ไขข้อกระดูก ปัจจุบันไดโคลฟีแนคถูกจัดเป็นยาในบัญชียาหลักแห่งชาติ ทำให้มีปริมาณการใช้สูง เมื่อรับประทานร่างกายสามารถดูดซึมไดโคลฟีแนคได้ 100% จากนั้นถูกขับออกทางปัสสาวะประมาณ 65–70% ในรูปของสารออกฤทธิ์เดิมและสารเมทาบอไลต์ (metabolites) ที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของร่างกาย (Vieno and Sillanpää, 2014) จึงมีโอกาสปนเปื้อนในน้ำเสียชุมชนได้ นอกจากนั้นยังพบไดโคลฟีแนคจากโรงบำบัดน้ำเสีย น้ำทิ้งจากโรงพยาบาลและจากอุตสาหกรรมผลิตยาด้วย เนื่องจากไดโคลฟีแนคถูกย่อยสลายทางชีวภาพระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้น้อยทำให้ปริมาณไดโคลฟีแนคยังคงหลงเหลือในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งนำไปสู่การปนเปื้อนแหล่งน้ำธรรมชาติและเกิดอันตรายต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้นได้ (Vieno and Sillanpää, 2014) ดังนั้น จึงควรมีการบำบัดยาไดโคลฟีแนคและอนุพันธ์ที่ยังตกค้างในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมก่อนการระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการบำบัดยาไดโคลฟีแนคที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต และ กระบวนการโอโซเนชัน อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัด คือ ค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับการวิธีการบำบัดสารวิธีอื่น รวมทั้งโอกาสเกิดผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ที่ไม่ต้องการจากกระบวนการออกซิเดชัน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดี แต่มีอายุการใช้งานที่จำกัดและค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือการรีเจนเนอเรทตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพแล้ว กระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis: RO) เป็นวิธีที่มีความเป็นไปได้ในการบำบัดสารไดโคลฟีแนค เนื่องจากมีกลไกการกักกันที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากขนาดรูพรุนของเยื่อกรองที่มีขนาดเล็กทำให้สามารถกักกันโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.0001 ไมครอน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ไดโคลฟีแนคมีโมเลกุลขนาดใหญ่ (น้ำหนักโมเลกุล 296.15 กรัมต่อโมล) ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสสามารถกักกันไดโคลฟีแนคได้ถึง 90-99% (Mehrdad et al., 2016) นอกจากนี้ น้ำที่ผ่านการกรองมีความบริสุทธิ์สูงสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการใช้เยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสได้แก่การอุดตันบนเยื่อกรอง (Membrane fouling) ส่งผลให้เยื่อกรองเสื่อมสภาพ และค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลง ได้ปริมาณน้ำน้อย จำเป็นต้องทำความสะอาดบ่อยครั้งขึ้น ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (จตุพล และคณะ, 2561) การอุดตันเยื่อกรองออสโมซิสระหว่างการกรองสารสามารถเกิดขึ้นได้ในหลายลักษณะ ได้แก่ การเกิดชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน การเกิดชั้นเจล การเกิดชั้นเค้ก เป็นต้น (Cho et al., 2000) การศึกษากลไกการอุดตันสามารถนำไปสู่แนวทางการป้องกันการอุดตันและการทำความสะอาดเยื่อกรองที่เหมาะสมนำไปสู่การยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสในการกักกันไดโคลฟีแนคในน้ำสังเคราะห์ รวมทั้งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักกันและค่าฟลักซ์เพอร์มิเอท ได้แก่ ความดันที่ใช้เดินระบบ (40 และ 60 psi) ความเข้มข้นของยาไดโคลฟีแนค (1 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และค่าพีเอชของสารละลาย (3 7 และ 9) รวมทั้งศึกษาการลดลงของค่าฟลักซ์ (Flux decline) ที่เกิดจากการอุดตันในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model) เพื่อศึกษาลักษณะการอุดตันของเยื่อกรอง ผลจากงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดการปนเปื้อนของไดโคลฟีแนคหรือสารปฏิชีวนะอื่น ๆ รวมทั้งน้ำที่ผ่านเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งการทราบถึงกลไกการอุดตันยังสามารถนำไปสู่แนวทางการป้องกัน แก้ไขการอุดตันของเยื่อกรอง และยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรองต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การติดตั้งระบบเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส

ระบบเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสประกอบด้วย หน่วยทดสอบชนิด dead-end stirred cell (ยี่ห้อ Amicon, USA.) ขนาดความจุ 200 มิลลิลิตร พื้นที่กรอง 0.00287 ตารางเซนติเมตร ภายในมีแกนแม่เหล็กสำหรับปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที (rpm) ต่อเข้ากับถังเก็บน้ำป้อน (Feed reservoir) ทำจากสแตนเลสสตีล ความจุ 10 ลิตร มีเกจวัดความดันภายในถัง ใช้ก๊าซไนโตรเจนสำหรับให้แรงดันแก่ระบบดังแสดงใน Fig. 1 เยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสที่ใช้ (ยี่ห้อFujitec) ผลิตจากวัสดุโพลิเอไมด์ มีขนาดรูพรุน 0.0001 ไมครอน ในการทดลองเยื่อกรองถูกตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.2 เซนติเมตร และเก็บรักษาในสารละลายโซเดียมเมตะไบซัลไฟต์ ความเข้มข้น 1% ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยก่อนการใช้งานมีล้างเยื่อกรองด้วยน้ำอาร์โอ จากนั้นล้างด้วยกรดโดยแช่ในสารละลายกรดซิตริก ($C_6H_8O_7.H_2O$) เข้มข้น 2% ปริมาตร 150 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำอาร์โออีกครั้ง ก่อนนำมาล้างด้วยเบสโดยแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1% ปริมาตร 150 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที และล้างด้วยน้ำอาร์โออีกครั้ง ก่อนนำไปติดตั้งที่หน่วยทดสอบ dead-end stirred cell เพื่อเริ่มใช้งาน

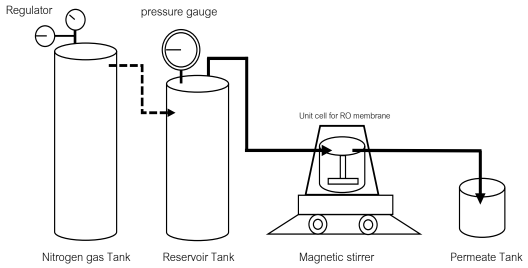


Fig. 1 Schematic diagram of reverse osmosis membrane filtration system

การเตรียมน้ำตัวอย่าง

น้ำสังเคราะห์ที่ใช้การทดลอง เตรียมจากการผสมยาไดโคลฟีแนคในปริมาณความเข้มข้นที่ต้องการกับน้ำอาร์โอ แล้วนำน้ำที่ผสมแล้วไปผ่านกระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองขนาด 0.45 ไมครอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่อาจรบกวนปัจจัยศึกษา ก่อนนำมาทำการทดลองทุกครั้ง

การศึกษาประสิทธิภาพการกักกันและการลดลงของฟลักซ์

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบรีเวอร์สออสโมซิสแสดงดัง Table 1

Table 1 Factors investigated and control parameters

Factors	Value	Control parameter
1. Pressure (psi)	40, 60	pH 7 and DCF conc. 20 mg/L
2. Diclofenac concentration(mg/L)	1, 20, 50	pH 7 and pressure 40 psi
3. pH	3, 7, 9	DCF conc. 20 mg/L and pressure 40 psi

การคำนวณค่าฟลักซ์ดัง Equation 1:

$$J = \frac{V}{A.t} \quad (1)$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทของน้ำตัวอย่าง (L/m^2.min), V = ปริมาตรของเพอร์มิเอท (L), A = พื้นที่ผิวเยื่อกรอง (m^2) และ t = เวลา (min)

การเดินระบบและการเก็บตัวอย่าง

การเดินระบบเริ่มจากการเดินระบบด้วยน้ำอาร์โอเพื่อวัดค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอท (Permeate flux) โดยวัดปริมาตรน้ำเพอร์มิเอท ทุก 1 นาที ภายใน 20 นาทีแรก ทุก ๆ 10 นาที ภายใน 1 ชั่วโมงต่อมา และ ทุก ๆ 15 นาที จนกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอทคงที่ จากนั้นทำการเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่าง โดยเติมน้ำตัวอย่างปริมาตร 2 ลิตรในถังเก็บน้ำป้อน เดินระบบและเก็บตัวอย่างน้ำเพอร์มิเอทตามช่วงเวลาที่กำหนดจนสิ้นสุดการเดินระบบที่ 180 นาที เพื่อศึกษาหาค่าฟลักซ์ที่ลดลง (Flux decline) นอกจากนี้มีการนำตัวอย่างน้ำที่เก็บทุกๆ 15 นาที มาวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นไดโคลฟีแนค ด้วยวิธีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร (Javier et al., 2010) ด้วยเครื่อง UV-visible spectrometer รุ่น Cary 60 UV-Vis บริษัท Agilent Technologies โดยมีค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดยาไดโคลฟีแนค (Katanchalee et al., 2017) ตาม Equation 2

$$R= \left(1-\frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ R = เปอร์เซ็นต์การกักกัน, C_p = ความเข้มข้นของไดโคลฟีแนคในน้ำเพอร์มิเอท และ C_f = ความเข้มข้นของไดโคลฟีแนคในน้ำป้อน

การศึกษาแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model)

แบบจำลองอนุกรมความต้านทานแสดงรูปแบบความต้านทานในเชิงอนุกรมที่สัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอท (Permeate flux) และแรงดันผ่านเยื่อกรอง โดยอาศัยหลักการตามกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ที่ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าการไหลขึ้นอยู่กับแรงดันผ่านเยื่อกรองและความต้านทานที่เกิดขึ้น ดังแสดงใน Equation 3 (Jiraratananon and Chanachai, 1996) เมื่อมีการเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่าง การอุดตัน (Fouling) ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความต้านทานชนิดต่าง ๆ ของระบบเยื่อกรอง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทลดลง ซึ่งรูปแบบการอุดตันที่ส่งผลต่อความต้านทานของระบบ แสดงดัง Equation 4

$$R_t = \frac{\Delta P}{\mu.(J_v)} \quad (3)$$

$$R_t = r_m + r_{cp} + r_g + r_c + r_{ir} \quad (4)$$

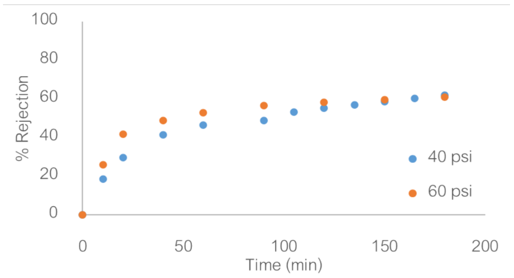
โดยที่ J_v คือ ค่าอัตราการไหล (L.m^{-2}.h^{-1}.kPa^{-1}) ΔP คือ ค่าความดันที่ให้แก่ระบบ (kPa), μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s) R_t คือ ความต้านทานรวม (m^{-1}) ซึ่งประกอบด้วย r_m คือความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง (m^{-1}) r_{cp} คือความต้านทานคอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (m^{1}) r_g คือความต้านทานจากชั้นเจล (m^{-1}) r_c คือความต้านทานจากชั้นเค้ก (m^{-1}) และ r_{ir} คือความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้ (m^{-1})

การทดสอบหาค่าความต้านทานที่บ่งชี้รูปแบบของการอุดตันเยื่อกรองซึ่งเกิดขึ้นจากการกำจัดไดโคลฟีแนคในน้ำสังเคราะห์ ทำโดยเดินระบบเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสด้วยน้ำตัวอย่างครบเวลาที่กำหนดแล้วทำการหยุดระบบ จากนั้นทำความสะอาดด้วยการเดินระบบด้วยน้ำอาร์โอ (hydrodynamic cleaning) เป็นเวลา 30 นาที และวัดฟลักซ์เพอร์มิเอท ขั้นตอนนี้เป็นการลดความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (r_{cp}) จากนั้นทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยกรดซิตริก ($C_6H_8O_7.H_2O$) เข้มข้น 2% เป็นเวลา 30 นาที และล้างด้วยน้ำอาร์โอ 30 นาที ทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอท ซึ่งเป็นการลดการอุดตันที่เกิดจากสารอนินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นชั้นเจล (r_g) จากนั้นทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1% เป็นเวลา 30 นาทีและล้างด้วยน้ำอาร์โอ 30 นาที วัดค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอท ซึ่งเป็นการลดความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันด้วยสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นชั้นเค้ก(r_c) คงเหลือไว้แต่ค่าความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้ (r_{irr})

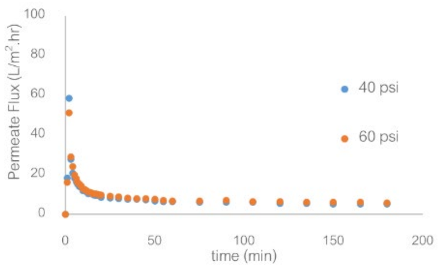
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการกักกันและการลดลงของฟลักซ์

การศึกษาผลของความดันต่อประสิทธิภาพการกักกันไดโคลฟีแนคในน้ำสังเคราะห์ด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส ทำการแปรค่าความดันที่ใช้ในการเดินระบบที่ 40 และ 60 psi โดยเดินระบบด้วยความเข้มข้นไดโคลฟีแนคเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะ พีเอช 7 ที่เวลา 180 นาที ผลการทดลองแสดงดัง Fig. 2a การกักกันไดโคลฟีแนคของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสที่ความดันทั้งสองค่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันคือ 61.90% และ 60.70% ตามลำดับ เนื่องจากกลไกการกักกันด้วยขนาด โดยมวลโมเลกุลของไดโคลฟีแนคมีขนาด 296 กรัมต่อลิตร และขนาดรูพรุนของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสที่สามารถกักกันโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.0001 ไมครอนได้ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความดันไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักกันไดโคลฟีแนคอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ความดันมีผลต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทเมื่อความดัน 60 psi ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทสูงกว่าความดัน 40 psi อยู่ที่ 5.13 และ 4.99 L/m^2h ตามลำดับที่ 120 นาทีซึ่งเป็นไปตามกฎของดาร์ซี เมื่อพิจารณาการลดลงของฟลักซ์ดัง Fig.2b พบว่าการเดินระบบด้วยความดันทั้งสองค่าให้แนวโน้มการลดลงของฟลักซ์ที่เป็นไปในรูปแบบเดียวกัน โดยในช่วง 20 นาทีแรก ค่าการลดลงของฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่หลักจาก 60 นาที เมื่อทั้งนี้เนื่องจากน้ำป้อนระบบที่ใช้เป็นเพียงน้ำสังเคราะห์ที่เติมเฉพาะยาไดโคลฟีแนคเท่านั้น รูปแบบการอุดตันบนเยื่อกรองจึงมีลักษณะเดียวกัน ในการศึกษาขั้นต่อไปควรคำนึงถึงผลกระทบของสารปนเปื้อนอื่นที่มีโอกาสพบได้ในน้ำทิ้งชุมชน เช่น สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (Effluent Organic Matters: EfOM) และของแข็งละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids: TDS) เพื่อเปรียบเทียบผลของสารปนเปื้อนดังกล่าวต่อรูปแบบการอุดตันบนเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส



(a) % rejection

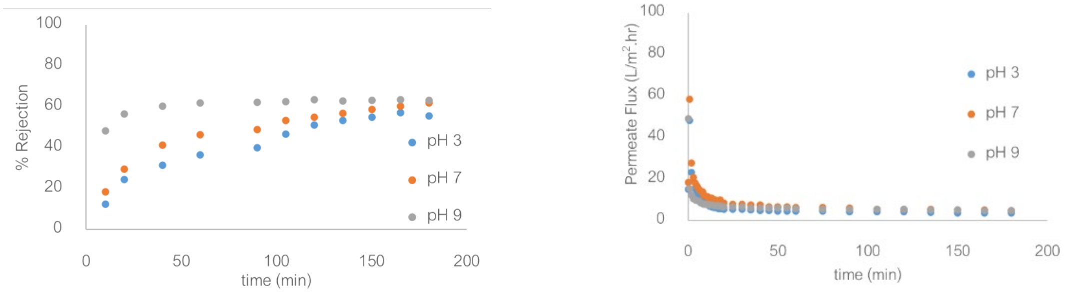


(b) permeate flux

Fig. 2 Effect of transmembrane pressure on diclofenac rejection and permeate flux during filtration by reverse osmosis membrane (diclofenac concentration = 20 mg/L and pH = 7)

ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกักกันและการลดลงของฟลักซ์

การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกักกันไดโคลฟีแนค ทำการแปรค่าพีเอชของน้ำป้อนระบบที่ 3 7 และ 9 และเดินระบบด้วยความเข้มข้นไดโคลฟีแนคเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความดัน 40 psi ที่เวลา 180 นาที ผลการทดลองแสดงดัง Fig. 3a ประสิทธิภาพการกักกันไดโคลฟีแนคมีค่า 55.96% 61.92% และ 63.07% สำหรับน้ำป้อนระบบที่มีค่าพีเอช 3 7 และ 9 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ในสภาวะสารละลายเป็นเบส ที่พีเอช 9 ประสิทธิภาพในการกักกันสูงกว่าในสภาวะกลางและกรด ทั้งนี้เนื่องจากไดโคลฟีแนคมี ค่า pKa เท่ากับ 4.1 เมื่อค่าพีเอชสูงกว่าค่า pKa โมเลกุลของสารไดโคลฟีแนคซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน คาร์บอกซิลิกเสียโปรตอนทำให้มีประจุสุทธิเป็นลบ ในขณะที่เยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสมีค่าจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) ที่ พีเอช 6 เมื่อเยื่อกรองอยู่ในสารละลายที่เป็นเบส พื้นผิวของเยื่อกรองมีความเป็นประจุลบมากขึ้นเช่นกันที่สภาวะพีเอชดังกล่าว ประสิทธิภาพการกักกันนอกจากจะเกิดจากกลไกการคัดแยกด้วยขนาด (Size exclusion) แล้ว ยังมีโอกาสเกิดจากกลไกของแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ระหว่างโมเลกุลไดโคลฟีแนคและพื้นผิวเยื่อกรอง ส่งผลให้การกักกันไดโคลฟีแนค ด้วยเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Park and Kwon, 2018) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองนี้ดำเนินการด้วยหน่วยทดสอบแบบ Dead-end stirred cell unit สารที่เยื่อกรองกักกันยังคงสะสมตัวของบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองมีค่าสูงจากปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน รวมทั้งการสะสมตัวของสาร ไดโคลฟีแนคที่ผิวหน้าหรือภายในรูพรุนของเยื่อกรอง ซึ่งมีส่วนทำให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอท ลดลงได้ ดังแสดงใน Fig. 3b

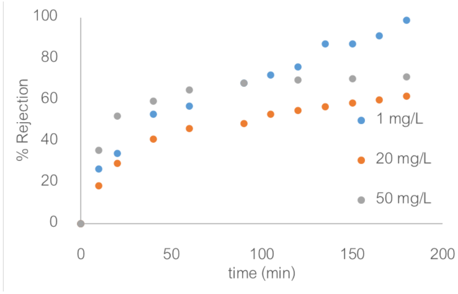


(a) % rejection (b) permeate flux

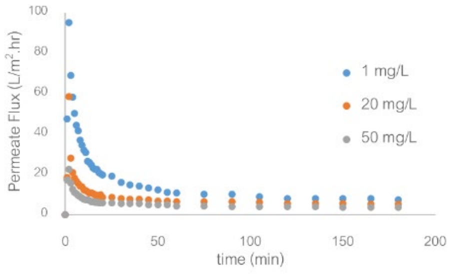
Fig. 3 Effect of solution pH on rejection efficacy of diclofenac and permeate flux during filtration by reverse osmosis membrane (diclofenac concentration = 20 mg/L and pressure = 40 psi)

ผลของความเข้มข้นของไดโคลฟีแนคเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกักกันและการลดลงของฟลักซ์

การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นไดโคลฟีแนคเริ่มต้น ทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นไดโคลฟีแนค 1 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 และค่าความดัน 40 psi ที่เวลา 180 นาที ผลการทดลองแสดงดัง Fig. 4a ประสิทธิภาพการกักกันไดโคฟีแนคมีค่า 98.86%, 61.92%, และ 71.34% ตามลำดับ รวมทั้ง ความเข้มข้นของไดโคลฟีแนคที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการลดลงของฟลักซ์เพอร์มิเอท (Flux decline) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของไดโคลฟีแนคเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณสารที่ถูกกักกันที่ไม่ผ่านเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส จึงเกิดการสะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเกิดการอุดตันเยื่อกรอง ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์



(a) % rejection



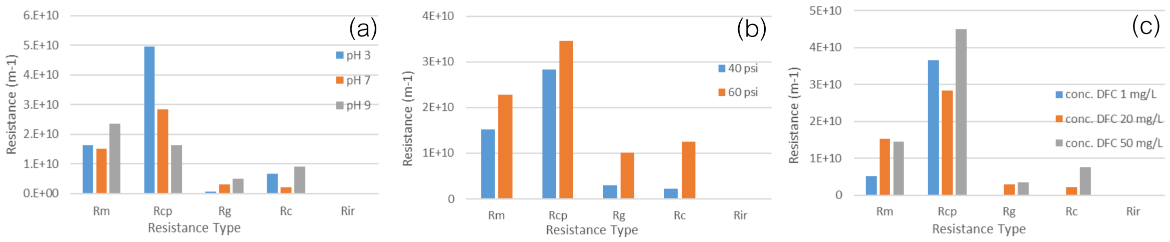
(b) permeate flux

Fig. 4 Effect of feed concentration on rejection efficacy of diclofenac and permeate flux during filtration by reverse osmosis membrane (solution pH = 7 and pressure = 40 psi)

ผลการศึกษาแบบจำลองอนุกรมความต้านทานของการอุดตัน

การศึกษาแบบจำลองอนุกรมความต้านทานของการอุดตันเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสที่ใช้ในการกักกันไดโคลฟีแนคที่ปนเปื้อนในน้ำสังเคราะห์ ทำให้ทราบถึงรูปแบบหรือลักษณะการอุดตันที่เกิดขึ้นในรูปของความต้านทานที่ส่งผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ Fig. 5a แสดงค่าความต้านทานของการอุดตันเยื่อกรองที่กักกันไดโคลฟีแนคที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ความต้านทานส่วนใหญ่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{CP}) เนื่องจากไดโคลฟีแนคในสารละลายที่ถูกกักกันด้วยเยื่อกรองสะสมอยู่บริเวณใกล้ผิวหน้าของเยื่อกรอง ทำให้ความเข้มข้นของสารที่บริเวณใกล้ผิวหน้าของเยื่อกรองมีค่าสูงขึ้น เกิดปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน ที่ทำให้ความดันออสโมติกบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์เพอร์มิเอท เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 1 เป็น 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความต้านทานการอุดตันที่เกิดจากชั้นเจล (R_g) และชั้นเค้ก (R_c) เริ่มมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสารไดโคลฟีแนคที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการสะสมตัวบนผิวหน้าหรือในรูพรุนของเยื่อกรองในลักษณะชั้นเจลและชั้นเค้ก Fig. 5b แสดงค่าความต้านทานการอุดตันที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสที่ความดัน 40 และ 60 psi สำหรับกรองสารละลายไดโคลฟีแนคความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 การอุดตันส่วนใหญ่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{CP}) ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การเพิ่มความดันทำให้มีการถ่ายเทมวลสารเข้าสู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองมากขึ้นและมีโอกาสสะสมตัวบนผิวหน้าเยื่อกรองในลักษณะของชั้นเจลและชั้นเค้กมากขึ้น ทำให้ค่า R_{CP}, R_g และ R_c จากการเดินระบบที่ความดัน 60 psi มีค่าสูงกว่าที่ความดัน 40 psi

Fig. 5c แสดงผลของพีเอชต่ออนุกรมความต้านทานจากการอุดตัน จะเห็นว่าการเพิ่มค่าพีเอชส่งผลให้ค่าความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{CP}) มีค่าลดลง เนื่องจากที่ค่าพีเอชมากกว่า pKa (4.1) การกักกันสารนอกจากจะเกิดจากกลไกการคัดแยกด้วยขนาดแล้วยังเกิดจากแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดการสะสมของไดโคลฟีแนคในบริเวณใกล้กับผิวหน้าของเยื่อกรองมีค่าต่ำลงที่พีเอช 7 และ 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าการลดลงของฟลักซ์ดังได้กล่าวมาก่อนหน้านี้



(a) initial concentration (b) pressure (c) pH

Fig. 5 Effect of initial concentration, pressure, and pH on fouling characteristics based on resistances in-series model

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสพบว่า ประสิทธิภาพการกักกันไดโคลฟีแนคที่ความดัน 40 และ 60 psi มีค่าการกักกันใกล้เคียงกันได้แก่ 61.90% และ 60.70% ตามลำดับ มีรูปแบบการลดลงของค่าฟลักซ์เป็นไปในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากเป็นผลจากการกักกันโดยอาศัยการคัดแยกด้วยขนาดเป็นหลักการศึกษาผลของพีเอช พบว่าที่พีเอช 7 และ 9 คือค่าการกักกันอยู่ที่ 61.92% และ 63.07% ตามลำดับซึ่งสูงกว่าที่พีเอช 3 (55.96%) เนื่องจากอาศัยกลไกการคัดแยกด้วยขนาดร่วมกับแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไดโคลฟีแนคประสิทธิภาพการกักกันลดลง และการลดลงของฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น โดยที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไดโคลฟีแนคเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ประสิทธิภาพการกักกัน 98.86% การศึกษาแบบจำลองอนุกรมความต้านทานพบว่าการลดลงของฟลักซ์เพอร์มิเอทส่วนใหญ่เกิดจากความต้านทานของปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{CP}) อันเนื่องมาจากการสะสมตัวของสารที่ถูกกักกันบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม และกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

จตุพล จัยสิน, สุพัฒน์พงษ์ มัตราช และ อดิศย์สุดา จำเริญสาร. 2561. ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองนาโน. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 32(3): 53–60.

Cho, J., Amy, G., Pellegrino, J. 2000. Membrane filtration of natural organic matter: Comparison of flux decline, NOM rejection, and foulants during filtration with three UF membranes. Desalination 127: 283–298. doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00017-5

Javier, R., Olga, G., Teresa, B., Fernando, B., 2010. Influence of oxygen and free radicals promoters on the UV-254nm photolysis of diclofenac. Chem. Eng. J. 163: 35–40. doi.org/10.1016/j.cej.2010.07.027

Jiraratananon, R., Chanachai, A. 1996. A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice. J. Membr. Sci. 111(39–48). doi.org/10.1016/0376-7388(95)00270-7

Katanchalee, P., Aunnop, W., Pharkphum, R., Suraphong, W., Patiparn P. 2017. Efficiencies of NF and RO membrane on pharmaceutical removal and membrane fouling effects. Eng. J. doi.org/10.4186/ej.2017.21.3.101

Lin, Y.L. 2017. Effects of organic, biological, and colloidal fouling on the removal of pharmaceuticals and personal care products by nanofiltration and reverse osmosis membranes. J. Membr. Sci. 542: 342–351. doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.023

Mehrdad, T., Brar, S.K., Verm., M., Surampalli, R.Y., Zhang, T.C., Valero, J.R. 2016. Membrane processes for removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) from water and wastewaters. Sci. Total Environ. 547: 60–77. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.139

Niina, V., Sillanpää, M. 2014. Fate of diclofenac in municipal wastewater treatment plant — A review. Environ. Int. 69(2014): 28–39. doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.021

Park, H.G., Kwon, Y.N. 2018. Investigation on the factors determining permeate pH in reverse osmosis membrane processes. Desalination 430: 147–158. doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.060

ผลของปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งต่อการเปลี่ยนแปลงแบคทีเรียรอบรากผักตบชวาในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

Effect of algae bloom to amount of rhizosphere bacteria on Water hyacinth root in domestic wastewater treatment

รัฐศิริ วงศ์สุภาพ[a], **ธนิศร์ ปัทมพิฑูร**[a,b,*], **อรอนงค์ ผิวนิล** [a,b], **ชาลิสา ทัศนาธร**[b], **มัลลิกา ศรีชมภู**[b]

Ratsiri Wongsupap[a], Thanit Pattamapitoon[a,b,*], Onanong Phewnil [a,b], Chalisa Tudsanaton[b], Manlika Srichompu[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา

[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 1900

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation

Corresponding author. E-mail address: thanit.pa@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อแบคทีเรียรอบรากผักตบชวาในสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง โดยทำการเก็บตัวอย่างรากผักตบชวาและตัวอย่างน้ำเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของค่าออกซิเจนละลายน้ำ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำยังเป็นผลมาจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และปริมาณของแข็งแขวนลอยจึงบ่งชี้ถึงการเกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง โดยปริมาณแบคทีเรียรอบรากในสัปดาห์ที่ 2 มีปริมาณแบคทีเรีย 1.52×10^{8} CFU/ g_{root} และในสัปดาห์ที่ 3 มีปริมาณแบคทีเรีย 1.05×10^{7} CFU/g_{root} ซึ่งมีการลดลงถึง 1.41×10^{8} CFU/ g_{root} คิดเป็นร้อยละ 93.08 และลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าแปรผกผันกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นที่ 11.96 mg/L เริ่มส่งผลต่อปริมาณแบคทีเรียรอบรากอย่างชัดเจน ส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำลดลงทำให้การบำบัดน้ำเสียของผักตบชวานั้นมีประสิทธิภาพลดลง

คำสำคัญ: แบคทีเรียรอบราก, ผักตบชวา, สภาวะสาหร่ายสะพรั่ง

Abstract

The purpose of this study was to study the changes in the microbial load around the water hyacinth roots under the algae bloom condition. After 8 weekly collections, the water quality analysis showed a correlation between hydrogen peroxide and dissolved oxygen values as the result suggested that the increase in dissolved oxygen was the direct result of photosynthesis of the phytoplankton in the water. Furthermore, it was also found that the relationship between the dissolved oxygen, hydrogen peroxide Chlorophyll content and the number of suspended solids indicates the occurrence of algal bloom. Having the bacteria around the roots during the second week being at 1.52×10^{8} CFU/ g_{root}, and in the third week at 1.05×10^{7} CFU/ g_{root}, which decreased to 1.41×10^{8} CFU g_{root}, equivalent to 93.08% and decreased significantly. As the result suggested for an inversely proportional regression to the increasing amount of hydrogen peroxide concentration at 11.96 mg/L in which a clear effect the bacteria were suggested. From this study, decreasing on the number of bacteria will have a direct effect towards the decrease in the ability to decompose organic matter in the wastewater, causing water hyacinth wastewater treatment to be less effective.

Keywords: Algal Blooms, Rhizosphere bacteria, Water hyacinth

คำนำ

ผักตบชวาเป็นพืชลอยน้ำที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว และมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย (Chunkao et al, 2012) โดยอาศัยเชื้อแบคทีเรียรอบรากซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์เพื่อให้ผักตบชวาสามารถนำสารอนินทรีย์เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต โดยแบคทีเรียรอบรากพืชยังเพิ่มความสามารถในการดูดซึมแร่ธาตุ ควบคุมสมดุลอาหารและสมดุลฮอร์โมนของพืช (ชฎาพร และวสุ, 2561) ดังนั้นผักตบชวาจึงถูกเลือกมาเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนในกระบวนการการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นน้ำเสียชุมชนระดับเทศบาลเมืองที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์มาบำบัดด้วยผักตบชวาในสภาวะน้ำขังนิ่ง ซึ่งตรงกับช่วงฤดูหนาว ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง (Sukchinda et al, 2019 และมัลลิกา, 2564) เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีปริมาณแพลงก์ตอนพืชมาก เมื่อแพลงก์ตอนพืชสังเคราะห์แสงและปลดปล่อยออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำ และความผันแปรของระดับออกซิเจนที่ละลายน้ำซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของซากพืชหรือแพลงก์ตอนพืชที่ตายลง (จารุมาศ, 2564) อีกทั้งรังสีแสงอาทิตย์ยังเข้าไปกระตุ้นให้โมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของออกซิเจนละลายน้ำให้แตกตัวเป็นโมเลกุลอิสระแล้วแปรสภาพเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ธนิศร์, 2556) ซึ่งจะเข้าไปทำลายสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ รวมถึงแบคทีเรียในแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตในน้ำ (นรุตตม์ และจิราวรรณ, 2555) ดังนั้นจึงสนใจศึกษาผลของสภาวะสาหร่ายสะพรั่งต่อปริมาณแบคทีเรียรอบรากผักตบชวาเนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่อสารอินทรีย์และเข้าไปสร้างความเสียหายภายในเซลล์ของแบคทีเรีย และอาจส่งผลต่อปริมาณเชื้อแบคทีเรียรอบรากผักตบชวา ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดได้

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาวิจัย

โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด UTM 1442240 ถึง 1443480 N และ 0619271 ถึง 0619271 E โดยจะทำการปลูกผักตบชวาบริเวณคลอง มีขนาดความยาว 118 เมตร ความกว้าง 5 เมตร แบ่งพื้นที่เป็น 5 ช่วง ตามระยะทางจากทางน้ำเข้า-ออก ซึ่งจะทำการปลูกผักตบชวาในระบบปิด (คลองลอย) โดยวางแพขนาด 8 ตารางเมตร จำนวน 15 แพ (คิดเป็นร้อยละ 20 ของพื้นที่ผิวน้ำ) ขวางลำน้ำโดยแต่ละแพมีระยะห่างกัน 5 เมตร

การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียรอบรากผักตบชวานั้นจะทำการติดแท็กที่ต้นผักตบชวา โดยจะเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ตามการเจริญเติบโตของผักตบชวา จำนวน 5 จุดเก็บตัวอย่างตามระยะทาง ในการเก็บตัวอย่างทำการตัดรากอ่อนจากต้นผักตบชวาต้นเดิมที่ได้ทำการติดแท็กสัญลักษณ์ไว้ โดยอุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างนั้นประกอบด้วยกรรไกรตัดรากที่ผ่านการฆ่าเชื้อและถุงปลอดเชื้อสำหรับเก็บตัวอย่าง ต่อมาคือการเก็บตัวอย่างน้ำจะทำการเก็บน้ำโดยวิธีการจ้วงเก็บ (grab sampling) ที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร จากผิวน้ำในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. (มัลลิกา, 2564) จากนั้นทำการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำและรากไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปปริมาณเชื้อและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ซึ่งมีพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ คือ ปริมาณของแข็งแขวนลอย ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และคลอโรฟิลล์

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อแบคทีเรียรอบรากทั้งหมดจะใช้วิธีการ Total plate count โดยนำตัวอย่างอย่างรากมาทำการเจือจางโดยวิธีการ Serial dilution technique ให้อยู่ในช่วงที่สามารถนับจำนวนแบคทีเรียที่ 30–300 โคโลนี จากนั้นนำตัวอย่างไปเพาะเลี้ยงในอาหาร Plate count agar (PCA) ด้วยวิธีการ Spread plate และนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการนับจำนวนโคโลนีและรายงานผลเป็น CFU/ g_{root} นอกจากนี้มีการเก็บตัวอย่างน้ำไปวิธีเคราะห์คุณภาพน้ำตามวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WPCF, 2017) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยการไทเทรตตามวิธีมาตรฐาน (SOLVAY Chemicals, 2004)

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อหาความแตกต่างของข้อมูล เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเชิงซ้อนเพื่อจัดกลุ่ม โดยใช้ Duncan’s new Multiple Range Test (DMRT)

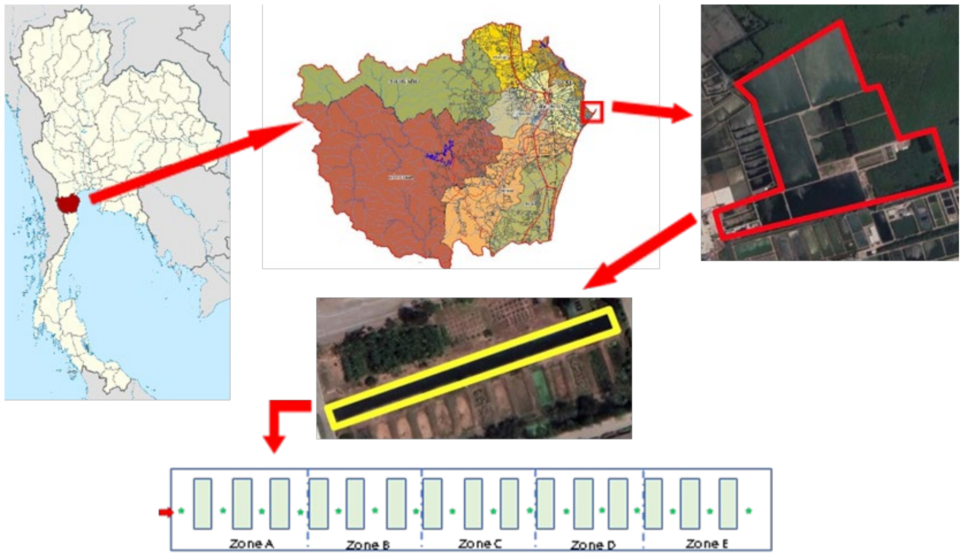


Fig. 1 Location at Laem Phak Bia, Ban Laem District, Phetchaburi Province and Sampling Station

ผลและวิจารณ์การทดลอง

คุณภาพน้ำ

คุณภาพน้ำที่ตรวจวัดได้ทำให้ทราบถึงปริมาณธาตุอาหาร คลอโรฟิลล์ และค่าออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการเกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง โดยปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนและสาหร่ายเซลล์เดียว โดยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีการเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 5 มี 7.64 mg/L และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดมีการเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 3 มีปริมาณ 1.78 mg/L และจากตารางที่ 1 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากสัปดาห์ที่ 2 ของปริมาณสารแขวนลอยและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยของแข็งแขวนลอยมีปริมาณ 37.73 mg/L และไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์มีปริมาณ 14.40 mg/L โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 4 และลดลงอย่างเป็นลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าออกซิเจนละลายน้ำและ

ปริมาณคลอโรฟิลล์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าออกซิเจนละลายน้ำและปริมาณคลอโรฟิลล์ในสัปดาห์ที่ 3 นั้นยังเป็นผลมาจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช (อนุชนรา, 2562) จากข้อมูลคุณภาพน้ำดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นแสดงให้เห็นถึงการเกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีการเพิ่มขึ้นทำให้สารอินทรีย์ที่เป็นธาตุอาหารสะสมในแหล่งน้ำปริมาณมากในสภาวะน้ำนิ่งทำให้เกิดการกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มจำนวนของสาหร่ายเซลล์เดียวอย่างรวดเร็วทำให้ของแข็งแขวนลอยและคลอโรฟิลล์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (นพิมพ์พร, 2562) จนทำให้เกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง

Table 1 Wastewater quality in wastewater treatment by using water hyacinth

Parameter	SS (mg/L)	DO (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Chlorophyll (μg/ml)
Week 1	37.13±19.18^{b}	9.43±3.86	2.00±1.00^{e}	4.12±0.53^{b}	1.65±0.20^{ab}	184.51±90.25
Week 2	37.73±15.56^{b}	8.10±1.30	14.40±2.07^{bc}	5.27±2.11^{ab}	1.49±010^{c}	123.18±47.13
Week 3	59.00±35.75^{ab}	9.10±1.67	21.23±7.10^{b}	5.62±3.51^{ab}	1.78±0.05^{a}	247.27±128.42
Week 4	27.80±14.54^{b}	8.88±2.24	41.80±14.69^{a}	3.74±1.12^{b}	1.69±0.08^{ab}	195.40±94.94
Week 5	49.60±22.95^{b}	11.45±4.57	11.96±8.22^{bcd}	7.64±1.46^{a}	1.50±0.06^{c}	245.20±104.56
Week 6	90.87±45.80^{a}	8.56±4.52	6.78±4.05^{cde}	5.23±1.31^{ab}	1.64±0.07^{b}	184.90±78.28
Week 7	33.60±21.26^{b}	6.03±2.24	4.43±2.74^{de}	3.66±1.47^{b}	1.36±0.02^{d}	89.43±34.31
Week 8	88.20±19.20^{b}	6.87±1.33	5.98±4.33^{cde}	3.82±0.36^{b}	1.31±0.04^{d}	204.61±61.08
F-test	*	ns	*	*	*	ns

* = statistical variances at a level of 95% confidence, ns = No statistical differences at 95% confidence level

ปริมาณแบคทีเรียรอบรากผักตบชวา

จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียรอบรากผักตบชวาในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นบ่งชี้ถึงปริมาณแบคทีเรียรอบรากที่มีการลดลงซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยความสัมพันธ์ของค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Pattamapitoon et al., 2013) เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นผลมาจากโมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของออกซิเจนละลายน้ำถูกรังสีแสงอาทิตย์กระตุ้นให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระและแปรสภาพไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นผลมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช โดยแพลงก์ตอนพืชจะใช้มีรงควัตถุในการดูดซับแสงเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และปริมาณของแข็งแขวนลอยในสัปดาห์ที่ 3–5 จึงแสดงให้เห็นถึงคุณภาพน้ำในสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง (Sukchinda et al., 2019) จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียรอบรากในสัปดาห์ที่ 2 มีปริมาณแบคทีเรีย 1.52×10^{8} CFU/ g_{root} และในสัปดาห์ที่ 3 มีปริมาณแบคทีเรีย 1.05×10^{7} CFU/ g_{root} ซึ่งมีการลดลงถึง 1.41×10^{8} CFU/ g_{root} แสดงให้เห็นการลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแปรผกผันกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความไวในการทำปฏิกิริยากับไขมัน ซึ่งพบมากในเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเข้าไปทำลายองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์และออร์แกเนลต่างๆ ทำให้แบคทีเรียตายลง (Elisa et al., 2000)

โดยปัจจัยจัยเหล่านี้ส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียรอบรากมีปริมาณลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของผักตบชวานั้นลดลงเช่นเดียวกัน (Pattamapitoon et al., 2013)

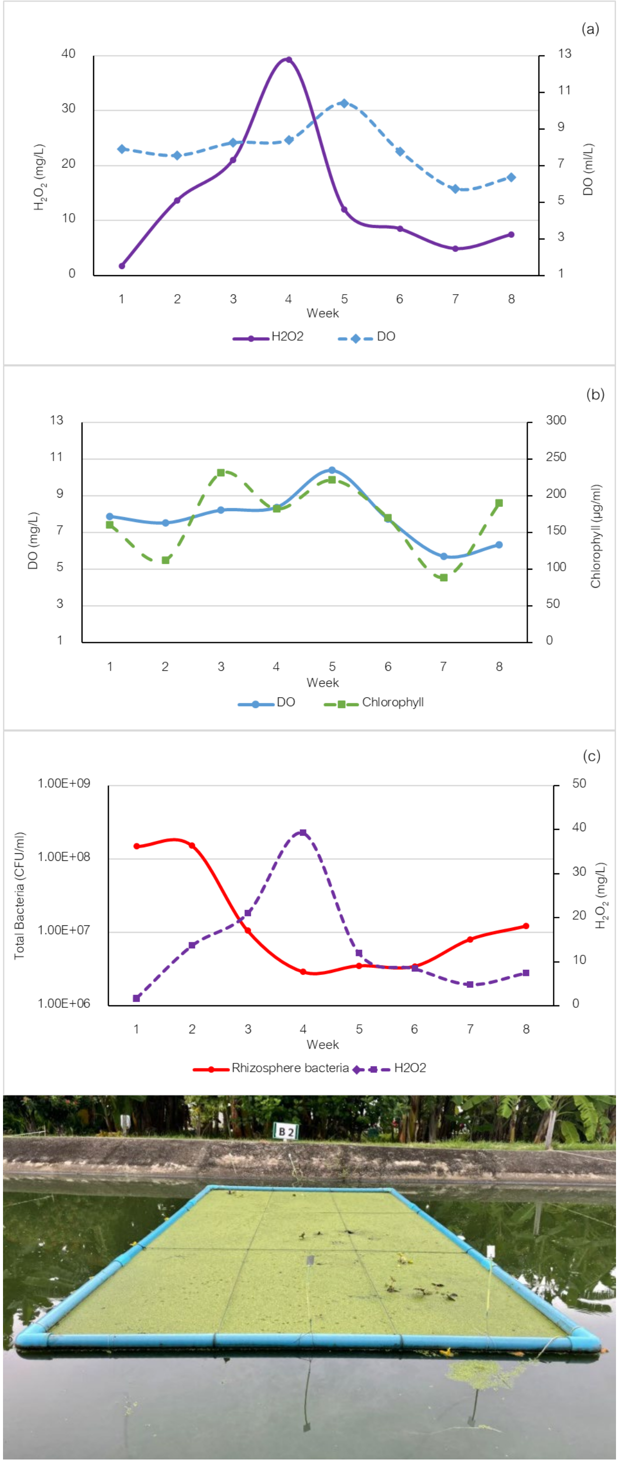


Fig. 2 Relationship of wastewater: (a) H_2O_2 and DO; (b) DO and Chlorophyll; (c) Rhizosphere bacteria and H_2O_2

สรุป

ปริมาณธาตุอาหารในแหล่งน้ำมีปริมาณมากและเป็นแหล่งน้ำปิดเป็นเวลานานส่งผลให้สาหร่ายเซลล์เดียวและแพลงก์ตอนเกิดการแพร่พันธุ์อย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง นอกจากนี้การแตกตัวของ

ออกซิเจนละลายน้ำและแปรสภาพสู่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นส่งผลให้ให้สิ่งมีชีวิตในน้ำรวมถึงแบคทีเรียตายลง โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 11.96–21.03 mg/L นั้นจะเริ่มแสดงให้เห็นถึงการลดปริมาณของเชื้อแบคทีเรียรอบรากและส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายอินทรีย์ในแหล่งน้ำลดลงตามทำให้การบำบัดน้ำเสียของผักตบชวานั้นประสิทธิภาพไม่เป็นไปตามที่ควร จากการศึกษาวิจัยการประยุกต์ใช้ผักตบชวาหรือพืชลอยน้ำชนิดอื่นเพื่อการบำบัดน้ำเสีย ไม่สามารถทำได้ในแหล่งน้ำที่เกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง เพราะแบคทีเรียรอบรากที่ทำให้ที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียจะตายและลดจำนวนลง ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ในการให้ทุนและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ รวมถึงเจ้าหน้าที่และคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

จารุมาศ เมฆสัมพันธ์. 2564. จากต้นน้ำถึงปากแม่น้ำบทบาททางนิเวศอุทกวิทยาและการจัดการเชิงอนุรักษ์. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชฎาพร อินสุข และวสุ ปฐมอารีย์. 2561. ความสัมพันธ์ของพืชและจุลินทรีย์. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว. 256: 126–142.

ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, เกษม จันทร์แก้ว และปราโมทย์ ศิริโรจน์. 2556. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มและอีโคไลในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. Veridian E-Journal 6.

นพิมพ์พร แสงวิเชียร, เกษม จันทร์แก้ว และนฤชิต ดำปิน. 2562. การเปลี่ยนแปลงความหลากหลายชนิด ความหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืช และคุณภาพน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของโครงการศึกษาวิจัย และพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหมดเพชรบุรี. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 2562: 79–91.

นรุตตม์ สหนาวิน และจิราวรรณ ตอฤทธิ์. 2555. ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน. วารสารคณะพลศึกษา. 2555: 154–159.

พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และรัฐชา ชัยชนะ. 2557. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชั่นในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มัลลิกา ศรีชมภู, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, เกษม จันทร์แก้ว และจุลบุตร จันทร์สูรย์. 2564. ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ปริมาณแพลงก์ตอนพืช. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

อนุชนรา ตาลกุล คัสเธอร์. 2562. เมื่อแหล่งน้ำกลายเป็นสีเขียว: การจัดการฟอสฟอรัสและการฟื้นฟูแหล่งน้ำจืด. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม. 2562: 106–120. doi.org/10.14456/jem.2019.6

APHA, AWWA, WPCF. 2017. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. American Public Health Association. Washington DC, USA.

Chunkao, K., Nimpee, C., Duangmal, K. 2012. The King’s initiatives using water hyacinth to remove heavy metals and plant nutrients from wastewater through Bueng Makkasan in Bangkok Thailand. 2012. Ecological Engineering. 39: 40–52. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.09.006

Elisa, C., J. Tamarit, J. Ros. 2000. Oxidative stress in bacteria and protein damage by reactive oxygen species. Internatl. Microbiol. 3(1): 3–8.

Pattamapitoon T., P. Sirirote, P. Pakkong, K. Chunkao. 2013. Nature of solar radiation as encouraged to produce an increment of dissolved oxygen and hydrogen peroxide in oxidation ponds for community wastewater treatment at H.M.The King's LERD Project Site in Phetchaburi Province, Thailand. Modern Applied Science 7(6): 26–41. doi.org/10.5539/mas.v7n6p26

SOLVAY. 2004. Determination of hydrogen peroxide concentration (0.1%–5%) Technical data sheet. Solvay Chemicals, Inc.

Sukchinda, S., Bualert, S., Phewnil, O. et al. 2019. Effect of solar radiation on cyanobacteria bloom in oxidation ponds community wastewater treatment at the King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project Phetchaburi Thailand. EnvironmentAsia. 12(3): 54–61. doi.org/10.14456/ea.2019.45

ผลของปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งต่อประสิทธิภาพการบำบัดแบคทีเรียโคลิฟอร์มในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

Effect of algae bloom to treatment efficiency of coliform bacteria in domestic wastewater treatment

จินต์จุฑา นาคขุนทด[a], **ธนิศร์ ปัทมพิฑูร**[a,b,*], **อรอนงค์ ผิวนิล**[a,b], **บงกช สกุลศุภเศรษฐ์**[a], **ชาลิสา ทัศนาธร**[b], **มัลลิกา ศรีชมภู**[b], **ภาคิน มาสกุลรัตน์**[b]

Jinjutha Nakkhuntod[a], Thanit Pattamapitoon[a,b,*], Onanong Phewnil[a,b], Bongkot sakulsupased[a], Chalisa Tudsanaton[b], Manlika Srichompu[b], Parkin Marskulrath[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok 10700, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thanit.pa@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งต่อประสิทธิภาพการบำบัดแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (TCB, FCB) ในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์เชื้อ TCB, FCB, DO, TN, TP, pH และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ และตรวจวัดรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ พบว่าค่าสูงสุดของ DO, TN, TP, pH และรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ เท่ากับ 10.4 mg/l, 7.3 mg/l, 1.8 mg/l และ 92.4 w/m^2 ตามลำดับ ในสภาวะสาหร่ายสะพรั่งมีการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีออกซิเจนละลายน้ำผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้น (r^2 = 0.7322) และเกิดการแตกตัวของ DO โดยมีรังสีแสงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นผลให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 39.8 mg/l และค่อย ๆ ลดลง ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเข้าไปสร้างความเสียหายภายในเซลล์ของแบคทีเรีย นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังเข้าไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำอันเป็นผลมาจากการตายของแพลงก์ตอนพืช ส่งผลให้มีประสิทธิ์ภาพในการบำบัด TCB และ FCB เท่ากับร้อยละ 91.2 และ 16.7 ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบคทีเรียโคลิฟอร์ม, รังสีแสงอาทิตย์, สภาวะสาหร่ายสะพรั่ง

Abstract

This study focuses on the effects of algal bloom on the efficiency of coliform bacteria treatment in municipal wastewater treatment systems. For this study, wastewater samples were collected weekly at a depth of 30 cm to analyze for the coliform bacteria, DO, TN, TP, pH and hydrogen peroxide for a period of 8 weeks as also Net solar radiation was measured. The result found the max of DO, TN, TP, pH and Net solar radiation being at 10.4 mg/l, 7.3 mg/l, 1.8 mg/l and 92.4 w/m^2, respectively. And found that under the condition of algae bloom, there was a rapid growth of phytoplankton as this resulted in an increase in dissolved oxygen through photosynthesis (r^2 = 0.7322). With such DO production, the breakdown of dissolved oxygen catalyzed by solar radiation resulting in increased hydrogen peroxide in the wastewater. This study found that the highest concentration was at is 39.8 mg/l. Where explain for the impacts of H_2O_2 are its ability to cause damage to the bacteria's and plankton's cells as well as oxidizes organic matter in the water as a result of the death of phytoplankton concluding that the TCB and FCB treatment efficiency being at 91.2% and 16.7%, respectively.

Keywords: Coliform bacteria, Solar radiation, Algae Blooms

คำนำ

เชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มเป็นเชื้อที่อาศัยอยู่ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และถูกขับออกมาในรูปสิ่งปฏิกูล เมื่อเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสัตว์น้ำ รวมถึงก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำและบริโภคสัตว์น้ำ การฆ่าเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกส่งมายังระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ผักตบชวาเป็นพืชในการบำบัดของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ซึ่งระบบดังกล่าวจะอาศัยแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นสารอนินทรีย์ที่ผักตบชวาสามารถดูดซับไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ และในกระบวนการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มจะอาศัยอิทธิพลจากรังสีแสงอาทิตย์ช่วยให้เกิดกลไกการฆ่าเชื้อทางฟิสิกส์และเคมี โดยรังสีแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่กระตุ้นให้โมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของออกซิเจนละลายน้ำเกิดการแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ และแปรสภาพเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ จะเข้าไปสร้างความเสียหายภายในเซลล์ของแบคทีเรีย ส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์ม พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 1.18 μg/l แบคทีเรียโคลิฟอร์มลดลง (ธนิศร์, 2556) นอกจากนี้รังสีแสงอาทิตย์ยังมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำของแพลงก์ตอนพืช อย่างไรก็ดีหากในน้ำเสียมีการปนเปื้อนของธาตุอาหารในกลุ่มไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชสูง เมื่อได้รับอิทธิพลจากรังสีแสงอาทิตย์ทำให้แพลงก์ตอนพืชสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จึงก่อให้เกิดการสะพรั่งของสาหร่ายในน้ำเสีย โดยสภาวะสาหร่ายสะพรั่งเป็นมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณของแพลก์ตอนพืชที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้น้ำเกิดการเปลี่ยนสี โดยสีของน้ำที่เปลี่ยนไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งสามารถสังเกตได้จากคุณภาพน้ำค่า ไนโตรเจนทั้งหมด (≥ 20 mg/l) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (≥ 0.1 mg/l) ออกซิเจนละลายน้ำ (≥ 5 mg/l) และคุณภาพน้ำที่มีความเป็นกลางถึงด่าง (pH ≥ 7) (จาตุมาศ, 2564; ฉัตรลดา, 2562; พงศ์ศักดิ์ และรัฐชา, 2557; Sukchinda et al., 2019) ในสภาวะดังกล่าวมีความเป็นไปได้ว่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียโดยรังสีแสงอาทิตย์

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาวิจัย

ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำและตัวอย่างแบคทีเรียโคลิฟอร์มบริเวณระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ผักตบชวาเป็นพืชในการบำบัดน้ำของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด N13.0475460, E100.0847592 ในช่วงเดือนสิงหาคม – ตุลาคม ปี 2565 โดยระบบบำบัดน้ำเสียมีขนาด ความยาว 118 เมตร กว้าง 5 เมตร และมีการให้น้ำกับระบบแบบน้ำขังนิ่ง

การเก็บตัวอย่าง

ดำเนินการเก็บตัวอย่างในบริเวณระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ผักตบชวาเป็นพืชในการบำบัดน้ำของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยจะเก็บตัวอย่างระหว่างแพที่ผักตบชวาที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ เนื่องจากเป็นบริเวณที่แสงอาทิตย์ส่องถึง ในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. (มัลลิกา, 2564) มีจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 6 จุด (Fig. 1) และจะทำการเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละครั้ง เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ตาม

การเจริญเติบโตของผักตบชวา โดยจะเก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีจ้วงตัก (grab sampling) เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการไทเทรตตามวิธีมาตรฐาน (SOLVAY Chemicals, 2004) รวมถึงวิเคราะห์คุณภาพน้ำตามวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WPCF, 2017) มีพารามิเตอร์ ดังนี้ ออกซิเจนละลายน้ำ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจนทั้งหมด และตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH meter สำหรับการเก็บตัวอย่างแบคทีเรียโคลิฟอร์มในน้ำจะเก็บตัวอย่างด้วยวิธีจ้วงตักแบบเปิด-ปิดฝาใต้น้ำ เพื่อวิเคราะห์ TCB และ FCB ด้วยวิธีการ Most probable number (MPN) (คณาจารย์ภาควิชาจุลชีววิทยา, 2554) นอกจากนี้ยังทำการตรวจวัดรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ ด้วยเครื่อง EKO MS-700 เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับดัชนีที่ตรวจวัดข้างต้น

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และแสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R^2)

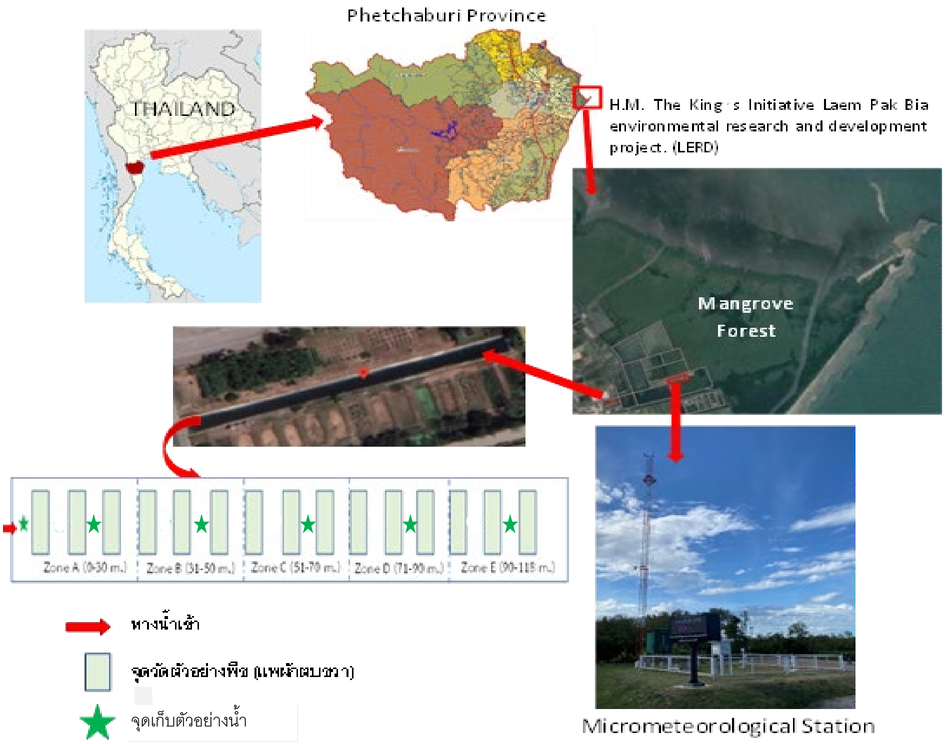


Fig. 1 Location at Laem Phak Bia, Ban Laem District, Phetchaburi Province and sampling station

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณภาพน้ำ

คุณภาพน้ำที่ตรวจวัดได้ทำให้ทราบถึงปริมาณสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย พบว่าในน้ำมีค่า TN:TP Ratio ค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1–5 ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH, DO, H_2O_2 ที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.5, 10.4 mg/l และ 39.3 mg/l ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการเกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่งในน้ำ โดยธาตุอาหารในกลุ่มไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช และแพลงก์ตอนพืชจะเจริญได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออยู่ในน้ำที่มีสภาพกลางจนถึงเป็นด่าง (ลัดดา, 2543; Sukchinda et al., 2019) เมื่อแพลงก์ตอนพืชอาศัยอยู่ในน้ำที่มีสภาวะเหมาะสม และได้รับธาตุอาหารใน

ปริมาณมาก แพลงก์ตอนพืชจึงดูดซับธาตุอาหารไปใช้ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็ว และเกิดเป็นสภาวะสาหร่ายสะพรั่งในน้ำ (พงศ์ศักดิ์ และรัฐชา, 2557; ฉัตรลดา, 2562; จาตุมาศ, 2564)

Table 1 Wastewater quality in wastewater treatment by using water hyacinth

Parameters	week 1	week 2	week 3	week 4	week 5	week 6	week 7	week 8	Efficiency (%)
DO (mg/l)	7.9	7.5	8.3	8.4	10.4	7.8	5.7	6.4	-
pH	8.1	8.3	8.3	8.4	8.5	8.5	7.7	8.0	-
TN (mg/l)	4.0	5.2	5.2	3.7	7.3	5.1	3.6	3.3	17.5
TP (mg/l)	1.7	1.5	1.8	1.7	1.5	1.6	1.4	1.3	23.5
H_2O_2 (mg/l)	1.7	13.7	21.0	39.3	12.0	8.5	4.9	7.5	-
TCB (MPN/100ml)	2.6×10^{5}	9.1×10^{4}	4.3×10^{4}	7.9×10^{4}	1.5×10^{4}	1.1×10^{4}	2.2×10^{4}	2.3×10^{4}	91.2
FCB (MPN/100ml)	1.8×10^{4}	1.2×10^{4}	2.5×10^{4}	2.3×10^{4}	5.4×10^{3}	5.1×10^{3}	1.9×10^{4}	1.5×10^{4}	16.7

ความสัมพันธ์ของรังสีแสงอาทิตย์กับออกซิเจนละลายน้ำและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เมื่อหาความสัมพันธ์ของรังสีแสงอาทิตย์กับออกซิเจนละลายน้ำและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่ารังสีแสงอาทิตย์กับออกซิเจนละลายน้ำมีความสัมพันธ์กัน (r^2 = 0.7322) เนื่องจากเกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง ทำให้แพลงก์ตอนพืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เมื่อแพลงก์ตอนพืชเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้มีอัตราการผลิตออกซิเจนออกให้แหล่งน้ำสูง จึงก่อให้เกิดการสะสมของออกซิเจนในน้ำมาก นอกจากนี้รังสีแสงอาทิตย์ยังมีบทบาทในการกระตุ้นให้โมเลกุลของน้ำรวมถึงโมเลกุลของออกซิเจนแตกตัว และแปรสภาพเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 แล้วมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 4 มีค่าเท่ากับ 39.3 mg/l และจะค่อยๆลดลง (Fig. 2) แต่อย่างไรก็ดีเมื่อแพลงก์ตอนพืชตายลงจะส่งผลให้มีปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Robert and Gambini, 1990) และมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (สุคนธ์ทิพย์, 2560) จะเข้าไปออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์เพื่อลดความสกปรกของน้ำ ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสัปดาห์ที่ 5 มีแนวโน้มลดลง

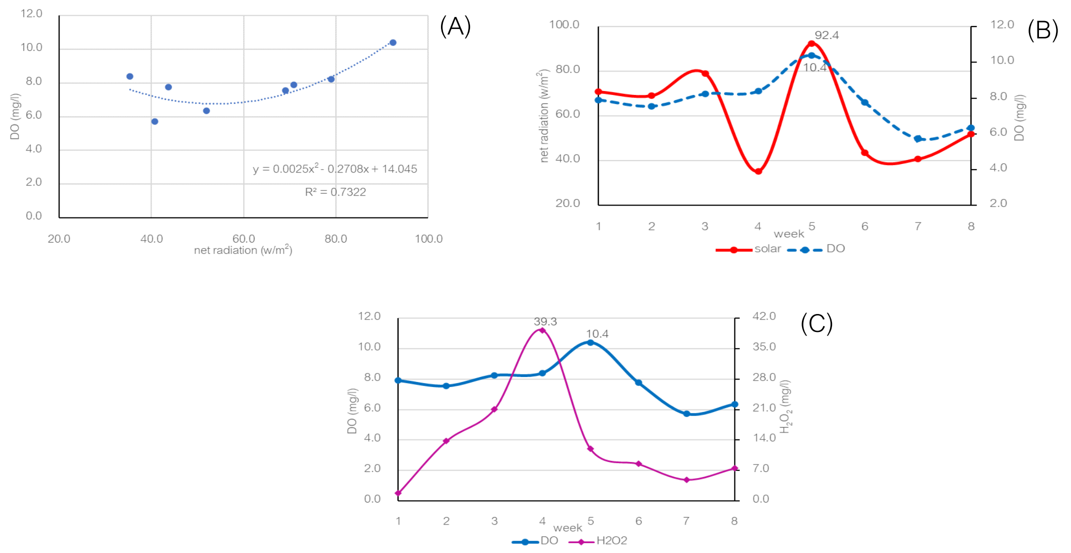


Fig. 2 Relationship of wastewater quality and environmental factors: (A, B) net radiation and DO; (C) DO and H_2O_2

ความสัมพันธ์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์ม

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นใน 4 สัปดาห์แรก (ความเข้มข้นสูงสุดที่ 39.3 mg/l) สอดคล้องกับแบคทีเรียโคลิฟอร์มมีแนวโน้มลดลงตลอดการทดลอง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีองค์ประกอบเป็นโปรตีนของแบคทีเรีย และออร์กาเนลต่างๆ ภายในเซลล์ ส่งผลให้แบคทีเรียตายลง (Elisa et al., 2000) แต่อย่างไรก็ดีการลดลงของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสัปดาห์ที่ 5 เป็นต้นไป ยังมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่สามารถเกิดการฆ่าเชื้อ TCB, FCB ได้ (Pattamapitoon et al., 2013) โดยมีประสิทธิภาพ เท่ากับร้อยละ 91.2 และ 16.7 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการฆ่าแบคทีเรียโคลิฟอร์มในสภาวะปกติ พบว่ามีประสิทธิภาพการฆ่า TCB, *E. coli* เท่ากับร้อยละ 99.8 และ 97 ตามลำดับ (Pattamapitoon et al., 2013 and 2020) ดังนั้นประสิทธิภาพการฆ่าแบคทีเรียโคลิฟอร์มในสภาวะปกติจึงดีกว่าในสภาวะสาหร่ายสะพรั่ง (Fig. 3)

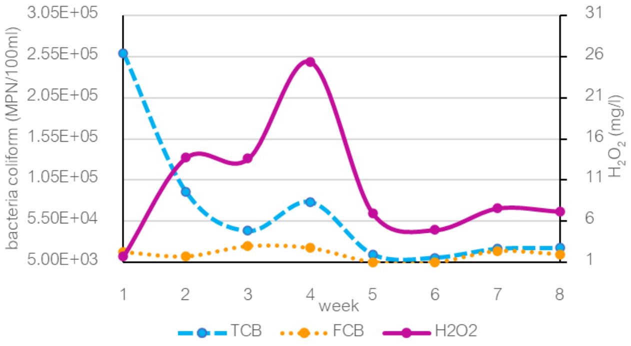


Fig. 3 Relationship between hydrogen peroxide with coliform bacteria and fecal coliform.

สรุป

สภาวะสาหร่ายสะพรั่งเกิดจากปริมาณธาตุอาหารในน้ำสูง ส่งผลให้แพลงก์ตอนพืชเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว จากสภาวะดังกล่าวทำให้มีประมาณออกซิเจนละลายน้ำสูง รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศลงมาจะกระตุ้นให้โมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของออกซิเจนแตกตัว และแปรสภาพเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้นตาม ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีบทบาทสำคัญในการฆ่าแบคทีเรียโคลิฟอร์ม โดยจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเยื่อหุ้มเซลล์และสร้างความเสียหายภายในเซลล์แบคทีเรียส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณแบคทีเรีย นอกจากนี้หลังการเกิดสภาวะสาหร่ายสะพรั่งจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเชื้อ TCB และ FCB ลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะปกติที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์จากเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชที่ตายลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ กลุ่มวิจัยวิทยาศาสตร์บรรยากาศ และคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมถึงเจ้าหน้าที่ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

คณาจารย์ภาควิชาจุลชีววิทยา. 2554. จุลชีววิทยาปฏิบัติการ. กรุงเทพมหานคร: เจ้าพระยาระบบการพิมพ์.

จาตุมาศ เมฆสัมพันธ์. 2564. จากต้นน้ำถึงปากแม่น้ำบทบาททางนิเวศอุทกวิทยาและการจัดการเชิงอนุรักษ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฉัตรลดา เพียซ้าย, นิตยา บุญเทียน, ธันย์ชนก พรดอน, Mohamad Padri. 2562. สมดุลมวลของซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในระบบกำจัดสารอาหารทางชีวภาพ.วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 28(20). doi.org/10.14456/tstj.2020.82

ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, เกษม จันทร์แก้ว, ปราโมทย์ ศิริ โรจน์. 2556. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับปริมาณแบคทีเรียโคริฟอร์มและอีโคไลในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. Veridian E-Journal ปีที่ 6

พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์, รัฐชา ชัยชนะ. 2557. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชั่นในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. วิศวกรรมสาร 27: 57–67.

มัลลิกา ศรีชมภู. 2564. ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ปริมาณแพลงก์ตอนพืช. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม

ลัดดา วงศ์รัตน์. 2543. แพลงก์ตอนพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สุคนธ์ทิพย์ เพ็งโฉม, โมไนย สุขแสงธรรม, ศิริศาส เอื้อใจ, โกวิทย์ ปิยะมังคลา. 2560. การประเมินอันตรายทางความร้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่ำโดยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์. Engineering Journal of Siam University. 18(1).

APHA, AWWA, WPCF. 2017. Standard method for the examination of water and wastewater, 23th ed. American Public Health Association. Washington, DC, USA.

Elisa, C., Tamarit, J. Ros, J. (n.d.) Oxidative stress in bacteria and protein damage by reactive oxygen species. Internatl. Microbiol. 3: 3–8.

Pattamapitoon T., P. Sirirote, P. Pakkong, K. Chunkao. 2013. Nature of solar radiation as encouraged to produce an increment of dissolved oxygen and hydrogen peroxide in oxidation ponds for community wastewater treatment at H.M.The King's LERD Project Site in Phetchaburi Province, Thailand. Modern Applied Science 7: 1913–1844. doi.org/10.539/mas.v7n6p26

Pattamapitoon T., W. Wararam, P. Wichittarakarn, C. Soeihom. 2020. Available UV Killing *Escherichia coli* in oxidation ponds for community wastewater treatment. Ecology, Environment and Conservation.

Robert G., Gambini, D.J. 1990. Applied radiobiology and radiation protection. Ellis Horwood Limited, England.

SOLVAY. 2004. Determination of hydrogen peroxide concentration (0.1%–5%) technical Data Sheet. Solvay Chemicals, Inc.

Sukchinda, S., Bualert, S., Phewnil, O. et al. 2019. Effect of solar radiation on cyanobacteria bloom in oxidation ponds community wastewater treatment at the King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project Phetchaburi Thailand. EnvironmentAsia 2019. 54–61. doi.org/0.14456/ea.2019.45

ผลของพื้นที่ปกคลุมผิวของผักตบชวาต่อชนิดและปริมาณของแพลงก์ตอนพืชในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

Effect of coverage area by using water hyacinth to quantity and quality of Phytoplankton in domestic wastewater treatment

__ศิริพร หมากสุข__[a], ธนิศร์ ปัทมพิฑูร[a,b,]*, อรอนงค์ ผิวนิล[a,b], มัลลิกา ศรีชมภู[b], ชาลิสา ทัศนาธร[b], ภาคิน มาสกุลรัตน์[b]

__Siriporn Maksuk__[a], Thanit Pattamapitoon[a,b,]*, Onanong Phewnil[a,b], Manlika Srichompu[b], Chalisa Tudsnaton[b], Parkin Marskulrath[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา เพชรบุรี 76100

[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Phetchaburi 76100, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thanit.pa@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำของแพผักตบชวามีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปกคลุมพื้นที่ผิวระหว่าง 10% และ 20% ที่มีผลต่อชนิดและปริมาณของแพลงก์ตอนพืชและปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ โดยทำการเก็บตัวอย่างแพลงก์ตอนพืชและตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ บริเวณผิวน้ำที่แสงส่องถึงที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร พบว่า การปกคลุมพื้นที่ผิว10% และ 20% ไม่มีผลต่อปริมาณแพลงก์ตอนพืช แต่มีผลต่อชนิดของแพลงก์ตอนพืชและอัตราการผลิตออกซิเจนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่ 10% พบ *Chlorella* sp.เป็นสกุลเด่น และ20% พบ *Microcystis* sp. เป็นสกุลเด่น ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับแพลงก์ตอนพืชที่10% มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.7594 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันมากกว่าการปกคลมุพื้นที่ผิว20% เนื่องจากการปกคลุมพื้นที่ผิว10% มีพื้นที่ที่แสงสามารถส่องลงมายังผิวน้ำได้มากถึง 90% ทำให้แพลงก์ตอนพืชที่อยู่บริเวณผิวน้ำเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจนให้กับระบบบำบัดน้ำเสียได้มากกว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว20%

คำสำคัญ: การปกคลุมพื้นที่ผิว, ผักตบชวา, แพลงก์ตอนพืช

Abstract

The study focuses on the surface cover of water hyacinth that aims to compare the percentage of surface cover between 10 % and 20 % on the species and amount of phytoplankton and dissolved oxygen content. the study is done by collecting phytoplankton samples and measuring the dissolved oxygen content at the water surface that was exposed to light at a depth of less than 30 cm. The result suggested that 10% and 20% surface area cover had no effect on the phytoplankton abundance, however, there was significant ($p<0.05$) at 10% found Chlorella sp. and 20% found Microcystis sp. as the dominant genus. affect towards the of species of phytoplankton and oxygen production rate. With relationship between dissolved oxygen and phytoplankton at 10% having a correlation coefficient of 0.7594 as this is more than that of the 20% surface area coverage as in explain for this, the 10% surface cover water hyacinth has an area where up to 90% where solar radiation can shine onto the water surface, causing phytoplankton at the water surface to undergo photosynthesis and produce oxygen for wastewater treatment system.

Keywords: Coverage area, Phytoplankton, Water hyacinth

คำนำ

น้ำเสียที่เกิดขึ้นในปัจจุบันมีแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละกิจกรรมจะส่งผลให้มีปริมาณและสมบัติของน้ำเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี วิธีหนึ่งก็คือการใช้ระบบบำบัดเสียร่วมกับการใช้พืชลอยน้ำ เช่น การใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ออกซิเจนก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งถูกผลิตจากแพลงก์ตอนพืช โดยแพลงก์ตอนพืชเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่จัดเป็นผู้ผลิตขั้นต้น (primary producer) แพลงก์ตอนพืชแต่ละชนิดมีความต้องการปัจจัยแวดล้อมแตกต่างกัน ดังนั้นชนิดและปริมาณของแพลงก์ตอนพืชที่พบจึงสามารถบอกได้ถึงคุณภาพน้ำได้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงของจำนวนแพลงก์ตอนพืช ได้แก่ ธาตุอาหาร อุณหภูมิของน้ำ ความหนาแน่นของพรรณไม้น้ำ และรังสีแสงอาทิตย์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแพลงก์ตอนพืช คือ รังสีแสงอาทิตย์ และยังเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช แต่ในขณะเดียวกันถ้าในระบบมีการปกคลุมพื้นที่ผิวจากผักตบชวามากเกินไป อาจส่งผลต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านผิวน้ำมายังแพลงก์ตอนพืชได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาการปกคลุมพื้นที่ผิวของแพผักตบชวาต่อชนิดและปริมาณของแพลงก์ตอนพืชรวมถึงความสามารถในการผลิตออกซิเจนของแพลงก์ตอนพืชในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ใช้ผักตบชวาเป็นพืชบำบัด

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาวิจัย

ดำเนินงานเก็บตัวอย่างในพื้นที่โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด N13.0475460 , E100.0847592 โดยเก็บตัวอย่างแพลงก์ตอนพืชและคุณภาพน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ผักตบเป็นพืชบำบัดน้ำเสีย แบ่งเป็น 2 การทดลอง โดยพื้นที่การปกคลุมของผักตบชวามี10%และ20%ของพื้นที่ผิวทั้งหมด (Fig. 1)

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์แพลงก์ตอน

เก็บตัวอย่างแพลงก์ตอนพืชในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ผักตบเป็นพืชบำบัดน้ำเสีย ซึ่งการปกคลุมพื้นที่ผิว10%และ 20% มีจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 6 จุด โดยจะเก็บตัวอย่างระหว่างแพผักตบชวา 1 ครั้ง ที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นบริเวณที่แสงส่องถึง ในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. (มัลลิกา, 2564) ทำการเก็บตัวอย่างแพลงก์ตอนด้วยถุงกรองแพลงก์ตอน (plankton net) ขนาดความกว้างของตา 40 ไมครอน กรองน้ำตัวอย่างปริมาตร 20 ลิตรผ่านถุงกรอง น้ำตัวอย่างที่อยู่ในบล็อกเกอร์ใส่ในขวดเก็บตัวอย่างพลาสติกขนาด 180 มิลลิลิตร เติมน้ำยาฟอร์มาลีนเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แช่ในถังน้ำแข็งเพื่อรักษาตัวอย่างและวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน (ลัดดา และโสภณา, 2546)

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ออกซิเจนละลายน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (Grab sampling) ที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ จากนั้นนำอย่างมาวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WEF, 2017) มีพารามิเตอร์ ดังนี้ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ วิเคราะห์ตามวิธี Azide modification method ไนโตรเจนรวมวิเคราะห์ตามวิธี Kjeldanl meter และฟอสฟอรัสรวมวิเคราะห์ตามวิธี Ascorbic Method

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และแสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R^2) และการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ T-test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

Fig. 1 Location at Laem Phak Bia, Ban Laem District, Phetchaburi Province and sampling station

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและคุณภาพน้ำบางประการ

จากการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีแพผักตบชวาลอยปกคลุมพื้นที่ผิวระหว่าง10% และ 20% จะเพิ่มขึ้นตามระยะทาง โดยน้ำเสียที่เข้ามาในระบบจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ จากนั้นแพลงก์ตอนพืชจะใช้สารอนินทรีย์ในการเจริญเติบโตทำให้แพลงก์ตอนพืชเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจึงเพิ่มตามระยะทาง ซึ่งความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการปกคลุมพื้นที่ผิว10% มีพื้นที่ที่แสงสามารถส่องลงมายังผิวน้ำได้มากถึง 90% ทำให้แพลงก์ตอนพืชที่อยู่บริเวณผิวน้ำเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจนให้กับระบบบำบัดน้ำเสียได้มากกว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว 20% ทำให้มีค่าออกซิเจนละลายน้ำในปริมาณที่สูงกว่า โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.62–11.11 mg/L มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.56±2.20 mg/L ในขณะที่การปกคลุมพื้นที่ผิว 20% มีพื้นที่แสงส่องลงมายังผิวน้ำ 80% ซึ่งส่งผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสง ทำให้ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยกว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว10% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.79–8.89 mg/L มีค่าเฉลี่ย

เท่ากับ 7.55±1.79 mg/L อย่างไรก็ดีปริมาณออกซิเจนละลายระหว่างการปกคลุมพื้นที่ผิว10% และ 200% น้ำยังอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมกับการอยู่อาศัยของสัตว์น้ำ จากการตรวจวัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม พบว่า ไนโตรเจนรวมของการปกคลุมพื้นที่ผิว10% มีค่าอยู่ในช่วง 6.99–7.89 mg/L มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.46±0.90 mg/L ในส่วนของ20% มีค่าอยู่ในช่วง 5.04–8.77 mg/L มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.23±1.89 mg/L และฟอสฟอรัสรวมของการปกคลุมพื้นที่ผิว20% มีค่าอยู่ในช่วง 0.89–0.91 mg/L มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.87±0.03 mg/L ในส่วนของ20% มีค่าอยู่ในช่วง 1.37–1.63 mg/L มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.47±0.11 mg/L

Table 1 Dissolved oxygen content between 10% and 20% covered area by water hyacinth

Dissolved Oxygen Content	Unit	Average	SD	*p*-value
10% Covered area	mg/L	9.56	2.20	0.002
20% Covered area	mg/L	7.55	1.79	

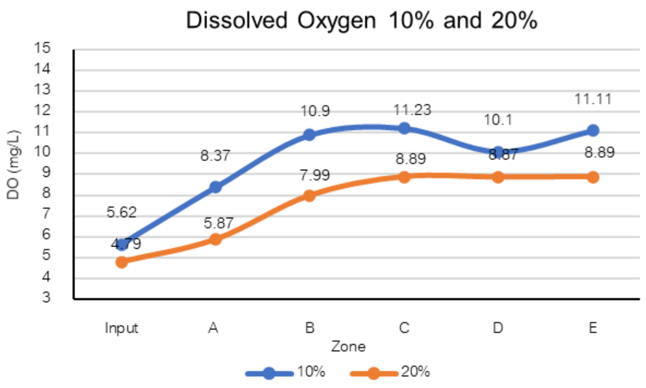


Fig. 2 Dissolved Oxygen Content between 10% and 20% covered area by water hyacinth

ชนิดและปริมาณแพลงก์ตอนพืช

จากการเก็บตัวอย่างแพลงก์ตอนพืชในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ผักตบเป็นพืชบำบัดน้ำเสีย พบว่าการปกคลุมพื้นที่ผิวระหว่างการปกคลุมพื้นที่ผิว10% และ 20% มีผลต่อชนิดของแพลงก์ตอนพืช แต่ไม่มีผลต่อปริมาณแพลงก์ตอนพืชในทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง ทำให้มีความแปรปรวนสูง โดยปริมาณแพลงก์ตอนพืชในการปกคลุมพื้นที่ผิว10% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8,675,566.67±13,209,993.34 Cell/m^3 และในส่วนของการปกคลุมพื้นที่ผิว20% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24,505.75±20,440.87 Cell/m^3 ซึ่งการปกคลุมพื้นที่ผิว10% พบแพลงก์ตอนพืชทั้งหมด 2 ดิวิชั่น 6 สกุล โดยพบ *Chlorella* sp. เป็นสกุลเด่น จัดอยู่ใน Division Chlorophyta สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยออกซิเจนที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงมาช่วยทำให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำได้ดีขึ้น สามารถเป็นอาหารให้กับแพลงก์ตอนสัตว์และสัตว์น้ำอื่น ๆ และใช้เป็นดัชนีบ่งบอกความสกปรกของน้ำ (วิสัย, 2536) ในส่วนของการปกคลุมพื้นที่ผิว 20% จะพบสกุลที่หลากหลายกว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว10% เนื่องจากมีค่าฟอสฟอรัสรวมที่สูงกว่า และฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัดที่ทำให้เกิดการสะพรั่งของสาหร่าย(พงศ์ศักดิ์ และรัฐชา, 2557) ทำให้ในการปกคลุมพื้นที่ผิว 20% มีธาตุอาหารสูง สกุลแพลงก์ตอนพืชที่พบจึงมีความหลากหลายกว่า โดยการปกคลุมพื้นที่ผิว20% พบ *Microcystis* sp. เป็นสกุลเด่น ซึ่งสามารถสร้างสารพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์น้ำในแหล่งน้ำ

ได้ โดยเฉพาะถ้าในแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณฟอสเฟตมากจะส่งเสริมอัตราการเจริญของ *Microcystis* sp. ชนิดที่สร้างสารพิษให้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Timothy et al., 2009; Sukchinda et al., 2019)

Table 2 Quantitative of phytoplankton between10% and 20% covered area by water hyacinth

Quantitative of phytoplankton	Unit	Average	SD	*p*-value
10% Covered area	Cell/m^3	8,675,566.67	13,209,993.34	0.170
20% Covered area	Cell/m^3	24,505.75	20,440.87	

Table 3 Diversity of phytoplankton between 10% and 20% covered area by water hyacinth

Order	10% Covered area	Unit (Cell/m^3)	Order	20% Covered area	Unit (Cell/m^3)
1	*Chlorella* sp.	3.86×10^7	1	*Microcystis* sp.	3.73×10^4
2	*Cyclotella* sp.	1.01×10^7	2	*Dictyosphaerium* sp.	2.83×10^4
3	*Coscinodiscus* sp.	2.88×10^6	3	*Scenedesmus armataus Chodat*	2.51×10^4
4	*Peridinium* sp.	1.84×10^5	4	*Coelastrum asteroideum De Notaris*	2.23×10^4
5	*Scenedesmus bijuga*	3.26×10^4	5	*Scenedesmus quadricauda (Turpin) Brébisson*	1.67×10^4
6	*Gomphonema parvulum*	5.75×10^3	6	*Cyclotella* sp.	5.21×10^3
			7	*Navicula* sp.	4.65×10^3
			8	*Coelastrum microsporum Naegeli*	4.12×10^3
			9	*Tetraedron hastalum*	1.61×10^3
			10	*Tetraedron trigonum (Naegeli) Hansgirg*	4.22×10^2

ความสัมพันธ์ของออกซิเจนละลายน้ำกับแพลงก์ตอนพืชระหว่างการปกคลุมพื้นที่ผิว10% และ 20%

การปกคลุมพื้นที่ผิว10% พบ Green algae ชนิด *Chlorella* sp. มากที่สุด จัดอยู่ Division Chlorophyta ซึ่งเป็นสาหร่ายสีเขียวกลุ่มที่ใหญ่ที่สุด มีรงควัตถุในดูดซับแสงเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยแพลงก์ตอนพืชเคลื่อนที่เข้าหาแสงนำรงควัตถุ ได้แก่ คลอโรฟิลล์ แคโรทินอยด์ ไฟโคบิลิน และไซยานิน ออกมาทำหน้าที่ดูดซับพลังงานแสง (Srichomphu et.al., 2018) เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจนให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับแพลงก์ตอนพืชของการปกคลุมพื้นที่ผิว พบว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว10% มีพื้นที่ที่แสงสามารถส่องลงมายังผิวน้ำได้มากถึง 90% พบค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 5.62–11.11 mg/L ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว 20% ที่มีพื้นที่แสงส่องลงมายังผิวน้ำ 80% พบค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 4.79–8.89 mg/L เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับแพลงก์ตอนพืชของการปกคลุมพื้นที่ผิว พบว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว10% มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.7594 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันมากกว่าการปกคลุมพื้นที่ผิว 20% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5839 (Fig. 3)

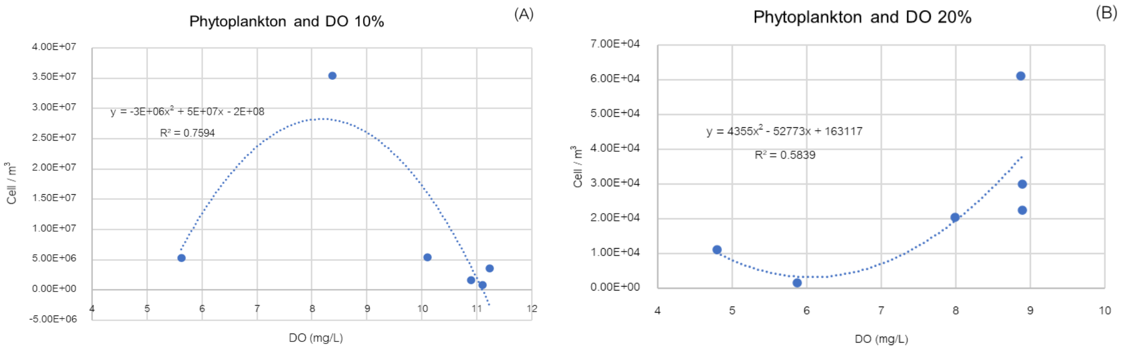


Fig. 3 Relationship between phytoplankton with DO: (A) 10%; and (B) 20% covered area by water hyacinth

สรุป

จากการศึกษาการปกคลุมพื้นที่ผิวของแพผักตบชวา พบว่าการปกคลุมพื้นที่ผิวระหว่างการปกคลุมพื้นที่ผิว10% และ 20% ไม่มีผลต่อปริมาณแพลงก์ตอนพืช แต่มีผลต่อชนิดของแพลงก์ตอนพืชและอัตราการผลิตออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ผักตบชวาเป็นพืชบำบัดน้ำเสีย โดยการปกคุลมพื้นที่ผิว 10% มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 9.56 mg/L ซึ่งแตกต่างกับการปกคลุมพื้นที่ผิว 20% อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชได้รับแสงและสังเคราะห์แสงผลิตออกซิเจนให้กับแหล่งน้ำ เป็นผลทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าจะมีการประยุกต์ใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสียและระบบสามารถผลิตออกซิเจนได้ จึงแนะนำให้มีการลอยแพผักตบชวาที่10%

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริที่ให้ทุนในการศึกษาวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในการเก็บข้อมูลเป็นอย่างดี และคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอย่างดีในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และรัฐชา ชัยชนะ. 2557. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชั่นในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. วิศวกรรมสาร 27: 57–67.

มัลลิกา ศรีชมภู, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, เกษม จันทร์แก้ว และจุลบุตร จันทร์สูรย์. 2564. ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ปริมาณแพลงก์ตอนพืช. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม

ลัดดา วงศ์รัตน์. 2546. แพลงก์ตอนพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

ลัดดา วงศ์รัตน์ และ โสภณา บุญญาภิวัฒน์. 2546. คู่มือวิธีการเก็บและวิเคราะห์แพลงก์ตอน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

วิสัย วงศ์สายปิ่น. 2536. สาหร่ายเซลล์เดียวสารอาหารจากแสงตะวัน. พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์รวมทรรศน์, กรุงเทพมหานครฯ,138 หน้า.

APHA, AWWA and WEF. 2017. Standard Method for the examination of water and wastewater, 23th ed.

America Public Health Association, Washington, DC, USA.

Srichomphu M., Phewnil, O., Patamapitoon T., et al. 2018. Influence of phytoplankton on dissolved oxygen concentration in wastewater treatment system through nature process. In: International Conference on Environment, Livelihood, and Services (ICELS 2018). Bangkok, Thailand.

Sukchinda, S., Bualert, S., Phewnil, O. et al. 2019. Effect of solar radiation on Cyanobacteria bloom in oxidation ponds community wastewater treatment at the King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project Phetchaburi Thailand. EnvironmentAsia. 2019. 54–61. doi.org/10.14456/ea.2019.45

Timothy W.D., Dianna L.B., Gregory L.B., et al. 2009. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of Microcystis during cyanobacteria blooms. Harmful Algae 2009: 715–725. doi.org/org/10.1016/j.hal.2009.02.004

ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดบีโอดี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียชุมชนด้วยผักตบชวาในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์

Appropriate period of BOD, nitrogen and phosphorus removal from community wastewater by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in zero-discharge condition

<u>วชิรญาณ์ ยิ้มสวัสดิ์</u>[a], อรอนงค์ ผิวนิล[a,b,*], วัชรพงษ์ วาระรัมย์[a,b], มัลลิกา ศรีชมภู[b], วรัญดา ไตรกิศยาโสภณ[a], อัจฉรา นาไชยบูรณ์[b]

<u>Wachiraya Yimsawat</u>[a], Onanong Phewnil[a,b,*], Watcharapong Wararam[a,b], Manlika Srichomphu[b], Warunda Thrikisayasopon[a], Utchara Nachaiboon[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา เพชรบุรี 76100

[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Phetchaburi 76100, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: onanong.p@ku.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้ผักตบชวาเพื่อกำจัดบีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์ ดำเนินการปลูกผักตบชวาอายุประมาณ 2 สัปดาห์ในกรอบท่อพีวีซีสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 เมตร จำนวน 15 แพ ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ปกคลุมผิวน้ำ ร้อยละ 10 ของพื้นที่ผิวน้ำของบ่อบำบัดทั้งหมด บ่อบำบัดรับน้ำมาจากเทศบาลเมืองเพชรบุรี เก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีเก็บแบบจ้วงและวัดการเจริญเติบโตสัปดาห์ละครั้ง รวมระยะเวลาทดลอง 12 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า ผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดสัปดาห์ที่ 7 คิดเป็นร้อยละ 34.48 และสามารถลดค่าความสกปรกในรูปบีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียม ไนเตรท ฟอสฟอรัสทั้งหมด และออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 5.48, 4.75, 0.01, 0.21, 0.57 และ 0.97 mg/L ตามลำดับ หลังจากสัปดาห์ที่ 7–12 จะมีค่ากำจัดบีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสลดลง จึงสรุปได้ว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียชุมชนจึงควรใช้ระยะเวลาไม่เกิน 10 สัปดาห์จากระยะเวลาเริ่มต้น หรือหลังจากผักตบชวาออกดอกได้ไม่เกิน 2 สัปดาห์ และต้องนำผักตบชวาที่ออกดอกแล้วออกจากระบบบำบัดเพื่อรักษาประสิทธิภาพการบำบัด

คำสำคัญ: ระยะเวลาที่เหมาะสม, น้ำเสียชุมชน, ผักตบชวา, สภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์

Abstract

The objective of this research was to study an appropriate period of using water hyacinth for removal of BOD, nitrogen and phosphorus in a zero-discharge approach. Water hyacinths with 2-week age were planted in 15 rectangular shaped PVC frames with sized 2×2 m., covering 10 percents of total water treatment pond surface area. The treatment pond received wastewater from Phetchaburi Municipal. Water samples were collected by grab sampling technique and also plants were measured for their growth once per week until 12 weeks of experimental period. The results showed that the highest growth was found 34.48% in 7-week period and also highest removal of BOD, total nitrogen, ammonia, nitrate, total phosphorus and orthophosphate. After 7–12 weeks the removal values declined. It was concluded that the appropriate period for community wastewater treatment should be within 10 weeks from starting period or 2 weeks after flowering stage. The water hyacinth with flowering stage should be removed from the treatment system for maintaining removal efficiency.

Keywords: Appropriate period, Community wastewater, Water hyacinth, Zero-discharge condition

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาน้ำเสียชุมชนนับเป็นปัญหาหลักประการหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยน้ำเสียชุมชนเกิดจากกิจกรรมการใช้น้ำของประชาชนในชุมชน (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2538) ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์มากับน้ำในปริมาณมาก ซึ่งเมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยกลายเป็นสารอนินทรีย์นั้นก็คือธาตุอาหารของพืช ธาตุอาหารเหล่านี้ถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปอาจก่อทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) ในแหล่งน้ำได้ โดยเฉพาะในแหล่งน้ำนิ่งและเปิดโล่งได้รับแสงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแสงก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดยูโทรฟิเคชั่น (พงศ์ศักดิ์ และรัฐชา, 2557) และเมื่อเซลล์แพลงก์ตอนตายลงก็เป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มภาระการย่อยสลายของจุลินทรีย์ มีผลต่อปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลงเกิดกลิ่นเหม็นและแหล่งน้ำนั้นเน่าเสียซ้ำซาก (วันทนา และศศิธร, 2554) แต่อย่างไรก็ดีปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียชุมชนมักใช้ระบบธรรมชาติช่วยธรรมชาติหรือเลียนแบบธรรมชาติเนื่องจากเป็นระบบที่ราคาประหยัด และเป็นเทคโนโลยีอย่างง่าย ดูแลรักษาง่ายไม่ยุ่งยาก โดยเฉพาะน้ำเสียชุมชนที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และธาตุอาหารสูงมักใช้ระบบพืชบำบัดน้ำเสีย ทั้งพืชลอยน้ำ พืชชอบน้ำ และพืชตระกูลหญ้า (วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม, 2552) พืชอีกชนิดที่นิยมนำมาบำบัดน้ำเสีย คือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชชอบน้ำที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม รากผักตบชวาจะดูดธาตุอาหารที่อยู่ในน้ำลำเลียงไปยังใบเพื่อสังเคราะห์ด้วยแสง สามารถดูดดึงธาตุไนโตรเจนได้ทั้งในรูปแอมโมเนียม (NH_4^+) ไนเตรท (NO_3^-) และธาตุฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-}) จึงทำให้ปัจจุบันมีการนำเอาผักตบชวามาใช้บำบัดน้ำเสียค่อนข้างมาก (Kasem et al., 2012) จากคุณสมบัติในการดูดดึงธาตุอาหารเก่ง เจริญเติบโตได้ดี และทนต่อสภาพแวดล้อม แต่ยังไม่ทราบแน่ชัดถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดความสกปรกของน้ำในรูปบีโอดี สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์ กล่าวคือไม่มีการปลดปล่อยน้ำเสียออกจากระบบบำบัดน้ำเสียและมีการเติมน้ำเสียลงระบบเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำเสียในแต่ละวัน ซึ่งมีลักษณะเป็นบ่อน้ำที่มีแต่ระบายน้ำเข้าแต่ไม่มีการระบายน้ำออก ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยครั้งนี้เพื่อจะได้นำไปปรับประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์ ให้มีประสิทธิภาพต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. พื้นที่ศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยดำเนินงานในโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด N13.0475460 , E100.0847592 ที่ในคลองบำบัดน้ำ (คลองลอย) มีขนาดกว้าง 5 เมตร ความยาว 118 เมตร โดยแบ่งพื้นที่คลองตามระยะทางเป็น 5 ระยะ ดังนี้ 0–30 เมตร (A), 31–50 เมตร (B), 51–70 เมตร (C), 71–90 เมตร (D), และ 91–118 เมตร (E) (Fig. 1)

2. การวางแพปลูกและสุ่มเก็บตัวอย่างผักตบชวา

2.1) การแบ่งช่วงคลองลอยตามระยะทางเป็น 5 ระยะ หรือ 5 โซน วางเฟรมปลูกผักตบชวาพื้นที่ปกคลุมผิวน้ำ 10% เฟรมขนาดกว้าง × ยาว 2×2 เมตร จำนวน 15 เฟรม ทำมาจากท่อ PVC แต่ละเฟรมมีการแบ่งช่องด้วยเชือกเป็น 9 ช่องเพื่อปลูกผักตบชวาช่องละต้น วางเฟรมโซนละ 3 เฟรม ระยะห่างระหว่างเฟรม 5 เมตร (Fig. 1)

2.2) การคัดเลือกต้นพันธุ์ผักตบชวา คัดเลือกต้นที่สมบูรณ์ดีจากแหล่งน้ำธรรมชาตินำมาอนุบาลในน้ำชลประทานสะอาดประมาณ 2 สัปดาห์ และมีการคัดเลือกต้นที่สมบูรณ์อีกครั้ง ให้ได้ต้นที่มีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีความสูง 10–15 เซนติเมตร จากนั้นติดแท็กและปล่อยปลูกในเฟรมที่มีการแบ่งช่องด้วยเชือกจำนวน 9 ช่อง โดยแต่ละช่องทำการปลูกผักตบชวาจำนวน 1 ต้น จึงทำการสุ่มเก็บตัวอย่างแพละ 5 ต้น (Fig. 1) วัดการเจริญเติบโตโดยการวัดความสูง ความยาวรากทุกสัปดาห์ และนำมาคำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตของพืชแต่ละต้นตามสมการ Equation 1 (Pommerening and Muszta, 2558)

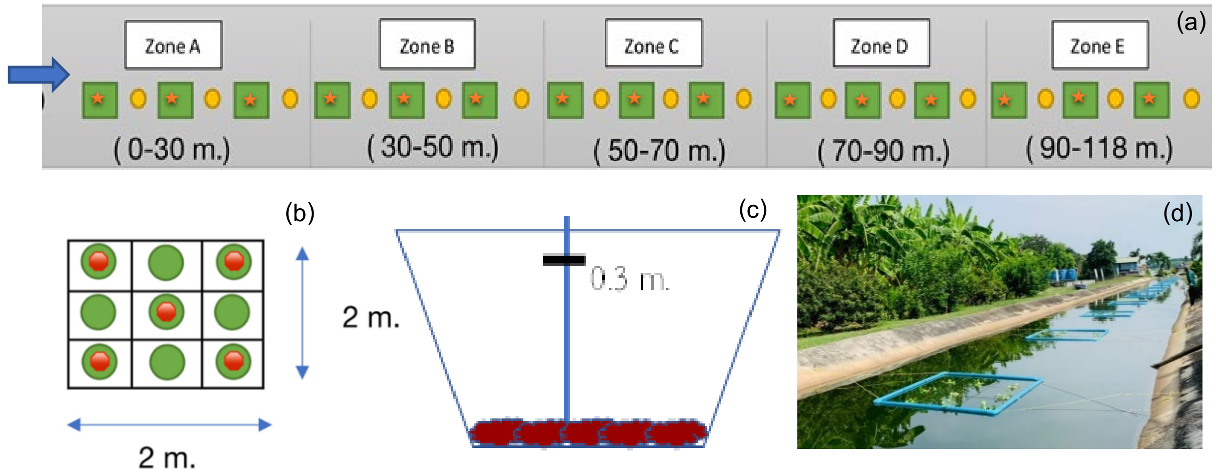
$$\text{Growth Rate} = \frac{V_{Present} - V_{Past}}{V_{Past}} \times 100 \qquad (1)$$

$V_{Present}$ = ปริมาณความสูงในปัจจุบัน (เซนติเมตร)

V_{Past} = ปริมาณความสูงในอดีต (เซนติเมตร)

3. การกำหนดจุดและการเก็บตัวอย่างน้ำ

กำหนดจุดเก็บน้ำที่บริเวณน้ำเข้า ในบริเวณระหว่างแพ และในแพที่ระดับไม่เกิน 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ (Fig. 1) ในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. ด้วยวิธีการจ้วง (Grab-sampling) ร่วมกับการเก็บตัวอย่างน้ำแบบผสมรวม (Composite-sampling) ใส่ขวดโพลีเอทีลีน (PE) ขนาด 1 ลิตร เก็บรักษาน้ำตัวอย่างด้วยการห่อกระดาษอะลูมิเนียมฟอล์ยแล้วนำมาแช่ในถังน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 4 °C จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA and WPCF (1998) โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้ บีโอดี (BOD), ไนโตรเจนทั้งหมด (TN), ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN), แอมโมเนียม (NH_4^+), ไนเตรท (NO_3^-), ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต (OP)



★ Sampling point of wastewater in frame, ● Sampling point of wastewater out frame, ● Sampling point of water hyacinth

Fig. 1 Experimental plots of Phetchaburi Municipal Wastewater Treatment with Water Hyacinth; (a) Frame of Water Hyacinth and (b) Plant Sampling for Growth Rate Sampling (c) Points of Wastewater (d) Research station

4) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ โดยหาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: r) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การเจริญเติบโตของผักตบชวา

ผักตบชวาเจริญเติบโตในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์ได้ พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาทุกโซนเฉลี่ยในแต่ละสัปดาห์ มีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด และเฉลี่ย คิดเป็นร้อยละ 34.5, -7.1 และ 8.4, ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ 1–2 ผักตบชวาเจริญเติบโตด้านความสูงและความยาวราก ช่วงสัปดาห์ที่ 3–5 ผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงต่ำเนื่องจากเป็นช่วงการขยายแยกหน่อแยกลำต้น (แตกไหล) ผักตบชวาแผ่ขยายเต็มพื้นที่เฟรมขนาด 2×2 เมตรทุกเฟรมในสัปดาห์ที่ 6 เริ่มออกดอกในสัปดาห์ที่ 7 และมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดอยู่ในสัปดาห์ที่ 7 เนื่องจากผักตบชวาดูดซึมธาตุอาหารจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนที่อาศัยอยู่บริเวณรอบรากของผักตบชวา ซึ่งมีบทบาทในการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ รวมทั้งเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียให้กลายเป็นสารประกอบอนินทรีย์ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทำให้ผักตบชวามีการเจริญเติบโตได้ (นัยนันทน์, 2561) และในสัปดาห์ที่ 8 ผักตบชวาบางส่วนมีสีใบเหลืองอัตราการเจริญเติบโตลดลง และเริ่มมีการตายลงในสัปดาห์ที่ 9 (Fig. 2)

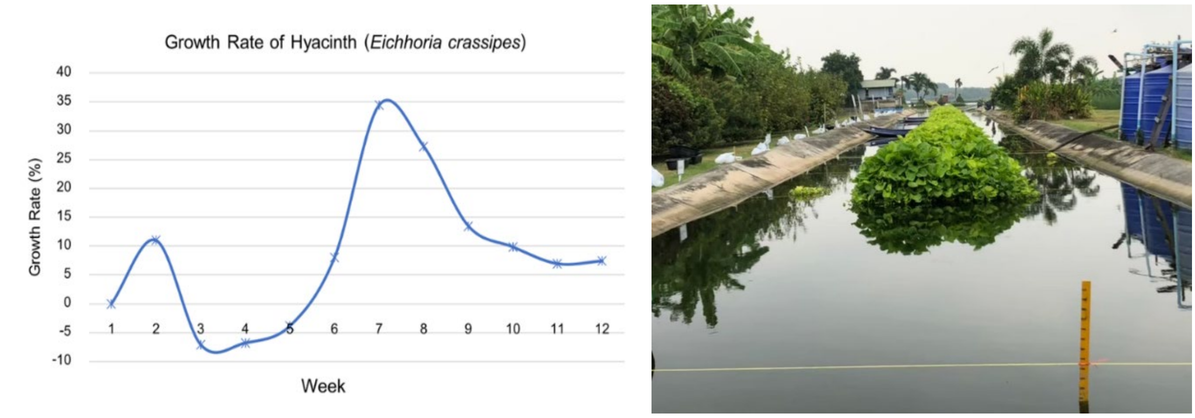


Fig. 2 Growth Rate of Hyacinth (*Eichhornia crassipes*)

2. คุณภาพน้ำ

หลังจากปลูกผักตบชวาและปล่อยให้มีการเจริญเติบโตในหน่วยทดลองระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าความสกปรกในรูปบีโอดีมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลา มีค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 11.81, 19.14 และ 5.48 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ค่าสูงสุดมีค่าอยู่ในสัปดาห์ที่ 1 และค่าต่ำสุดในสัปดาห์ที่ 10 (Table 1) เนื่องจากจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียและรอบรากพืชทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ (โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน) ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียให้กลายเป็นสารอนินทรีย์ เช่น แอมโมเนียม ไนไตรท์ ไนเตรท ฟอสเฟต เป็นต้น หรือธาตุอาหารพืชซึ่งอยู่ในรูปที่ผักตบชวาสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณความสกปรกในรูปบีโอดีในน้ำเสียชุมชนมีปริมาณลดลง (Ting et al., 2018) แต่อย่างไรก็ดีพบว่าปริมาณความสกปรกในรูปบีโอดีในน้ำเสียชุมชนที่นำมาบำบัดมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งชุมชนของกรมควบคุมมลพิษ (ไม่เกิน 20 mg/L) (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) เนื่องจากน้ำเสีย

ชุมชนที่นำมาบำบัดมีการเดินทางผ่านท่อระบบปิดทำให้เกิดการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศซึ่งสามารถลดค่าความสกปรกในรูปบีโอดีได้

ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN) แอมโมเนียม (NH_4^+) และไนเตรท (NO_3^-) มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลา โดยไนโตรเจนทั้งหมด (TN) มีค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 7.42, 12.12 และ 4.75 mg/L ตามลำดับ ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN) มีค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 5.44, 9.91 และ 3.14 mg/L ตามลำดับ แอมโมเนียม (NH_4^+) มีค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 1.12, 1.96 และ 0.01 mg/L ตามลำดับ ไนเตรท (NO_3^-) มีค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 0.88, 2.47 และ 0.21 mg/L ตามลำดับ (Table.1) เนื่องจากผักตบชวามีการดูดดึงธาตุอาหารในน้ำไปใช้ในการเจริญเติบโตและมีการสะสมไว้ในส่วนของยอด ก้านและใบ (Valipour et al., 2015) แต่สัปดาห์ที่ 7 ปริมาณไนเตรทมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผักตบชวามีการเจริญเติบโตสูงสุดและบางต้นเริ่มตายทำให้น้ำมีสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต (OP) มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาแบบต่อเนื่อง โดยฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) มีค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 0.78, 0.95 และ 0.57 mg/L ตามลำดับ ฟอสฟอรัสในรูปของออโทฟอสเฟส (OP) มีค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 1.73, 2.14 และ 0.97 mg/L ตามลำดับ (Table.1)ผักตบชวาจะดูดดึงฟอสฟอรัสจากน้ำเสียและสะสมไว้ในส่วนของดอก (Valipour et al., 2015) ในสัปดาห์ 7 ที่ปริมาณออโทฟอสเฟสต่ำสุดพบว่าผักตบชวาเริ่มออกดอก โดยเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและการออกดอกของผักตบชวาในภาวะธรรมชาติกับในน้ำเสียชุมชน ผักตบชวามีการเจริญเติบโตและการออกดอกที่ไม่แตกต่างกัน

Table.1 The concentration of biological oxygen demand, total nitrogen, total kjeldahl nitrogen, ammonium, nitrate, total phosphorus and orthophosphate in zero discharge condition

Parameter	Week											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BOD (mg/L)	19.14	14.64	11.57	13.70	13.42	13.72	11.77	9.82	7.04	5.48	10.82	10.56
TN (mg/L)	8.07	7.48	5.49	8.60	12.12	7.64	8.52	9.39	6.97	4.75	4.95	5.09
TKN (mg/L)	5.88	6.05	3.25	7.00	9.91	6.10	5.91	5.71	3.14	4.31	4.65	3.36
NH_4^+ (mg/L)	1.94	1.44	1.03	1.37	1.96	1.13	1.17	1.21	1.49	0.10	0.01	0.58
NO_3^- (mg/L)	0.25	0.21	1.22	0.23	0.24	0.41	1.44	2.47	2.35	0.34	0.28	1.15
TP (mg/L)	0.88	0.87	0.79	0.95	0.86	0.82	0.57	0.80	0.83	0.63	0.65	0.64
PO_4^+ (mg/L)	1.73	1.82	1.96	2.14	2.05	1.96	1.85	1.75	1.53	1.50	1.47	0.97

3. ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของผักตบชวาและคุณภาพน้ำ

3.1) การเจริญเติบโตของผักตบชวาและความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD)

ผักตบชวามีประสิทธิภาพในการลดความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) ในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์ได้พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาและความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) ไปในทิศทางตรงข้ามกันเนื่องจากจุลินทรีย์ในน้ำเสียและที่บริเวณรอบรากพืชทำการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน (aerobic process) เปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นสารประกอบอนินทรีย์หรือธาตุอาหาร ผักตบชวาจึงดูดซับธาตุอาหารในรูปอนินทรีย์เหล่านั้นไปใช้ในการ

เจริญเติบโตส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ลดลง และปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือความสกปรกในรูปบีโอดีลดลงด้วย (อภิชัย, 2533; ธนิยา, 2545; จันทร์เพ็ญ, 2548) เมื่อผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ออกดอกและเริ่มมีการตายลงหลังจากสัปดาห์ที่ 10 มีอัตราการเจริญเติบโตในสัปดาห์ที่ 10, 11 และ 12 อยู่ที่ร้อยละ 9.8, 6.9 และ 7.4 ตามลำดับ พบปริมาณความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) มีค่าลดลงต่ำสุดอยู่ที่ 5.48 mg/L จากนั้นความสกปรกในรูปบีโอดีมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 10.82 และ 10.56 mg/L ตามลำดับ เนื่องจากผักตบชวาเริ่มตายลงส่งผลให้ในน้ำเสียมีสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นความต้องการออกซิเจนของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความสกปรกในรูปบีโอดีมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Fig. 3) ความสัมพันธ์ของค่าความสกปรกในรูปบีโอดีตามระยะเวลาที่ค่า 0.7152 ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 กล่าวได้ว่าค่าความสกปรกของน้ำในรูปบีโอดีมีปริมาณลดลงตามการเจริญเติบโตของผักตบชวา

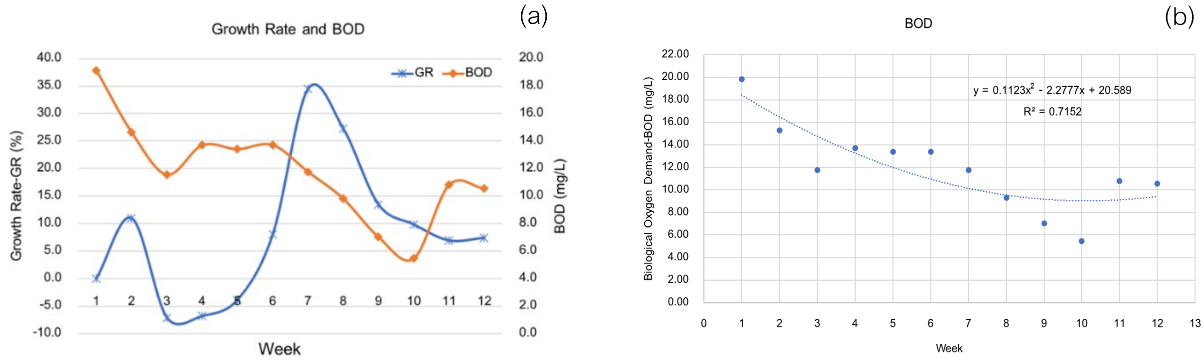


Fig. 3 Growth Rate and BOD (a) correlation coefficient of Biological Oxygen Demand (b)

3.2) การเจริญเติบโตของผักตบชวาและไนโตรเจน ฟอสฟอรัส

ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตผักตบชวากับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย และมีแนวโน้มลดลงตามการเจริญเติบโตของผักตบชวา ในช่วง 3 สัปดาห์แรก เนื่องจากเป็นช่วงที่ผักตบชวามีการปรับตัวและต้องการขยายพันธุ์จึงดูดซับธาตุเหล่านี้สำหรับการแบ่งเซลล์แตกไหลและสร้างต้นอ่อนใหม่ ในสัปดาห์ที่ 4-5 มีปริมาณเพิ่มขึ้น จากนั้นปริมาณลดลงตามระยะเวลา เนื่องจากผักตบชวามีการดูดดึงธาตุไนโตรเจนเพื่อการเจริญเติบโตในช่วงที่ผักตบชวากำลังเจริญเติบโตได้ดียิ่งมีธาตุอาหารมากยิ่งส่งผลให้ผักตบชวาเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว (วรางคณาและคณะ, 2539 ; สุทธิดาและคณะ, 2564) มีการแพร่กระจายเต็มแพในสัปดาห์ที่ 6 และมีบางต้นเริ่มตายในสัปดาห์ที่ 8 ดังนั้นปริมาณของไนโตรเจนและอัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาจึงมีความสัมพันธ์กัน (วนิดา, 2532) แต่อย่างไรก็ดีในสัปดาห์ที่ 10 เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากผักตบชวาเริ่มตายและมีการย่อยสารอินทรีย์เศษซากผักตบอีกครั้ง (Fig. 4) ส่วนไนเตรทจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับอัตราการเจริญเติบโต เนื่องจากต้องการธาตุอาหารสูงเพื่อขยายพันธุ์ แต่ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 พบว่ามีแนวโน้มไปทางเดียวกับอัตราการเจริญเติบโต เนื่องจากผักตบชวาเจริญเติบโตขึ้นจุลินทรีย์รอบรากพืชมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดี เมื่อผักตบชวาเริ่มตายปริมาณไนเตรทก็ยิ่งเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารอินทรีย์สะสมในระบบมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตผักตบชวากับฟอสฟอรัส ออร์โธฟอสเฟตมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการเจริญเติบโต เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สะสมในส่วนดอกของผักตบชวา ดังนั้นผักตบชวาจึงมีการดูดซึมฟอสฟอรัสมาช่วยในการออกดอก (รุ่งรัตน์, 2520) ผักตบชวาทำหน้าที่ในการดูดดึงฟอสฟอรัสและสะสมไว้ในเซลล์ทำให้ปริมาณ

ฟอสฟอรัสมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาอย่างต่อเนื่อง และในสัปดาห์ที่ 7 ผักตบชวาออกดอกจึงมีการดูดดึงฟอสฟอรัสมากขึ้นสำหรับการสะสมในต้นเพื่อเตรียมพร้อมในการออกดอก พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสมีปริมาณลดลงมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.57 mg/L (Fig. 4) และยังคงลดลงเนื่องจากในต้นที่เกิดใหม่ยังต้องมีการสะสมเพื่อออกดอกอีกเช่นกัน

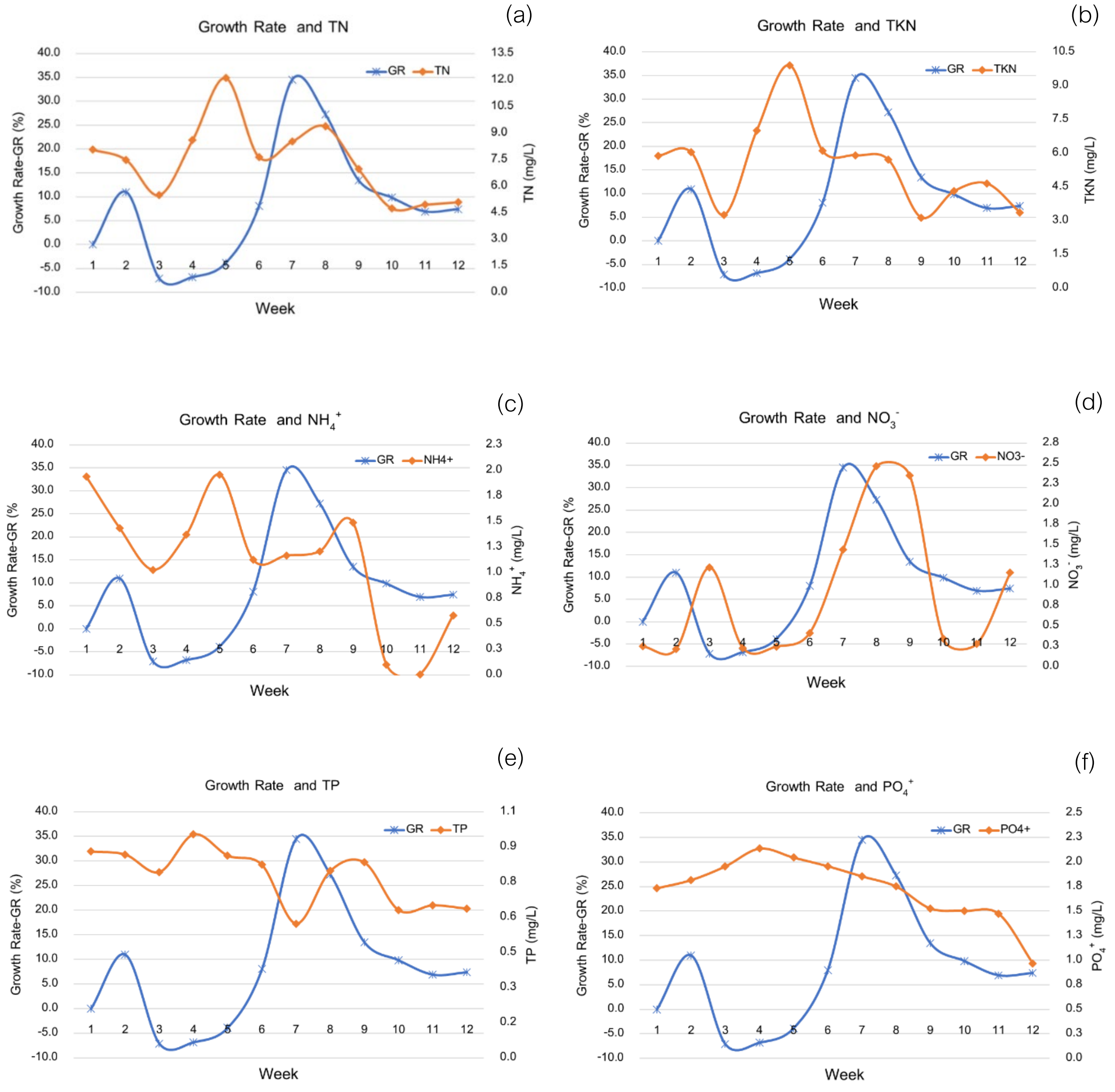


Fig. 4 Growth Rate and water Quality: (a) Total Nitrogen; (b) Total Kjeldahl Nitrogen; (c) Ammonium; (d) Nitrate; (e) Total Phosphorous; (f) Inorganic Phosphorus

สรุป

การบำบัดน้ำเสียด้วยผักตบชวาในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์ (Zero-discharge Condition) ขนาดพื้นปกคลุมผิวน้ำ 10% ระยะเวลามีผลต่อการกำจัดบีโอดี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการใช้ผักตบชวาสำหรับการบำบัดน้ำเสีย คือ ช่วงหลังจากผักตบชวาเจริญเติบโตและออกดอกแล้วไม่เกิน 2 สัปดาห์ ควรทำการจัดการและควบคุมการเจริญเติบโตของผักตบชวา หรือนำผักตบชวาออกจากระบบบางส่วนให้เหมาะสมโดยการเก็บต้นที่เจริญเต็มที่ขึ้นจากน้ำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย จากการทดลองพบว่า ควรอยู่ในระยะไม่เกิน 10

สัปดาห์ หรือระยะเวลาก่อนที่ผักตบชวาจะเริ่มตายเนื่องจากเมื่อผักตบชวาตายจะเน่าอยู่ในน้ำส่งผลให้น้ำเสียมีสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และความสกปรกในรูปบีโอดีเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา และกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนสำหรับการศึกษาวิจัยและให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และสนับสนุนในการทำวิจัยและการเก็บข้อมูลด้วยดีเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

จันทร์เพ็ญ ประคองวงศ์. 2548. การเจริญเติบโตของผักตบชวาในบึงมักกะสัน. กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

ธนิยา เกาศล. 2545. การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้พืชน้ำร่วมกับระบบบ่อบำบัดน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียชุมชน กรณีศึกษา: น้ำเสียชุมชนจากเทศบาลนครหาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา. รายงานวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

นัยนันทน์ อริยกานนท์. 2561. ผักตบชวากับการบำบัดสารมลพิษในน้ำ. วารสารสิ่งแวดล้อม. 22: 49–55.

พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และรัฐชา ชัยชนะ. 2557. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชั่นในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. วารสารวิศวกรรมสาร มก. 27: 57–67.

รุ่งรัตน์ เหลืองนทีเทพ. 2520. การศึกษาทางสัณฐานวิทยาและเซลวิทยาของพืชในวงศ์ Pontederiaceae ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์. 2532. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของพืชน้ำกับสารอาหารในบึงมักกะสัน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

วรางคณา สังสิทธิสวัสดิ์, ถิรพงษ์ ถิรมนัส และธวัชชัย เนียรวิฑูรย์. 2539. การปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียจากที่พักอาศัยโดยระบบสระพักน้ำผันสภาพร่วมกับการใช้ผักตบชวา. วารสารวิจัย มข.(ฉบับบัณฑิตศึกษา). 2: 72–85.

วันทนา แดง และศศิธร พลเสนา. 2554. การศึกษาแนวทางการลดพลังงานที่ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลสมุทรปราการ. รายงานวิจัยคณะวิทยาศาสตรและเทคโนโลยี, คณะวิทยาศาสตรและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี.

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม. 2552. โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

สุทธิดา พุทโธสง, ปวีณา แอบเพชร และรวินิภา ศรีมูล. 2564. ประสิทธิภาพของผักตบชวาและจอกในการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบการปลูกแบบไร้ดินจำลอง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 40: 415–421

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2538. โครงการศึกษาเพื่อจัดลำดับความสำคัญการจัดการน้ำสียชุมชน. บริษัทซีเทค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด. กรุงเทพฯ.

อภิชัย เชียร์สิริกุล. 2533. การบำบัดน้ำเสียจากที่พักอาศัยด้วยบ่อผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Appendices

APHA; AWWA; WEF (1998) Standard methods for the examination of water and wastewater, 20^{th} Ed. American Public Health Association. Washington, DC, USA.

Chunakao K., Nimpee C., Dunagmal K. 2012. The King's initiatives using water hyacinth to remove heavy metals and plant nutrients from wastewater through Bueng Makkasan in Bangkok, Thailand. Ecological Engineering. 39: 40–52.

Pommerening A., Muszta, A. 2016. Relative plant growth revisited: Towards a mathematical standardisation of separate approaches. Ecological Modelling. 320: 383–392.

Ting, W.H.T., Tan, I.A.W., Salleh S.F., Wahab, N.A. 2018. Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammonia nitrogen. Department of Chemical Engineering and Energy Sustainability. Journal of Water Process Engineering. 22: 239–249.

Valipour, A., Raman, V.K., Ahn, Y.H. 2015. Effectiveness of domestic wastewater treatment using a bio-hedge water hyacinth wetland system. Water. 7: 329–347.

สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

การระบุลักษณะยีน desaturase-like gene (*Ar*Cb5D6D) และอิทธิพลของความเค็มต่อการสังเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอด *Apocyclops royi*

Identification of desaturase-like gene (*Ar*Cb5D6D) and effects of salinity on biosynthesis in copepod *Apocyclops royi*

สุภิดา เกื้อกอบ[a], ปิติ อำพายัพ[b,c], จันทร์ประภา อิ่มจงใจรัก[a,*]

Supida Kueakob[a], Piti Amparyup[b,c], Chanprapa Imjongjirak[a,*]

[a]ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[b]ทีมวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[c]ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[a]Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

[b]Marine Biotechnology Research Team, National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Pathumthani 12120, Thailand

[c]Center of Excellence for Marine Biotechnology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chanprapa.i@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ระบุลักษณะยีน desaturase-like gene (*Ar*Cb5D6D) ในโคพีพอด *Apocyclops royi* พบว่ายีน *Ar*Cb5D6D ประกอบด้วยบริเวณ open reading frame 1323 คู่เบส ซึ่งสามารถแปลรหัสเป็นโปรตีนขนาด 440 กรดอะมิโน จากการวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโนของโปรตีน *Ar*Cb5D6D พบบริเวณ Cytochrome b5-like heme/steroid binding domain และ Fatty acid desaturase domain โดยมีความเหมือนกับโปรตีน desaturase ในกุ้งและปู 61–65% และพบว่ายีน *Ar*Cb5D6D มีการแสดงออกสูงในโคพีพอดระยะโคพีพอดดิดและโตเต็มวัย ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณกรดไขมัน PUFA ในโคพีพอด นอกจากนี้ยังพบว่าโคพีพอดที่ทำการเลี้ยงในสภาวะความเค็มต่ำ (15ppt) มีปริมาณกรดไขมัน arachidonic acid (ARA) และระดับการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D สูงกว่าโคพีพอดกลุ่มควบคุม (25ppt) อย่างมีนัยสำคัญ โดยจากผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่ายีน *Ar*Cb5D6D อาจมีบทบาทในการสังเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอด *A. royi*

คำสำคัญ: กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน, โคพีพอด, ความเค็ม, ดีแซตทูเรส

Abstract

In this study, desaturase-like gene (*Ar*Cb5D6D) was identified in copepod *Apocyclops royi*. The *Ar*Cb5D6D gene consists of an open reading frame of 1323 bp that encoded a protein of 440 amino acids. Sequence analysis revealed that ArCb5D6D protein contained conserved cytochrome b5-like heme/steroid binding domain, followed by fatty acid desaturase domain, sharing 61–65% amino acid sequence similarity with shrimp and crab desaturase-like proteins. *Ar*Cb5D6D gene was abundantly expressed in copepodid and adult stages which consistent with PUFA content in *A. royi*. Additionally, we found that the arachidonic acid (ARA) content in the copepods raised in hyposalinity (15ppt) was significantly higher than those in the control group (25ppt) and the expression level of *Ar*Cb5D6D mRNA was up regulated in hyposalinity group. These results suggested that *Ar*Cb5D6D gene may play a role in fatty acid synthesis in copepod *A. royi*

Keyword: Copepod, Salinity, Polyunsaturated fatty acid (PUFA), Desaturase

บทนำ

โคพีพอด *Apocyclops royi* เป็นหนึ่งในแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มครัสเตเชียนที่นิยมนำมาเป็นอาหารที่มีชีวิตสำหรับอนุบาลลูกสัตว์น้ำวัยอ่อน เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีความสามารถในการเปลี่ยนกรดไขมัน linolenic acids (LNA) และกรดไขมัน linoleic acids (LA) เป็นกรดไขมันสายยาวไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Long Chain Polyunsaturated Fatty Acid; LC-PUFA) ได้ โดยเฉพาะ docosahexaenoic acid (DHA), eicosapentaenoic acid (EPA) และ arachidonic acid (ARA) ผ่านการทำงานของเอนไซม์ desaturase และ elongase (Amparyup et al., 2022) ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้ถือเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพทางโภชนาการของอาหารสัตว์น้ำ

เอนไซม์ desaturase ถือเป็นเอนไซม์หลักที่มีความสำคัญในชีวสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (PUFA biosynthesis) จากการศึกษาในโคพีพอด *A.royi* ก่อนหน้านี้ ได้มีการระบุและจำแนกกลุ่มยีน desaturase จำนวน 5 ยีน ได้แก่ *Ar*D6D, *Ar*D5D, *Ar*D4D, *Ar*O3D-1 และ *Ar*O3D-2 (Nielsen et al., 2019; Amparyup et al., 2022) โดยจากการศึกษาการแสดงออกของยีน พบว่าโคพีพอด *A. royi* ในระยะโตเต็มวัยมีการแสดงออกของยีน *Ar*D6D, *Ar*D5D, *Ar*D4D, *Ar*O3D-1, *Ar*O3D-2 สูงกว่าโคพีพอดระยะนอเพลียส และระยะโคพีพอดดิดอย่างมีนัยสำคัญ (Amparyup et al., 2022) จากการศึกษาข้อมูล transcriptome ของโคพีพอด *A.royi* (Amparyup et al., 2022) ได้ค้นพบยีน desaturase-like gene (*Ar*Cb5D6D) ชนิดใหม่ซึ่งยังไม่มีรายงานในโคพีพอด อย่างไรก็ตามพบว่ายีนมีความเหมือนกับยีน desaturase-like ในสิ่งมีชีวิตกลุ่มครัสเตเชียน เช่น ปูทะเล *Scylla paramamosain* (Lin et al., 2017), ปูขน *Eriocheir sinensis* (Yang et al., 2013), กุ้งขาว *Litopenaeus vannamei* (Chen et al., 2017) และ กุ้งน้ำจืด *Macrobrachium nipponense* (Luo et al., 2018) โดยพบว่ายีน desaturase-like อาจจะมีหน้าที่ในการสร้างกรดไขมันในสัตว์กลุ่มครัสเตเชียน

สภาวะความเค็มเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสังเคราะห์กรดไขมันในสัตว์น้ำ มีการค้นพบว่าปลาทะเลจะมีความสามารถในการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเลี้ยงในสภาวะความเค็มต่ำ (Li et al., 2008) และจากการศึกษาในโคพีพอด *P. nana* พบปริมาณ LC-PUFA ในโคพีพอดที่เลี้ยงที่ความเค็ม 15 ppt สูงกว่า โคพีพอดที่เลี้ยงที่ความเค็ม 25 ppt อย่างมีนัยสำคัญ (Lee et al., 2017) อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อกระบวนการสังเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอด *A. royi*

ในการศึกษานี้ได้ศึกษาลักษณะยีน *Ar*Cb5D6D ในโคพีพอด *A. royi* ซึ่งเป็นยีนกลุ่ม desaturase ที่ยังไม่เคยมีรายงานในโคพีพอด *A. royi* โดยศึกษาลักษณะสมบัติและการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D เปรียบเทียบกับยีน delta-6 desaturase (*Ar*D6D) ของโคพีพอด *A. royi* และปริมาณกรดไขมันในโคพีพอดแต่ละระยะพัฒนาการ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการสังเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอดผ่านการศึกษาการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D และปริมาณกรดไขมันในโคพีพอด ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จะช่วยให้เข้าใจถึงชีวสังเคราะห์กรดไขมันสายยาวไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในโคพีพอด *A. royi*

วิธีดำเนินการวิจัย

การเพาะเลี้ยงโคพีพอด Apocyclops royi

เก็บระยะพัฒนาการของโคพีพอด โดยทำการเลี้ยงโคพีพอด *A. royi* ภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ (28 °C) ด้วยสาหร่าย *Tetraselmis* sp. ในขวดขนาด 5 ลิตรและน้ำทะเลความเค็ม 25 ppt ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน โดยแยกระยะโคพีพอดระยะนอเพลียส โคพีพอดดิด และโตเต็มวัย ด้วยผ้ากรองขนาด 33 µm, 180 µm และ 300 µm ตามลำดับ

ศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อโคพีพอด โดยทำการเลี้ยงโคพีพอด *A. royi* ภายใต้สภาวะความเค็มที่แตกต่างกัน โดยเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ (28 °C) ด้วยสาหร่าย *Tetraselmis sp.* ในน้ำทะเลที่ผ่านการฆ่าเชื้อ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชุดทดลอง คือชุดที่ 1 เลี้ยงโคพีพอดที่ความเค็ม15 ppt และชุดที่ 2 เลี้ยงโคพีพอดด้วยที่ความเค็ม 25 ppt (กลุ่มควบคุม) ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ เก็บโคพีพอดด้วยผ้ากรองขนาด 33 µm

ตัวอย่างโคพีพอดสำหรับการศึกษาองค์ประกอบกรดไขมัน จะถูกเก็บแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -80 °C และตัวอย่างโคพีพอดสำหรับการสกัด total RNA จะถูกเก็บในสารละลาย TRIzol™ Reagent และเก็บแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -80 °C

ศึกษาองค์ประกอบกรดไขมันในโคพีพอด A. royi ด้วยวิธี GC/MS

สกัดไขมันจากตัวอย่างโคพีพอดในแต่ละระยะพัฒนาการ และโคพีพอดที่เลี้ยงภายใต้สภาวะความเค็ม 15 ppt และ 25 ppt ด้วยวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Lepage และ Roy (1986) จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS)

การศึกษาลักษณะสมบัติของยีน ArCb5D6 ในโคพีพอด A.royi

วิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน *Ar*Cb5D6 โดยใช้โปรแกรม ExPASy translated tool (http://web.expasy.org/translate/) เปรียบเทียบความเหมือนกับโปรตีนอื่น ๆ ที่เคยมีรายงานในฐานข้อมูล โดยใช้โปรแกรม BLASTx (https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi) และค้นหาตำแหน่งอนุรักษ์ของแต่ละยีนด้วยโปรแกรม SMART (http://smart.embl-heidelberg.de/) จากนั้นเปรียบเทียบความเหมือนของลำดับกรดอะมิโนของ desaturase ในสิ่งมีชีวิตกลุ่มครัสเตเชียน ด้วยโปรแกรม Clustal Omega (https://www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalo/)

การสกัด total RNA และสังเคราะห์ first strand cDNA จากตัวอย่างโคพีพอด A.royi

นำตัวอย่างโคพีพอดแต่ละชุดการทดลองมาสกัด total RNA ด้วยสารละลาย TRIzol™ Reagent โดยสกัด total RNA ตามขั้นตอนของบริษัทผู้ผลิต (*Thermo Fisher Scientific*) และนำ total RNA ที่สกัดได้มากำจัด genomic DNA ด้วย RNase-free DNase I (Promega) จากนั้นวัดปริมาณความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของ total RNA ด้วยเครื่อง NanoDrop™ Spectrophotometer และทำการสังเคราะห์ first strand cDNA ด้วย RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit (*Thermo Fisher Scientific*) เพื่อนำมาตรวจสอบการแสดงออกของยีนด้วยเทคนิค RT-PCR

การตรวจสอบการแสดงออกของยีน

ตรวจสอบการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D (Forward primer: 5' GGAATAGTTCTCGGAATGGCGGCA 3'; Reverse primer: 5' TCACGGCGAGGTTTTTCTTGGGGTCA 3') และ *Ar*D6D (Forward primer: 5' TCGCCCTTCCCATTATCTACACGC 3'; Reverse primer: 5' TGTTCGATCTGGTAATTGAGACCTCC 3') ในตัวอย่างโคพีพอดที่เลี้ยงที่ความเค็มที่แตกต่างกัน (15 ppt และ 25 ppt) และตัวอย่างโคพีพอดจากแต่ละระยะพัฒนาการ (นอเพลียส โคพีพอดดิด และ โตเต็มวัย) โดยทำปฏิกิริยา PCR จากนั้นตรวจสอบผลการแสดงออกของยีนด้วย 1.8% Agarose gel electrophoresis ภายใต้แสงยูวีด้วยเครื่องชุดถ่ายภาพเจล ยี่ห้อ Syngene (U.K) รุ่น G.Box EF นำรูปที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการแสดงออกของยีน (mRNA expression) ด้วยโปรแกรม Gel Pro 3.1 simple analysis และคำนวณค่าการแสดงออกของยีน (Relative mRNA expression) โดยใช้ยีน *Ar*18srRNA (Forward primer: 5' CATATTGCGGACACTGGTTCT 3'; Reverse primer: 5' AAGAGTCTGGGCAAGGAAGAG 3') เป็นยีนควบคุม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาลักษณะสมบัติของยีน ArCb5D6D ในโคพีพอด A. royi

จากการศึกษาลักษณะสมบัติของยีน *Ar*Cb5D6 ในโคพีพอด *A. royi* พบว่าประกอบด้วยบริเวณ Open reading frame (ORF) 1323 คู่เบส เมื่อแปลรหัสเป็นโปรตีนจะมีความยาวของสายโพลีเปปไทด์ 440 กรดอะมิโน นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ความเหมือนของโปรตีน *Ar*Cb5D6D ในโคพีพอด *A. royi* กับโปรตีน desaturase ที่มีรายงานไว้ในฐานข้อมูล พบว่าโปรตีน *Ar*Cb5D6D มีความเหมือนกับโปรตีน desaturase-like ในกุ้งน้ำจืด *Macrobrachium nipponense* (AMQ48726.1) มากที่สุด (65%) รองลงมาคือ ปูทะเล *Scylla paramamosain* (ANA07380.1) (62%) และกุ้งขาว *Litopenaeus vannamei* (ALS03812.1) (61%) อย่างไรก็ตามพบว่าโปรตีน *Ar*Cb5D6D มีความเหมือนกับโปรตีน *Ar*D6D ในโคพีพอด *A. royi* (Amparyup et al., 2022) ที่เคยมีรายงานไว้เพียง 34%

จากการวิเคราะห์โดเมนที่สำคัญของโปรตีน *Ar*Cb5D6D พบบริเวณ Cytochrome b5-like heme/steroid binding domain ที่ปลายด้าน N ของโปรตีน ซึ่งประกอบด้วย H-P-G-G heme binding motif และพบบริเวณ Fatty acid desaturase domain ที่ปลายด้าน C ของโปรตีน แสดงดัง Fig. 1 โดยโดเมนที่สำคัญทั้งสองโดเมนที่พบในโปรตีน *Ar*Cb5D6D สอดคล้องกับลักษณะสมบัติของโปรตีน desaturase-like ที่มีรายงานไว้ใน กุ้ง และปู (Luo et al., 2018) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโปรตีน *Ar*Cb5D6D ในโคพีพอด *A. royi* เป็นโปรตีนที่จัดอยู่ในกลุ่มของโปรตีน desaturase-like ในสัตว์กลุ่มครัสเตเชียน

ปริมาณกรดไขมันในโคพีพอด A. royi

จากการศึกษาปริมาณกรดไขมันในโคพีพอด *A.royi* ทั้ง 3 ระยะ ที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis sp.* ที่ความเค็ม 25 ppt พบปริมาณ PUFA ในระยะนอเพลียส (NP) ระยะโคพีพอดดิด (CD) และระยะโตเต็มวัย (AD) เท่ากับ 22.5%, 38.53% และ 41.85% ตามลำดับ และพบปริมาณ LC-PUFA ในแต่ละระยะเท่ากับ 5.27%, 7.98% และ 10.36% ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของกรดไขมันในโคพีพอด *A.royi* ที่เลี้ยงที่ความเค็ม 15 ppt และ 25 ppt แสดงดัง Table1 พบว่าโคพีพอด *A. royi* ที่เลี้ยงที่ 15 ppt มีปริมาณกรดไขมัน Arachidonic acid (ARA, 20:4n-6) และปริมาณกรดไขมันกลุ่มโอเมก้า 6 (n-6 PUFA) สูงกว่าโคพีพอดที่เลี้ยงที่ความเค็ม 25 ppt อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาทรานสคริปโตมในกุ้ง *L. vannamei* ที่ทำการเลี้ยงที่ความเค็มต่ำ พบว่ากุ้งมีการสังเคราะห์ ARA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Chen et al., 2015) จากรายงานพบว่าเมื่อสัตว์น้ำอยู่ในสภาวะความเค็มต่ำ จะมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ โดยมีการสังเคราะห์กรดไขมันเพิ่มขึ้น เช่น LC-PUFA ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์ เพื่อรักษาสมดุลของเซลล์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการรอดของสิ่งมีชีวิตเมื่อตกในอยู่ในสภาวะที่มีความเครียดจากความเค็มได้ (Palacios et al., 2004) นอกจากนี้ยังพบว่ากรดไขมัน ARA สามารถเพิ่มสมดุลของเซลล์ได้ (Van Anholt et al., 2004; Beckman et al., 1992)

การตรวจสอบการแสดงออกของยีน

จากการตรวจสอบการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D และ *Ar*D6D ในตัวอย่างโคพีพอด *A. royi* ทั้ง 3 ระยะพัฒนาการ และตัวอย่างโคพีพอดที่เลี้ยงในความเค็มที่แตกต่างกัน แสดงดัง Fig. 2 และ Fig. 3 ผลการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D ในโคพีพอดแต่ละระยะพัฒนาการ พบว่าโคพีพอดระยะนอเพลียส (NP) มีการแสดงออกของยีนน้อยที่สุด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมัน ซึ่งพบปริมาณ PUFA ในระยะนอเพลียสน้อยที่สุด เมื่อเปรียบกับโคพีพอด

ระยะโคพีโพดิดและโตเต็มวัย และจากการตรวจสอบการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D ในโคพีพอด *A. royi* ที่เลี้ยงที่ความเค็มแตกต่างกัน พบว่าโคพีพอด *A. royi* ที่เลี้ยงที่ความเค็ม 15 ppt มีการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D สูงกว่าโคพีพอดที่เลี้ยงที่ความเค็ม 25 ppt อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ผลการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D ทั้งในตัวอย่างโคพีพอดแต่ละระยะพัฒนาการ และตัวอย่างโคพีพอดในสภาวะความเค็มที่แตกต่างกัน มีผลไปในทิศทางเดียวกับการแสดงออกของยีน *Ar*D6D ซึ่งเป็นยีนกลุ่ม desaturase ที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนที่เคยมีรายงานไว้โคพีพอด *A. royi* (Amparup et al., 2022) จากผลการศึกษาลักษณะของยีนและการตรวจสอบการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D นี้แสดงให้เห็นว่ายีน *Ar*Cb5D6D เป็นยีนในกลุ่ม desaturase ซึ่งมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในโคพีพอด *A. royi*

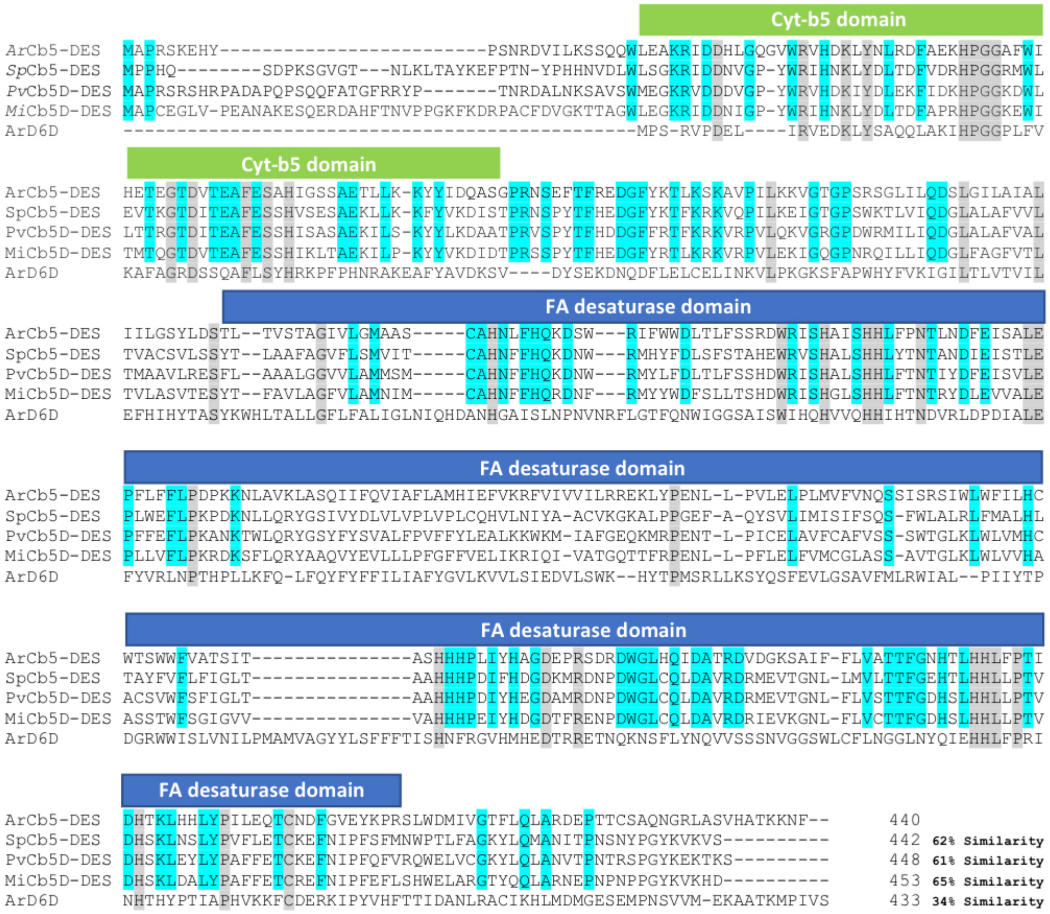


Fig. 1 Multiple alignment of the deduced amino acid sequence of *Ar*Cb5D6D from *A. royi* with the other desaturase proteins. The amino acid sequence of desaturase from the *A. royi* (*Ar*Cb5D6D), *S. paramamosain* (ANA07380.1), *L. vannamei* (ALS03812.1), *M. nipponense* (AMQ48726.1), *A. royi* (Amparyup et al., 2022) were collectively compared

Table1 The fatty acid composition in copepod *Apocyclops royi* exposed to different salinities

	Copepod *Apocyclops royi*	
	15 ppt (hyposalinity)	25 ppt (control)
C20:5 n-3 (EPA)	2.87±0.05[a]	2.61±0.17[a]
C22:6 n-3 (DHA)	3.70±0.06[a]	3.61±0.55[a]
C20:4 n-6 (ARA)	1.64±0.03[a]	1.07±0.12[b]
$\sum$PUFA	45.42±0.28[a]	41.00±3.17[a]
$\sum$n-3 PUFA	27.89±0.08[a]	26.26±2.19[a]
$\sum$n-6 PUFA	17.52±0.20[a]	14.74±1.06[b]

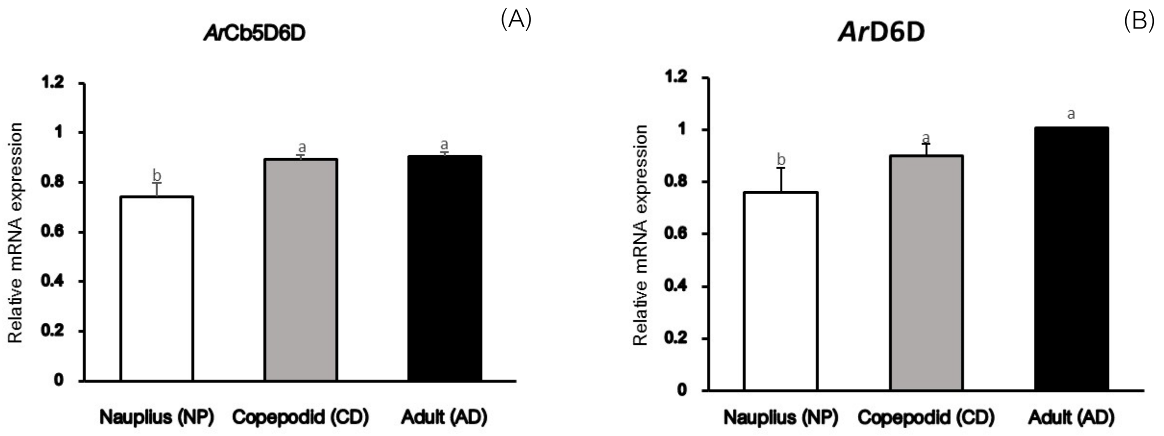


Fig. 2 The mRNA expression of *Ar*Cb5D6D and *Ar*D6D from the nauplius (NP), copepodid (CD), and adult (AD) of the copepod *A. royi*. The *Ar*18srRNA served as an internal reference gene. Data represents the mean±standard deviation (error bars) of triplicate samples. Means with different lowercase letter (above each bar) are significantly different ($p < 0.05$; one-way ANOVA with Duncan's multiple range tests)

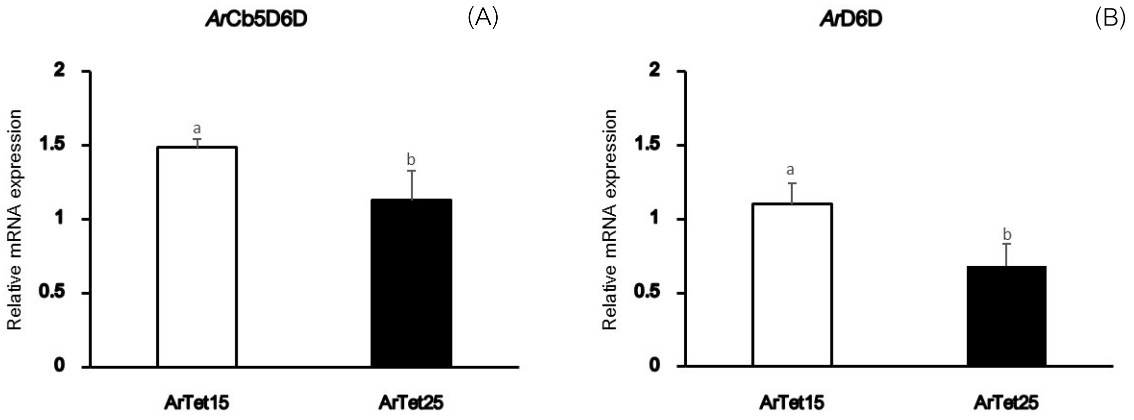


Fig. 3 The mRNA expression of *Ar*Cb5D6D and *Ar*D6D from the copepod *A. royi* at different salinity (15 ppt: ArTet15 and 25 ppt: ArTet25). The *Ar*18srRNA served as an internal reference gene. Data represents the mean ± standard deviation (error bars) of triplicate samples. Means with different lowercase letter (above each bar) are significantly different

สรุป

รายงานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการค้นพบยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนและองค์ประกอบไขมันและในโคพีพอด *A. royi* พบว่ายีน *Ar*Cb5D6D มีโดเมนที่สำคัญ Cytochrome b5-like heme/steroid binding domain และ Fatty acid desaturase domain ซึ่งสอดคล้องกับยีน desaturase ที่มีรายงานในสัตว์กลุ่มครัสเตเชียน ผลจากการวิเคราะห์กรดไขมัน พบว่าโคพีพอดทั้งสามระยะมีปริมาณ PUFA เท่ากับ 22.5% (ระยะนอเพลียส), 38.53% (ระยะโคพีพอดดิด) และ 41.85% (ระยะโตเต็มวัย) และเมื่อตรวจสอบการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D พบว่ามีการแสดงออกสูงสุดในโคพีพอดระยะโตเต็มเต็มวัยและระยะโคพีพอดดิด และจากการตรวจสอบอิทธิพลของความเค็มที่มีต่อองค์ประกอบกรดไขมันพบว่า โคพีพอดที่ทำการเลี้ยงที่สภาวะความเค็มต่ำ (15 ppt) มีปริมาณ ARA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อตรวจสอบการแสดงออกของยีน พบว่าโคพีพอดที่ทำการเลี้ยงที่ความเค็มต่ำ (15 ppt) มีการแสดงออกของยีน *Ar*Cb5D6D มากกว่าโคพีพอดที่ทำการเลี้ยงที่ความเค็ม 25 ppt เช่นเดียวกับผลการแสดงของยีน *Ar*D6D จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสภาวะความเค็มต่ำมีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในโคพอด *A.royi* และยีน *Ar*Cb5D6D อาจมีหน้าที่ในการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในโคพีพอด โดยอาจทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ ARA โดยองค์ความรู้ที่ได้จากรายงานการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาโคพีพอดให้เป็นอาหารสัตว์น้ำที่มีประสิทธิภาพในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ (P2050332),สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (สัญญาเลขที่ วช.อว.(อ)(ภส)/49/2564) และกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สัญญาเลขที่ RCU_F_64_004_23)

เอกสารอ้างอิง

Amparyup, P., Sungkaew, S., Charoensapsri, W., Tapaneeyaworawong, P., Chumtong, P., Yocawibun, P., Pantong, P., Wongpanya, R., Imjongjirak, C., Powtongsook, S. 2022. Molecular characterization of biosynthesis of polyunsaturated fatty acids during different developmental stages in the copepod *Apocyclops royi*. Aquaculture Reports 23: 101064. doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101064

Beckman, B. and Mustafa, T., 1992. Arachidonic acid metabolism in gill homogenate and isolated gill cells from rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*: the effect of osmolality, electrolytes and prolactin. Fish Physiology and Biochemistry 10(3): 213–222. doi.org/10.1007/BF00004515

Chen, K., Li, E., Li, T., Xu, C., Wang, X., Lin, H., Qin, J.G., Chen, L., 2015. Transcriptome and molecular pathway analysis of the hepatopancreas in the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* under chronic low-salinity stress. PLoS One 10(7): e0131503. doi.org/10.1371/journal.pone.0131503

Chen, K., Li, E., Li, T., Xu, C., Xu, Z., Qin, J.G., Chen, L. 2017. The expression of the Δ6 fatty acyl desaturase-like gene from Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) under different salinities and dietary lipid compositions. J. Shellfish Res. 36: 501–509. doi.org/10.2983/035.036.0221

Lee, S. H., Lee, M. C., Puthumana, J., Park, J. C., Kang, S., Hwang, D.S., Shin, K.H., Park, H.G., Souissi, S., Om, A.S., Lee, J.S. 2017. Effects of salinity on growth, fatty acid synthesis, and expression of stress

response genes in the cyclopoid copepod *Paracyclopina nana*. Aquaculture 470: 182–189. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.12.037

Lepage, G., Roy, C.C. 1986. Direct transesterification of all classes of lipids in a one-step reaction. Journal of lipid research *27*(1): 114–120. doi.org/10.1016/S0022-2275(20)38861-1

Li, Y.Y., Hu, C.B., Zheng, Y.J., Xia, X.A., Xu, W.J., Wang, S.Q., Huang, J.H. 2008. The effects of dietary fatty acids on liver fatty acid composition and D6-desaturase expression differ with ambient salinities in *Siganus canaliculatus*. Comp. Biochem. Physiol. B, Biochem. Mol. Biol. 151(2): 183–190. doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.06.013

Lin, Z., Hao, M., Zhu, D., Li, S., Wen, X., 2017. Molecular cloning, mRNA expression and nutritional regulation of a Δ6 fatty acyl desaturase-like gene of mud crab, *Scylla paramamosain*. Comp. Biochem. Physiol. B, Biochem. Mol. Biol. 208–209: 29–37. doi.org/10.1016/j.cbpb.2017.03.004

Luo, N., Ding, Z.L., Kong, Y.Q., Zhang, R.F., Zhang, Y.X., Wu, C.L., Jiang, Z.Q., Ye, J.Y., 2018. An evaluation of increasing linolenic acid level in the diet of *Macrobrachium nipponense*: Lipid deposition, fatty acid composition and expression of lipid metabolism-related genes. Aquaculture Nutrition 24(2): 758–767. doi.org/10.1111/anu.12604

Nielsen, B.L.H., Gøtterup, L., Jørgensen, T.S., Hansen, B.W., Hansen, L.H., Mortensen, J., Jepsen, P.M. 2019. n-3 PUFA biosynthesis by the copepod *Apocyclops royi* documented using fatty acid profile analysis and gene expression analysis. Biol. Open. 8: bio038331. doi.org/10.1242/bio.038331

Palacios, E., Bonilla, A., Luna, D., Racotta, I.S. 2004. Survival, Na+/K+-ATPase and lipid responses to salinity challenge in fed and starved white pacific shrimp (*Litopenaeus vannamei*) postlarvae. Aquaculture, 234(1-4): 497–511. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.12.001

Van Anholt, R.D., Spanings, F.A.T., Koven, W.M., Nixon, O., Bonga, S.W., 2004. Arachidonic acid reduces the stress response of gilthead seabream *Sparus aurata* L. Journal of Experimental Biology 207(19): 3419–3430. doi.org/10.1242/jeb.01166

Yang, Z., Guo, Z., Ji, L., Zeng, Q., Wang, Y., Yang, X. and Cheng, Y., 2013. Cloning and tissue distribution of a fatty acyl Δ6-desaturase-like gene and effects of dietary lipid levels on its expression in the hepatopancreas of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). Comp. Biochem. Physiol. B, Biochem. Mol. Biol. 165(2): 99–105. doi.org/10.1016/j.cbpb.2013.03.010

การพัฒนากระบวนการนำส่งสารสกัดจุลสาหร่าย *Chlamydomonas reinhardtii* ด้วยอนุภาคนาโนโดยใช้วิธีการฟิล์มบาง

Development of the encapsulation for microalgae extracts of *Chlamydomonas reinhardtii* using the thin-film hydration method

ธนยศ เบิกบาน[a], มัตถกา คงขาว[b], โชติกา หยกทองวัฒนา[a,*]

Tanayos Berkban[a], Mattaka Khongkow[b], Chotika Yokthongwattana[a,*]

[a] ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[a] Department of Biochemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]National Nanotechnology Center, Thailand Science Park, Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fscicks@ku.ac.th

บทคัดย่อ

สาหร่าย *Chlamydomonas reinhardtii* สร้างสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพมากมาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสารสกัดสาหร่ายที่สกัดด้วย 100% เอทานอลและพัฒนาการนำส่งสารสกัด พบรงควัตถุในสารสกัดเมื่อศึกษาด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงพบแคโรทีนอยด์หลายชนิด อาทิ ลูทีน ซีอาแซนทีน บีตา-แคโรทีน สารสกัดความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่ 8.67±0.34% ซึ่งเทียบเท่ากับวิตามินซี 14.56±0.65 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร การห่อหุ้มสารสกัดจุลสาหร่ายด้วยลิโพโซมโดยใช้เลซิตินต่อคอเลสเตอรอลต่อสารสกัดในอัตราส่วน 3.7:0.25:1 มีขนาด 91.36±3.47 นาโนเมตร ค่าประจุสุทธิบนผิวของอนุภาค -18.15±9.53 มิลลิโวลต์ และค่าสัมประสิทธิการกระจายตัวของอนุภาค 0.23±0.08 งานวิจัยการห่อหุ้มสารสกัดจุลสาหร่ายมีค่าที่เหมาะสมและคาดว่าอนุภาคที่ได้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการเก็บรักษาและการนำส่งสารสกัดสู่เซลล์เป้าหมายได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การสังเคราะห์ลิโพโซม, การห่อหุ้ม, จุลสาหร่าย, รงควัตถุ, ลูทีน

Abstract

Chlamydomonas reinhardtii produces many of biological activities. This study aimed to investigate the effects of a 100% ethanolic extract and develop the delivery process for the microalgae extract. Pigment analysis by high-performance liquid chromatography revealed that the extract contains various carotenoids such as lutein, zeaxanthin, and beta-carotene. The extract at a concentration of 0.1 mg/mL displayed antioxidant activity at 8.67±0.34%, which was equivalent to 14.56±0.65 μg/mL ascorbic acid. Encapsulation of microalgae extracts with liposomes was carried out using lecithin and cholesterol to microalgae extracts at a ratio of 3.7:0.25:1. The nanoparticles obtained an average size of 91.36±3.47 nm, a zeta potential of -18.15±9.53 mV, and a polydispersity index of 0.23±0.08. The encapsulation of this microalgae extract was suitable, and it was expected that the particles would affect the efficiency of preservation and delivery of extracts to cells.

Keywords: Encapsulation, Liposome formation, Lutein, Microalgae, Pigment

คำนำ

Chlamydomonas reinhardtii เป็นสาหร่ายเซลล์เดียว มีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือวงรีสีเขียว สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่จำกัด (Barkia et al., 2019; Lafarga, 2019) สาหร่ายชนิดนี้ได้รับการศึกษาลำดับยีนทั้งหมดในจีโนม (Goodenough, 1992) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการดัดแปลงพันธุกรรมและเหนี่ยวนำให้ผลิตสารชีวภาพต่างๆ ที่มีประโยชน์ Lee et al. (2018) ได้ศึกษาสารสกัดจากจุลสาหร่ายชนิดนี้พบว่าสาหร่ายมีการสะสมรงควัตถุหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ลูทีน (lutein) ซึ่งจัดเป็นรงควัตถุกลุ่มแซนโทฟิล (xanthophyll) พบได้ในส่วนต่างๆ ของพืชหรือสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสง นอกจากนี้ยังพบได้ในส่วนของเลนส์ตามนุษย์ ลูทีนได้รับความสนใจและนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การนำมาใช้เป็นสารปรุงแต่งจากธรรมชาติทดแทนสารปรุงแต่งเคมีในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นส่วนผสมในนมผงสำหรับเด็กทารกและอาหารเสริมบางประเภท มีการนำลูทีนมาใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง แต่ลูทีนอาจเกิดการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างเก็บรักษาได้ ดังนั้นการเพิ่มความเสถียรระหว่างการเก็บรักษาและการพัฒนาระบบนำส่งให้ตรงเป้าหมายมากยิ่งขึ้นจึงเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจ กระบวนการพัฒนาอนุภาคนาโนมีกระบวนการที่หลากหลาย ซึ่งลิโพโซม (liposome) เป็นหนึ่งในอนุภาคขนาดเล็กที่ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว เกิดจากฟอสโฟลิพิด (phospholipid) ที่มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต มีคุณลักษณะเด่นหลายประการ ได้แก่ ความสามารถในการโอบล้อมเพื่อกักเก็บสารไว้ภายใน ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ สามารถย่อยสลายได้จากกระบวนการทางชีวภาพ นอกจากนี้ลิโพโซมยังได้รับการพัฒนาจากงานวิจัยก่อนหน้าให้มีความเหมาะสมกับสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้ ด้วยเหตุนี้ลิโพโซมจึงเหมาะต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในการห่อหุ้มสารต่างๆ เพื่อทำการขนส่งเข้าสู่เซลล์เป้าหมาย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาสารสกัดจาก *C. reinhardtii* สายพันธุ์ CC-125 mt(+) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดสารโดยใช้ตัวทำละลาย 100% เอทานอล ระบุชนิดและปริมาณของสารรงควัตถุด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) ทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2’-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และพัฒนากระบวนการนำส่งของสารรงควัตถุกับสารสกัดจุลสาหร่ายด้วยวิธีการห่อหุ้มสารสกัดด้วยลิโพโซมโดยวิธีการสร้างฟิล์มบาง (thin-film hydration) เพื่อเพิ่มความเสถียรและความสามารถการละลายเพื่อให้สามารถเก็บสารสกัดได้นานยิ่งขึ้น รวมไปถึงเพื่อการพัฒนากระบวนการนำส่งเข้าสู่เซลล์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมี

รงควัตถุบริสุทธิ์ซื้อจากบริษัท Chengdu Biopurify Phytochemicals Ltd., China และสารเคมีสำหรับการทำ HPLC เป็นเกรดสำหรับการวิเคราะห์ HPLC สารสำหรับการวิเคราะห์อื่นๆ เป็นเกรด Molecular หรือเกรดสำหรับการวิเคราะห์ (AR grade)

สาหร่าย Chlamydomonas reinhardtii และการเพาะเลี้ยง

สาหร่าย *C. reinhardtii* สายพันธุ์ CC-125 wildtype mt+ (137c) ซื้อมาจาก Chlamydomonas Resource Center ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ในอาหาร Tris-Acetate-Phosphate (TAP) (Harris, 2001) ภายใต้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Navigate LED 18w daylight) ความเข้มแสง 41.75 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยให้แสง 8 ชั่วโมงและมืด 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 23–25 องศาเซลเซียส โดยเริ่มทำการเพาะเลี้ยงที่ 20,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

การนับจำนวนเซลล์สาหร่ายและการเตรียมสารสกัดสาหร่าย

นับจำนวนเซลล์จากสารละลายเซลล์สาหร่ายมาด้วย ฮีมาไซโตมิเตอร์ (hemocytometer) และคำนวณจำนวนเซลล์ตาม Equation 1 เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 7 วัน และทำการเก็บเซลล์สาหร่ายโดยการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำตะกอนเซลล์ของสาหร่ายที่ได้ไปประเหยด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบสุญญากาศ (Labconco FreeZone 2.5L, U.S.) บดและแช่ตะกอนสาหร่ายแห้งน้ำหนัก 100 มิลลิกรัม ในสารละลาย 100% เอทานอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร บนเครื่องกวนสารเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการแบ่งสารละลาย 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดไมโครเซ็นตริฟิวก์และบ่มในเครื่องล้างคลื่นความถี่สูง 35 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่บรรจุน้ำแข็งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที รวมส่วนใสทั้งหมดเข้าด้วยกันและระเหยด้วยเครื่องระเหยแบบแห้ง (Eppendorf Concentrator plus, U.S.) และเครื่องระเหยสุญญากาศ ตามลำดับ จากนั้นชั่งน้ำหนักของสารสกัดสาหร่ายและบันทึกค่าสำหรับคำนวณความเข้มข้นของสารสกัด ทำการละลายโดยใช้ตัวทำละลาย 100% เอทานอล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักสารสกัด 50 มิลลิกรัม หรือเก็บสารสกัดจุลสาหร่ายที่ -20 องศาเซลเซียส ในที่มืดจนกว่าจะใช้สำหรับทำปฏิบัติการ

Volume of microalgae (mL) = (amount of algae required (cells/mL))/(number of algae counted (cells/mL)) (1)

where the number of algae counted (cells/mL) = total number of algae counted/(number of compartments of hemocytometer) × dilution number $\times 10^4$

การวิเคราะห์รงควัตถุสารสกัดจากสาหร่ายโดยใช้เทคนิค HPLC

ทำการเตรียมสารสกัดสาหร่ายความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในสารละลาย 80% อะซิโตน จากนั้นกรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง ขนาด 0.2 ไมโครเมตร (Whatman®, No. 6753-2502-100) และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC (Hitachi Chromaster, Japan) ตั้งค่าการฉีดสารละลายปริมาตร 50 ไมโครลิตร โดยใช้คอลัมน์ VertiSep BIO C30 (4.6 × 250 mm, 5 μm) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัฏภาคเคลื่อนที่ (mobile phase) methanol/water (98:2, v/v) (A)methanol/water (95:5, v/v) (B) และ tert-methyl butyl ether (TMBE) 100% (C) ด้วยการชะแบบไล่ระดับ เริ่มต้นการชะนาทีแรกด้วยอัตราส่วน 80% A ต่อ 20% C นาทีที่ 9 ปรับอัตราส่วนเป็น 60% B ต่อ 40% C นาทีที่ 19 ปรับอัตราส่วนเป็น 100% C และนาทีที่ 20 ถึง 25 ปรับอัตราส่วนเป็น 80% A ต่อ 20% C คงอัตราการไหลของตัวทำละลายที่ 1 มิลลิลิตรต่อนาที และตรวจวัดปริมาณของสารที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร กราฟที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เทียบกับโครมาโทแกรมของผลการทดลองของ Gupta et al. (2015) ปริมาณสารรงควัตถุถูกเทียบกับสารมาตรฐานของรงควัตถุบริสุทธิ์

การวัดปริมาณฟีนอลิกของสารสกัดจุลสาหร่าย

การทดสอบสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดโดยใช้วิธีโฟลิน-ซิโอคาลทู ดัดแปลงวิธีการของ Chandra et al. (2014) โดยเตรียมสารสกัดสาหร่ายความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หรือตัวควบคุมเชิงบวกกรดแกลลิค (gallic acid) 80 ไมโครลิตร ผสมกับ 10% (v/v) โฟลิน-ซิโอแคลทู (Folin-Ciocalteau) 400 ไมโครลิตร ทำการบ่มตัวอย่างในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเติม 1 โมลาร์ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 320 ไมโครลิตร บ่มตัวอย่างในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที นำตัวอย่างไปปั่นด้วยความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แบ่งส่วนใสลงในไมโครเพลท 96 ช่อง ตัวอย่างละสามซ้ำ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Infinite M

Nano Tacan, Thailand) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิค ในช่วง 0–80 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ข้อมูลถูกแสดงเป็นมิลลิกรัมของเทียบเท่ากรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัดจุลสาหร่าย

การวัดปริมาณฟลาโวนอยด์ของสารสกัดจุลสาหร่าย

การทดสอบสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมดโดยการวัดการดูดกลืนแสงตามวิธีการของ Attard (2013) เตรียมสารสกัดสาหร่ายความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิตร หรือตัวควบคุมเชิงบวกเควอซิติน (quercetin) 50 ไมโครลิตร ผสมกับ 10% (v/v) อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) 10 ไมโครลิตร และ 100% เอทานอลปริมาตร 150 ไมโครลิตร และเติม 1 โมลาร์ โพแทสเซียมอะซิเตท (CH_3COOK) 10 ไมโครลิตร บ่มตัวอย่างในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 415 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Infinite M Nano Tacan, Thailand) ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในสารสกัดคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของเควอซิตินในช่วง 0–80 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ข้อมูลถูกแสดงเป็นมิลลิกรัมของเทียบเท่าเควอซิตินต่อกรัมของสารสกัดจุลสาหร่าย

การวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของสารสกัดจุลสาหร่ายด้วย DPPH assay

กิจกรรมในการต้านสารอนุมูลอิสระถูกวัดโดยการวิเคราะห์โดย 2,2’- diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ดัดแปลงเล็กน้อยจาก Herald et al. (2012) เตรียมสารละลายตัวอย่างความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หรือตัวควบคุมเชิงบวกกรดวิตามินซี (ascorbic acid) ปริมาตร 20 ไมโครลิตร จากนั้นเติมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 150 ไมโครโมลาร์ ที่ละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) ปริมาตร 160 ไมโครลิตร บ่มอุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์การออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ปฏิกิริยาจากตัวทำละลาย DMSO เป็นค่าควบคุมและคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟมาตราฐานของกรดวิตามินซีในช่วง 0–80 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ข้อมูลถูกแสดง คำนวณตาม Equation 2:

$$\%\ \text{radical scavenging activity} = [(A_0 - A_1)/A_0] \times 100 \quad (2)$$

Where A_0 = The absorbance of the negative control and A_1 = The absorbance of the sample

การห่อหุ้มสารสกัดจุลสาหร่ายด้วยลิโพโซมโดยใช้วิธีการสร้างฟิล์มบาง

การสังเคราะห์ลิโพโซมทำโดยดัดแปลงจากวิธีการของ Wongkhieo et al. (2021) โดยทำการละลายเลซิติน (Lecithin) 3.75 มิลลิกรัม และคอเลสเตอรอล 0.25 มิลลิกรัม ใน 100% คลอโรฟอร์ม ปริมาตร 3 มิลลิลิตร หลังจากนั้นผสมให้เข้ากันในขวดก้นกลมขนาด 100 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรของตัวทำละลายให้ได้ 10 มิลลิลิตร เติมสารสกัดสาหร่ายหรือรงควัตถุบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้น 400 ไมโครโมลาร์ ปฏิกิริยาควบคุมคือลิพิดที่ปราศจากสารสกัดหรือสารบริสุทธิ์ ทำการระเหยด้วยเครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศ ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการละลายฟิล์มที่ก้นขวดด้วยน้ำเกลือบัฟเฟอร์ฟอสเฟต พีเอช 7.4 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แกว่งผ่านน้ำในเครื่องล้างความถี่สูงจนกระทั่งสารละลายมีลักษณะขุ่น ทำการสร้างลิโพโซมโดยใช้เครื่องสลายเซลล์ด้วยคลื่นความถี่สูงที่ 40% แอมพลิจูด เปิด 2 นาที พัก 1 นาที เป็นระยะเวลารวม 11 นาที เก็บสารละลายลิโพโซมที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และแบ่งสารละลายลิโพโซมปริมาตร 20 ไมโครลิตร นำไปปรับปริมาตรให้ได้ 1 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นสำหรับนำไปวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต (dynamic light scattering) ด้วยเครื่อง Malvern Zetasizer ultra (Malvern Instruments, Malvern, UK)

ประสิทธิภาพการห่อหุ้มและความสามารถในการห่อหุ้มสารของลิโพโซม

ประสิทธิภาพการห่อหุ้มของลิโพโซมถูกวิเคราะห์โดยใช้วิธีการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) สารที่ถูกห่อหุ้มด้วยลิโพโซมจะถูกเติมลงในตัวกรองแบบแรงเหวี่ยงที่มีการคัดเลือกมวลโมเลกุลขนาด 100 กิโลดาลตัน (Amicon® Ultra-15, Millipore, Darmstadt, Germany) จากนั้นหลอดจะถูกปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที สารที่ไม่ถูกห่อหุ้มอยู่ในสารละลายด้านล่างจะถูกนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับกราฟมาตราฐานของสารละลายตัวอย่าง โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ 446 นาโนเมตร สำหรับลูทีน 450 นาโนเมตร สำหรับบีตา-แคโรทีนและสารสกัดจุลสาหร่ายและ 460 นาโนเมตร สำหรับซีอาแซนทีนตามลำดับ โดยสร้างกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0–80 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เปรียบเทียบหาปริมาณสารที่ไม่ถูกห่อหุ้มและนำไปคำนวณตาม Equation 3 และ Equation 4

$$\% \text{ Encapsulation Efficiency (EE\%)} = ((Ci - Cf)/ Ci) \times 100 \quad (3)$$

Where Ci is the concentration of free compound added initially in the pre-mix liposome during encapsulation preparation, and Cf is the final concentration thiostrepton in the aqueous phase

$$\% \text{ Loading capacity} = (\text{Encapsulated compound content (mg)}/ \text{Total lipid content (mg)}) \times 100 \quad (4)$$

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลจากการทดลอง 3 ซ้ำ จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ student's t-test ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การจำแนกชนิดของรงควัตถุในสารสกัดสาหร่ายจะทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่าสารสกัดที่ได้นั้นประกอบไปด้วยรงควัตถุชนิดใดบ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งรงควัตถุในกลุ่มแคโรทีนอยด์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์และจำแนกชนิดของรงควัตถุด้วยเทคนิค HPLC พบว่าสารรงควัตถุคลอโรฟิลล์ บี ลูทีน ซีอาแซนทีน คลอโรฟิลล์ เอและบีตา-แคโรทีนถูกชะออกมาในช่วงนาทีที่ 6.5, 7.4, 8.5, 9.2 และ 16.1 ตามลำดับ (Fig. 1) ซึ่งสามารถแสดงอัตราส่วนของสารรงควัตถุที่พบในสารสกัดดังแสดงใน Fig.2 พบว่าในสารสกัดมีอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของลูทีนสูงที่สุดเท่ากับ 31% รองลงมาเป็นคลอโรฟิลล์ 27% ซึ่งประกอบด้วยคลอโรฟิลล์ เอ 1% และคลอโรฟิลล์ บี 26% บีตา-แคโรทีน 16% และซีอาแซนทีน 3% นอกจากนี้สารสกัดสาหร่ายยังประกอบไปด้วยรงควัตถุชนิดอื่น ๆ อีก 23% ซึ่งบางส่วนคาดว่าเป็นนีโอแซนทีนและไวโอลาแซนทีน เมื่อพิจารณาเทียบกับผลโครมาโทแกรมของ Gupta et al. (2015) จากการสกัดสาหร่ายด้วยตัวทำละลาย 100% เอทานอล พบปริมาณลูทีน 12.94±0.09 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารสกัดสาหร่าย ซึ่งมีปริมาณมากกว่างานวิจัยก่อนหน้าของ Lee et al. (2018) ที่สกัดสารสกัดสาหร่าย *C. reinhardtii* ด้วยตัวทำละลาย 70% เอทานอล อีกทั้งสารสกัดสาหร่ายในงานวิจัยนี้ยังพบซีอาแซนทีน 2.64±0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารสกัดสาหร่าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการแยกสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์เลือกใช้ คอลัมน์ C30 เหมาะสมกว่าคอลัมน์ C18 และสามารถจำแนกชนิดของซีอาแซนทีนได้ดียิ่งขึ้นกว่ากระบวนการแยกแบบเดิม

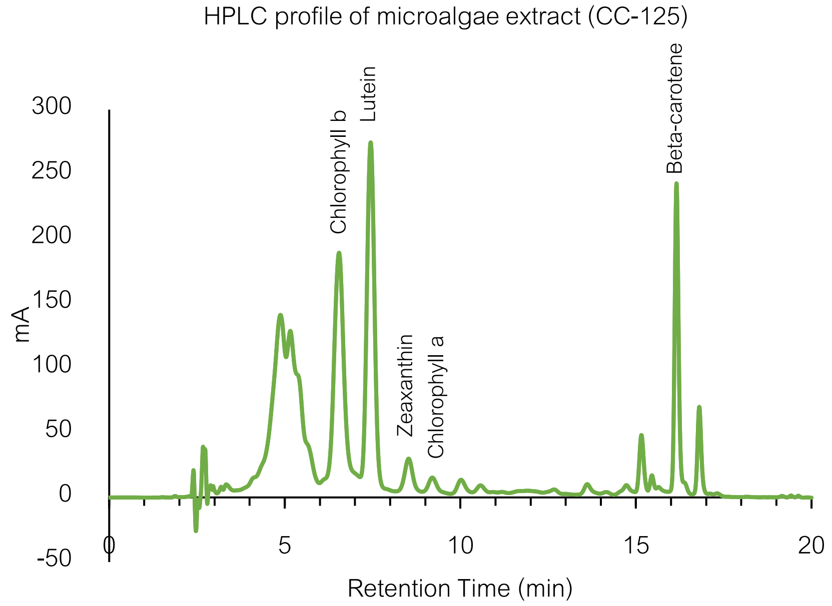


Fig. 1 HPLC chromatograms of microalgae extract

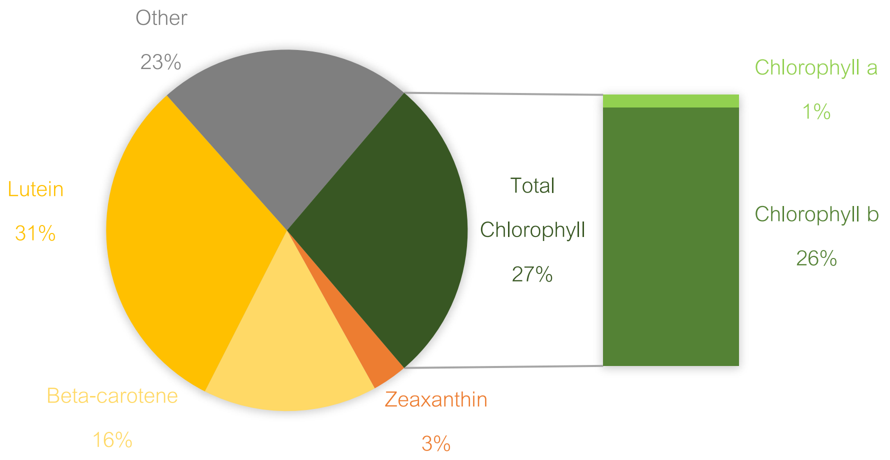


Fig. 2 Percentage of area under the pigment peak found in microalgae extract

สารที่มีฤทธิในการต้านอนุมูลอิสระนั้นมีหลายกลุ่ม อาทิ แคโรทีนอยด์ ฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ดังนั้นจึงได้ทำการตรวจวัดปริมาณของสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในสารสกัดจุลสาหร่าย 1 มิลลิกรัม เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน พบปริมาณฟีนอลิกเท่ากับ 0.39±0.04 มิลลิกรัมของกรดแกลลิคต่อกรัมของสารสกัด และปริมาณฟลาโวนอยด์ เท่ากับ 3.25±0.18 มิลลิกรัมของเควอซิตินต่อกรัมของสารสกัด ผลการทดลองดังแสดง Table 1

Table 1 Phenolic and flavonoid content of microalgae extract

Microalgae	Phenolic (mg GAE/ g extract)	Flavonoid (mg QE/ g extract)
CC-125	0.30±0.04	3.25±0.18

จากการศึกษากิจกรรมในการต้านสารอนุมูลอิสระเป็นของสารสกัดจุลสาหร่ายเทียบกับสารรงควัตถุบริสุทธิ์และกรดวิตามินซีที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบกิจกรรมในการต้านสารอนุมูลอิสระของสารสกัดจุลสาหร่ายเท่ากับ 8.67±0.34% ซึ่งใกล้เคียงกับสารมาตรฐานบีตา-แคโรทีน (7.97±0.46%) แต่น้อยกว่าสารมาตรฐานลูทีน 43.97±1.07% ซีอาแซนทีน 47.17±1.19% และกรดวิตามินซี 60.86±1.60% อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Fig. 3A) เมื่อทำการเปรียบเทียบสารสกัดที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานกรดวิตามินซี $y = 0.5996x$; $R^2 = 0.998$ เทียบเท่ากรดวิตามินซีเท่ากับ 14.56±0.65, 72.72±1.60, 78.35±2.29 และ 13.61±0.50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สำหรับสารสกัดจุลสาหร่าย ลูทีน ซีอาแซนทีนและบีตาแคโรทีน ตามลำดับ ดังแสดงใน Fig. 3B

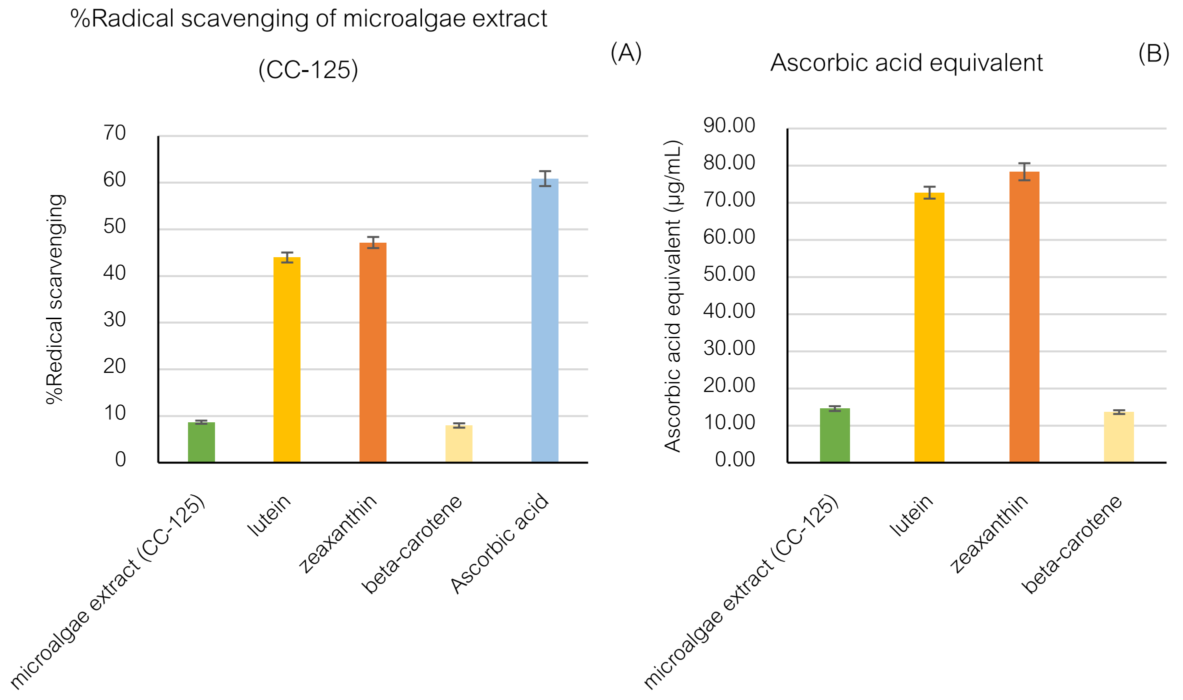


Fig. 3 Radical scavenging of microalgae extract: (A) Percentage of radical scavenging of microalgae extract (CC-125); (B) Ascorbic acid equivalent of microalgae extract

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยใช้วิธีการสร้างฟิล์มบางที่ได้รับการพัฒนามาก่อนหน้านี้ของ Wongkhieo et al. (2021) ให้มีความเหมาะสมกับการขนส่งโมเลกุลขนาดเล็กได้ลิโพโซมขนาด 86.08±3.40 นาโนเมตร เมื่อทำการห่อหุ้มรงควัตถุบริสุทธิ์ ได้แก่ ลูทีน ซีอาแซนทีน บีตา-แคโรทีน พบว่ามีขนาด 109.97±4.13, 94.34±1.12, 94.03±0.78 นาโนเมตร ในขณะที่ลิโพโซมของสารสกัดสาหร่าย 1 มิลลิกรัม และลิโพโซมสารสกัดสาหร่าย 5 มิลลิกรัม มีขนาด 91.36±3.47 และ 137.83±1.76 นาโนเมตร ตามลำดับ (Table 2) จะเห็นว่าอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อบรรจุสารตัวอย่างเข้าไปซึ่งคล้ายกับการทดลองของ Elkholy et al. (2021) ที่เมื่อเติมสารรงควัตถุลูทีนอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีขนาดที่เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของสารภายในอนุภาค อีกทั้งยังมีผลต่อประจุสุทธิบนผิวของอนุภาคโดยผลจากการทดลองแสดงค่าประจุสุทธิของอนุภาคลิโพโซมลูทีน ลิโพโซมซีอาแซนทีน ลิโพโซมบีตา-แคโรทีนเท่ากับ -10.52±1.29, -7.42±2.10, -10.10±5.50 มิลลิโวลต์ โดยแสดงค่าประจุลบลดลงเมื่อเทียบอนุภาคลิโพโซม (-13.04±5.97 มิลลิโวลต์) ขณะที่อนุภาคนาโนลิโพโซมสารสกัดสาหร่าย 1 มิลลิกรัม (-18.15±9.53 มิลลิโวลต์) และลิโพโซมสารสกัดสาหร่าย 5 มิลลิกรัม (-42.89±4.30 มิลลิโวลต์) พบค่าประจุลบเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารสกัด ทั้งนี้อาจเป็นผลมา

จากสารองค์ประกอบบางชนิดที่ถูกสกัดออกมาในขั้นตอนการสกัดสารสกัดจุลสาหร่ายและสามารถละลายได้ใน 100% เอทานอลที่มีความมีขั้ว นอกจากนี้ตัวชี้วัดที่สำคัญของการพัฒนาอนุภาคนาโนคือ การกระจายตัวของอนุภาคภายในสารละลายของลิโพโซมทั้งหมดที่สังเคราะห์ได้ มีค่าอยู่ในช่วง 0.15–0.38 โดยเป็นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการกระจายตัวของอนุภาคโดยอ้างอิงจาก Jiao et al. (2018) นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกักเก็บสารของสารรงควัตถุลูทีน ซีอาแซนทีนและบีตา-แคโรทีนมีค่าเท่ากับ 99.32%, 83.99% และ 85.67% ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นโอกาสที่ค่อนข้างสูงในการถูกกักเก็บของสารรงควัตถุดังกล่าวภายในอนุภาคนาโนลิโพโซมของสารสกัดสาหร่าย 1 มิลลิกรัม ที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บสาร 62.34% ในขณะที่ลิโพโซมของสารสกัดสาหร่าย 5 มิลลิกรัม มีประสิทธิภาพในการกักเก็บสารลดลงเหลือ 49.34% อาจเนื่องมาจากค่าประจุสุทธิของสารที่มีความเป็นลบเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนของลิพิดที่น้อยกว่าสารสกัดสาหร่าย อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงค่าความสามารถในการบรรจุสารสกัดสาหร่ายภายในอนุภาคแสดงค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารสกัดสาหร่ายจาก 1 มิลลิกรัม (15.78%) เป็น 5 มิลลิกรัม (62.45%) ผลการทดลองดังแสดง Table 2

Table 2 Encapsulation of carotenoid pigments and microalgae extract using liposome

	Size (nm)	Zeta potential (mV)	PDI	EE%	LC%
Liposome (Lip)	86.08±3.40	-13.04±5.97	0.38±0.01	NA	NA
Lip-lutein	109.97±4.13	-10.52±1.29	0.33±0.04	99.32	5.73
Lip-zeaxanthin	94.34±1.12	-7.42±2.10	0.25	83.99	4.85
Lip-beta-carotene	94.03±0.78	-10.10±5.50	0.38	85.67	4.66
Lip-microalgae extract (1mg)	91.36±3.47	-18.15±9.53	0.23±0.08	62.34	15.78
Lip-microalgae extract (5mg)	137.83±1.76	-42.89±4.30	0.15±0.03	49.34	62.45

สรุป

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ของสารสกัดจุลสาหร่าย *C. reinhardtii* สายพันธุ์ CC-125 กิจกรรมของสารสกัดในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ อีกทั้งยังได้พัฒนากระบวนการห่อหุ้มสารสกัดสาหร่ายและรงควัตถุบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคทางนาโนเทคโนโลยี จากการศึกษาพบว่าในสารสกัดมีสัดส่วนของลูทีนค่อนข้างสูงกว่ารงควัตถุชนิดอื่น ซึ่งอาจจะเป็นหนึ่งในสารองค์ประกอบที่ส่งเสริมกิจกรรมในการต้านอนุมูลอิระของสารสกัดสาหร่าย นอกจากนี้การศึกษาการห่อหุ้มอนุภาคนาโนด้วยลิโพโซมโดยวิธีการสร้างฟิล์มบางแสดงให้เห็นว่าสารรงควัตถุลูทีนเหมาะสมกับสูตรที่ใช้ทำการทดลอง เนื่องจากได้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มที่ค่อนข้างสูงทำให้กระบวนการห่อหุ้มอนุภาคดังกล่าวมีความเหมาะสม ซึ่งอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการและการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสารสกัดสาหร่ายนี้จะสามารถนำไปใช้เพื่อเพิ่มความสเถียรของสารและพัฒนากระบวนการนำส่งสารเหล่านี้เข้าสู่เซลล์เป้าหมายที่สนใจได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสาหร่ายจากห้องปฏิบัติการของ รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ หยกทองวัฒนา ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลและได้รับทุนสนับสนุนจากเงินกองทุนโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 สัญญารับทุน SCA-CO-2563-12172-TH

เอกสารอ้างอิง

Attard, E. 2013. A rapid microtitre plate folin-clocalteu method for the assessment of polyphenols. Open Life Sciences. 48.

Barkia, I., Saari, N., Manning, S.R. 2019. Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition. Mar Drugs. 7(5):304. doi.org/10.3390/md17050304

Chandra, S., Khan, S., Avula, B., Lata, H., Yang, M.H., ElSohly, M.A., Khan, I.A. 2014. Assessment of Total Phenolic and Flavonoid Content, Antioxidant Properties, and Yield of Aeroponically and Conventionally Grown Leafy Vegetables and Fruit Crops: A Comparative Study. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine 1–9. doi.org/10.1155/2014/253875

Elkholy, NS., Shafaa, MW., Mohammed, HS. 2021. Cationic liposome-encapsulated carotenoids as a potential treatment for fibromyalgia in an animal model. Biochim. Biophys. Acta. Mol. Basis. Dis. 1867(7): 166150. doi.org/10.1016/j.bbadis.2021.166150

Goodenough, U.W. 1992. Green yeast. Cell 70(4): 533–538. doi.org/10.1016/0092-8674(92)90424-b

Gupta, P., Sreelakshmi, Y., Sharma, R. 2015. A rapid and sensitive method for determination of carotenoids in plant tissues by high performance liquid chromatography. Plant Methods. 11(1). doi.org/10.1186/s13007-015-0051-0

Herald, T., Gadgil, P., and Tilley, M. 2012. High-throughput micro plate assays for screening flavonoid content and DPPH-scavenging activity in sorghum bran and flour. J Sci. Food Agric. 92: 2326–2331.

Harris, E.H. 2001. *Chlamydomonas* as a model organism. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 52: 363–406

Jiao, Y., Li, D., Liu, C., Chang, Y., Song, J., Xiao, Y. 2018. Polypeptide - decorated nanoliposomes as novel delivery systems for lutein. RSC advances. 8(55):31372–31381. doi.org/10.1039/c8ra05838e

Lafarga, T. 2019. Effect of microalgal biomass incorporation into foods: Nutritional and sensorial attributes of the end products. Algal Research. doi.org/10.1016/j.algal.2019.101566

Lee, A., Kim, J.Y., Heo, J., Cho, D.H., Kim, H.S., An, I.S., An, S., Bae, S. 2018. The inhibition of melanogenesis via the PKA and ERK signaling pathways by *Chlamydomonas reinhardtii* extract in B16F10 melanoma cells and artificial human skin equivalents. J. Microbiol. Biotechnol. 28(12): 2121–2132. doi: 10.4014/jmb.1810.10008

Wongkhieo, S., Numdee, K., Lam, E.W.F., Choowongkomon, K., Kongsema, M., Khongkow, M. 2021. Liposomal thiostrepton formulation and its effect on breast cancer growth inhibition. J. Pharm. Sci. 110(6): 2508–2516. doi.org/10.1016/j.xphs.2021.01.018

การตรวจวัดทริเทียมระดับต่ำในน้ำประปาส่วนภูมิภาคของประเทศไทยด้วยวิธีการเพิ่มความเข้มข้นด้วยไฟฟ้า

Measurement of low-level tritium in Thailand's provincial tap water using electrolytic enrichment method

จิตรานุช จันทรส[a], **เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง**[a,*], **วันวิสา สุดประเสริฐ**[a], **มณฑล ยงค์ประวัติ**[b], **จักรกฤช แสงกรกฎ**[b], **ดลฤดี โตเย็น**[c]

Chittranuch Chantarot[a], Kiadtisak Saenboonruang[a,*], Wanwisa Sudprasert[a], Monthon Yongprawat[b], Chakrit Saengkorakot[b], Donruedee Toyen[c]

[a]ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) นครนายก 26120

[c]ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Applied Radiation and Isotopes, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Nuclear Technology Research and Development Center (NTRDC), Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), Nakhon Nayok 26120, Thailand

[c]Department of Materials Science, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fscikssa@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับความเข้มข้นทริเทียมในตัวอย่างน้ำประปาส่วนภูมิภาคของประเทศไทยสำหรับการสร้างฐานข้อมูลระดับความเข้มข้นทริเทียมในการเฝ้าระวังกิจกรรมทางนิวเคลียร์หรืออุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ภายในประเทศและประเทศใกล้เคียง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) จำนวน 11 สถานีทั่วประเทศไทย จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Enrichment) ร่วมกับเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว (Liquid Scintillation Counter) ผลการวิจัยพบว่าความเข้มข้นทริเทียมในน้ำประปาอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8±0.1 ถึง 2.3±0.2 TU (Tritium Unit) ซึ่งต่ำกว่าค่าความเข้มข้นสูงสุดของทริเทียมสำหรับน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค ซึ่งกำหนดโดยองค์การอนามัยโลก (WHO) โดยมีค่าอยู่ที่ 10,000 Bq/L (8.47×10^4 TU) นอกจากนี้พบว่าระดับความเข้มข้นทริเทียมมีค่าเพิ่มขึ้นตามตำแหน่งละติจูดของตัวอย่างน้ำซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ภาคเหนือและต่ำสุดที่ภาคใต้และพบว่าระดับความเข้มข้นทริเทียมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อตัวอย่างน้ำประปาอยู่ห่างจากชายฝั่งมากขึ้นหรืออยู่สูงจากระดับน้ำทะเลมากขึ้น

คำสำคัญ: เครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว, ทริเทียม, น้ำประปา, เพิ่มความเข้มข้นด้วยไฟฟ้า

Abstract

This study aimed to assess tritium concentrations in Thailand's provincial tap water in order to establish a database for surveillance of nuclear facilities or nuclear accidents within the country and neighboring countries. Tap water samples were collected from 11 provincial stations through the Provincial Waterworks Authority (PWA). Then, the water samples were analyzed using an electrolytic enrichment method and the tritium levels were measured using liquid scintillation counter (LSC). The results showed that the tritium concentrations in tap water were between 0.8±0.1 and 2.3±0.2 TU (Tritium Unit), which were below the limit for tritium level in drinking water set by the World Health Organization (WHO), which is 10,000 Bq/L (8.47×10^4 TU). Furthermore, the study revealed that the tritium levels tended to increase with latitudes of the collected samples (highest value in the north and lowest value in the south). The tritium concentrations also tended to increase with the distances from the coastlines as well as the altitudes from sea levels of the collected sample.

Keywords: Electrolytic Enrichment, Liquid Scintillation Counter, Tap water, Tritium

คำนำ

ทริเทียม (Tritium: ^{3}H) เป็นหนึ่งในไอโซโทปของธาตุไฮโดรเจนที่มีความสำคัญต่อระบบน้ำและประชากรโลก โดยทริเทียมเป็นผลผลิตที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) และอะตอมของไนโตรเจนในชั้นบรรยากาศโลก ดังสมการ ^{14}N (n, ^{3}H) ^{12}C (Atwood, 2013) ซึ่งทริเทียมที่เกิดขึ้นนี้ สามารถสลายตัวให้อนุภาคเบต้าพลังงานต่ำ (E_{max} = 18.6 keV) และอะตอมของฮีเลียม (^{3}He) โดยทริเทียมมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 12.32±0.02 ปี ทั้งนี้ทริเทียมสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับอะตอมของไฮโดรเจนในโมเลกุลน้ำจนก่อให้เกิดน้ำที่มีองค์ประกอบของทริเทียมอยู่ในโมเลกุล โดยมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Tritiated Water (HTO) ซึ่ง HTO มีคุณสมบัติทางเคมีเช่นเดียวกับน้ำทั่วไป ด้วยเหตุนี้ ทริเทียมที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศจึงสามารถเคลื่อนย้ายจากชั้นบรรยากาศลงมาบนผิวโลกผ่านวัฏจักรของน้ำ โดยสามารถเกิดการควบแน่นและปนเปื้อนสู่น้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินได้ ซึ่งแหล่งน้ำดังกล่าวเป็นแหล่งน้ำสำหรับการผลิตน้ำประปาที่สำคัญ อีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามหากแหล่งน้ำเหล่านี้เกิดการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีโดยเฉพาะทริเทียมในระดับสูง อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อุปโภคบริโภคแหล่งน้ำนั้น ๆ ดังนั้นการศึกษาถึงพฤติกรรมหรือโอกาสของการปนเปื้อนของแหล่งน้ำจึงมีความสำคัญ โดยเป็นการเพิ่มความมั่นใจด้านความปลอดภัยให้กับประชาชนที่อุปโภคและบริโภคจากแหล่งน้ำดังกล่าว

โดยทั่วไป ทริเทียมมีอัตราการผลิตในชั้นบรรยากาศประมาณ 0.5-1.9 atoms/cm^{3}s (Okada et al., 1993) แต่ทั้งนี้พบว่าปริมาณความเข้มข้นของทริเทียมในบรรยากาศและผิวโลกสามารถมีค่าเพิ่มขึ้นได้จากเทคโนโลยีที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น การทดสอบหรือการใช้อาวุธนิวเคลียร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Thermonuclear Test) ซึ่งมีการปลดปล่อยนิวตรอนเร็วเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของทริเทียมในชั้นบรรยากาศอย่างรวดเร็วและส่งผลต่อความเข้มข้นของทริเทียมในน้ำผิวดินที่นำมาผลิตน้ำประปาด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการทดสอบอาวุธนิวเคลียร์ในช่วงปี ค.ศ.1952-1963 ที่ผ่านมา ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของทริเทียมในตัวอย่างน้ำฝนที่เก็บจากกรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1,000 เท่าจากระดับเริ่มต้น นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งรวมทั้งเตาปฏิกรณ์วิจัย (Research Reactor) เตาปฏิกรณ์กำลัง (Power Reactor) โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear Power Plant) กระบวนการคืนสภาพเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว (Nuclear Fuel Reprocessing Processes) และอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ที่ไม่คาดคิด สามารถส่งผลให้ทริเทียมในสิ่งแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ทั้งนี้ทริเทียมซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคเบต้า อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงทางด้านสุขภาพอันเกิดจากการได้รับปริมาณรังสีก่อไอออนเกินขีดจำกัดความปลอดภัยได้ ซึ่งองค์การอนามัยโลก ได้กำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดของทริเทียมในน้ำสำหรับการอุปโภคและบริโภคไว้ในคู่มือแนะนำคุณภาพน้ำดื่มประจำปี ค.ศ. 2011 โดยมีค่าเท่ากับ 8.47×10^{4} TU (10^{4} Bq/L) (WHO, 2011) จากปัจจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่างานวิจัยด้านการตรวจวัดปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญยิ่ง โดยเฉพาะน้ำประปาซึ่งมีการแจกจ่ายให้กับประชาชนภายในประเทศสำหรับการอุปโภคและบริโภค โดยในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 การประปาส่วนภูมิภาคดูแลพื้นที่ครอบคลุม 74 จังหวัดทั่วประเทศไทย มีปริมาณการใช้น้ำสูงถึง 106 ล้านลูกบาศก์เมตร (การประปาส่วนภูมิภาค, 2564) ซึ่งคณะผู้วิจัยฯ เล็งเห็นว่าเนื่องจากสถาบันวิจัยเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สทน.) มีแผนการดำเนินการก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยรุ่นใหม่ในอนาคตอันใกล้ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อระดับของปริมาณทริทียมในแหล่งน้ำได้ ดังนั้นการตรวจวัดรังสีในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในตัวอย่างน้ำประปาจึงมีความจำเป็นในการกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างน้ำประปาก่อนที่ประเทศไทยจะมีสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ขนาดใหญ่ โดยสามารถใช้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลอ้างอิงระดับความเข้มข้นของทริเทียมในน้ำประปาหรือน้ำผิวดิน เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำที่เก็บจากบริเวณใกล้เคียงสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ที่อาจมีการปนเปื้อนของธาตุกัมมันตรังสีในอนาคตได้ นอกจากนี้การศึกษาพฤติกรรมของทริเทียมต่อความสัมพันธ์เชิงอุตุนิยมวิทยาและภูมิศาสตร์ของพื้นที่ เช่น ละติจูดและ

ลองจิจูด (Latitude/ Longitude) ความสูง (Altitude) ฤดูกาล (Seasonal) ภูมิภาคแถบชายฝั่งและภาคพื้น (Ocean and Continental) เป็นต้น ยังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาทิศทางการไหลของน้ำบาดาลโดยใช้ทริเทียมเป็นสารรังสีติดตาม (Radiotracer) หรือใช้สำหรับศึกษาอายุของน้ำบาดาล เพื่อให้สามารถคาดการณ์และศึกษาพฤติกรรมของทริเทียมในธรรมชาติได้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

Table 1 Chemical names, roles, and suppliers/companies used for the measurement of low-level tritium concentrations

Chemicals	Role	Supplier/Company
Liquid Scintillation Cocktails	Scintillator	PerkinElmer, Inc., USA
Sodium peroxide, Na_2O_2	Conductor	PanReac AppliChem ITW Reagents, Germany
Lead(II) chloride, $PbCl_2$	Neutralize pH	Merck KGaA, Germany
Dead water (Tritium free water)	Tritium free Standard	Inhouse standard
Spike (High tritium content)	Secondary Standard	Inhouse standard
Tritium Standard	Primary Standard	Prepared from SRM 4926/US National Institute of Standards & Technology, (NIST)

การเก็บตัวอย่างน้ำประปา

เพื่อให้ผลการทดลองสะท้อนปริมาณความเข้มข้นทริเทียมในน้ำประปาคลอบคลุมพื้นที่ทั่วทั้งประเทศ คณะวิจัยได้ทำการประสานงานและร่วมมือกับการประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) โดยเลือกสถานีเก็บตัวอย่างจำนวน 11 สถานีของ กปภ. จาก 10 เขต ครอบคลุมพื้นที่ 74 จังหวัดทั่วประเทศ ดังแสดงใน Fig. 1 และ Table 2 ทำการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างทุก 2 เดือนเป็นระยะเวลา 1 ปี เริ่มเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2565 (รวมทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง/ปี/สาขา) วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำประปา ใช้ขวดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (PP) ขนาด 1 ลิตร เก็บตัวอย่างโดยการล้างขวดด้วยน้ำตัวอย่างอย่างน้อย 2 ครั้ง ก่อนบรรจุน้ำตัวอย่างให้เต็มขวด ปิดปากขวดและพันด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันการระเหยและหลีกเลี่ยงการแลกเปลี่ยนไอโซโทประหว่างตัวอย่างน้ำประปากับความชื้นในอากาศ

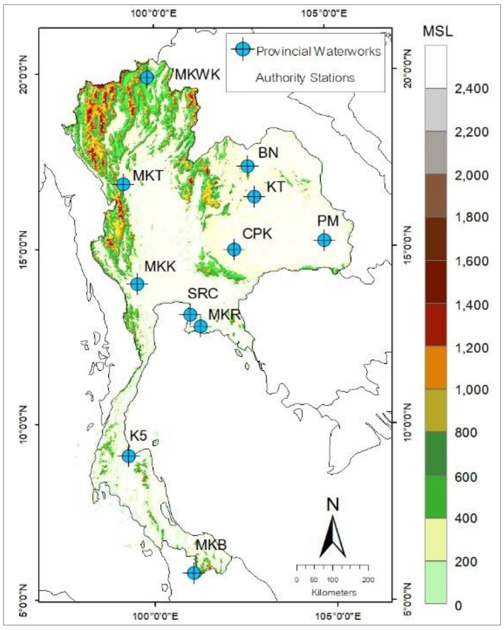


Fig. 1 Location map of the study area, geography

Table 2 11 tap water sampling stations from PWA

Stations	Provinces
Sriracha (Nong Kho) Pump Station (SRC)	Chonburi
Mae Khai Rayong Pump Station (MKR)	Rayong
Chaloem Phra Kiat Pump Station (CPK)	Nakhon Ratchasima
Mae Khai Kanchanaburi Pump Station (MKK)	Kanchanaburi
Km.5 Pump Station (K5)	Surat Thani
Mae Khai Betong Pump Station (MKB)	Yala
Ko Tha Pump Station (KT)	Khon Kaen
Ban Nikhom Pump Station (BN)	Udon Thani
Pho Moon Pump Station (PM)	Ubon Ratchathani
Mae Khai Wang Kham Pump Station (MKWK)	Chiang Rai
Mae Khai Tak Pump Station (MKT)	Tak

กระบวนการตรวจวัดทริเทียม

โดยทั่วไปการวัดและวิเคราะห์ปริมาณทริเทียมในตัวอย่างน้ำ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว (LSC) อย่างไรก็ตาม จากผลการรายงานปริมาณทริเทียมในน้ำฝนของประเทศไทย มีค่าประมาณ 1.1-4.6 TU ในปี ค.ศ. 2010-2011 (Yongprawat et al., 2012) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดที่เครื่อง LSC สามารถวัดได้ (Minimal

detectable activity: MDA) ที่ 13.77 TU ดังนั้นในการศึกษาปริมาณทริเทียมในธรรมชาติ จึงนิยมใช้หลักการเพิ่มความเข้มข้นทริเทียมด้วยไฟฟ้า เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจวัดให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นทั้งนี้ตัวอย่างน้ำประปาจากทุกสาขาจะถูกรวบรวมส่งห้องปฏิบัติการไอโซโทปไฮโดรโลยี ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ โดยมีการเพิ่มค่าความเข้มข้นของทริเทียมขึ้นประมาณ 20-25 เท่า ซึ่งก่อนการเริ่มกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น ตัวอย่างน้ำจะถูกกลั่นให้มีค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ไม่เกิน 30 µS/cm โดยในแต่ละรอบของการเพิ่มความเข้มข้น สามารถบรรจุตัวอย่างน้ำได้ทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ซึ่งรวมถึงน้ำที่ทราบค่าทริเทียมจำนวน 3 ตัวอย่าง (Spike) และ น้ำที่ไม่มีทริเทียมจำนวน 2 ตัวอย่าง (Dead water) สำหรับใช้ในการสร้างค่ามาตรฐานในการตรวจวัด ทั้งนี้ระหว่างกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำจะถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง -2 ถึง +4 °C เพื่อลดการสูญเสียตัวอย่างน้ำจากการระเหย และทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.5–10 A โดยมีค่าประจุไฟฟ้ารวม 1423 Ah จากนั้นตัวอย่างน้ำจะถูกทำให้เป็นกลางด้วยสาร $PbCl_2$ (s) และผสมกับสารเรืองแสง Liquid Scintillation Cocktail (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Ultima Gold LLT) ในอัตราส่วน 8:12 มิลลิลิตร จากนั้นทำการนับวัดด้วยเครื่อง LSC (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Quantulus 1220) จำนวน 10 รอบ ๆ ละ 50 นาที และทำการคำนวณความเข้มข้นทริเทียมด้วยวิธีการของ Rozanski and Groning (2004)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นทริเทียมของตัวอย่างน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาค ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2565 พบความเข้มข้นทริเทียม (Tritium concentration) ของตัวอย่างน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8±0.1 ถึง 2.3±0.2 TU ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.6±0.2 TU (*n* = 66) โดยตัวอย่างน้ำจากภาคเหนือมีค่าความเข้มข้นทริเทียมเท่ากับ 2.0±0.3 TU และตัวอย่างน้ำจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคใต้พบค่าความเข้มข้นทริเทียมเฉลี่ยเท่ากับ 1.7±0.2, 1.4±0.2, 1.6±0.2 และ 1.1±0.2 TU ตามลำดับ ทั้งนี้จากข้อมูลผลความเข้มข้นทริเทียมในน้ำประปาของประเทศไทยมีค่าสอดคล้องกับความเข้มข้นทริเทียมในน้ำฝนของประเทศเวียดนามที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.51-7.07 TU ในปี ค.ศ. 2011 (Anh et al., 2018)

Fig. 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทริเทียมกับตำแหน่งของสถานีเก็บตัวอย่าง พบว่าสถานีผลิตน้ำที่มีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กันหรืออยู่ในภูมิภาคเดียวกัน จะมีความเข้มข้นของทริเทียมที่ใกล้เคียงกันและมีค่าแตกต่างจากสถานีผลิตน้ำจากภูมิภาคอื่น โดยพบความเข้มข้นทริเทียมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ภาคเหนือและต่ำสุดอยู่ที่ภาคใต้ของประเทศ นอกจากนี้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทริเทียมเฉลี่ยกับละติจูด ใน Fig. 3 (a.) พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกที่มีค่า R^2 = 0.9169 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Rittirong et al. (2019) ที่พบว่าความเข้มข้นทริเทียมในสิ่งแวดล้อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตำแหน่งละติจูดของตัวอย่างโดยจะมีค่าสูงสุดบริเวณขั้วโลกเหนือ Tadros et al. (2014) และ Nakasone et al. (2019) สาเหตุเป็นเช่นนั้นเนื่องจาก ค่าขีดจำกัดสนามแม่เหล็กโลกตามแนวดิ่ง (Geomagnetic vertical cutoff rigidity, R_c) มีค่าต่ำสุดที่บริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ ส่งผลให้รังสีคอสมิกจากนอกโลกสามารถผ่านเข้าชั้นบรรยากาศบริเวณขั้วโลกเหนือและใต้ได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น ๆ และมีความเข้มของรังสีสูงสุด (Rodphothong et al., 2022) ทำให้ตรวจพบปริมาณทริเทียมสูง ในขณะที่ประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก (The Earth's magnetic equator) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าขีดจำกัดสนามแม่เหล็กโลกตามแนวดิ่งสูงที่สุดในโลก ทำให้รังสีคอสมิกจากนอกโลกผ่านเข้าชั้นบรรยากาศได้น้อย (Ruffolo, 2020) ส่งผลให้ความเข้มข้นทริเทียมในประเทศไทยต่ำกว่าในบริเวณแถบขั้วโลก ถ้าหากพิจารณาในส่วนภูมิภาคของประเทศไทย พบว่าภาคใต้มีการตรวจพบความเข้มข้นทริเทียมต่ำกว่าบริเวณภาคเหนือ สาเหตุเนื่องจากตำแหน่งภาคใต้ของไทยอยู่ชิดกับเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกทำให้รังสีคอสมิกผ่านเข้ามาได้น้อย จึงส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของทริเทียมน้อยกว่าบริเวณทางภาคเหนือ Fig. 3(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเข้มข้นทริเทียมเฉลี่ยกับระยะห่างจากชายฝั่ง (Distance from the coastline) ของสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ พบแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงบวก โดยมีค่า R^2 = 0.6651 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Ansari et al (2018) และ Chae and Kim (2019) ซึ่งระบุว่า น้ำฝนบริเวณชายฝั่งมีค่าความเข้มข้นทริเทียมที่ลดลงเนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนโมเลกุลของทริเทียมในน้ำฝนกับไอน้ำในมหาสมุทร (Oceanic moisture) ที่มีปริมาณทริเทียมโดยปกติต่ำกว่าแหล่งน้ำบนฝั่ง ดังนั้นน้ำฝนที่เกิดขึ้นใกล้ทะเลหรือชายฝั่งจึงมักมีความเข้มข้นทริเทียมที่ต่ำและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่พื้นทวีปหรือแผ่นดิน Fig. 3(c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทริเทียมเฉลี่ยกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล โดยข้อมูล 10 สถานี (เส้นความสัมพันธ์สีดำจุด) พบแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงบวก โดยมีค่า R^2 = 0.724 สอดคล้องกับการเกิดทริเทียมในธรรมชาติที่มักเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศชั้นสตาร์โทสเฟียร์ (Stratosphere) โดยมีการเคลื่อนที่และสะสมลงสู่ชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนบน (Stratosphere-to-troposphere transport: STT) ซึ่งอุดมด้วยไอทริเทียม (Tritium moisture) (Tadros et al., 2014) ดังนั้นเมื่อก้อนเมฆลอยผ่านพื้นที่ที่มีระดับความสูงที่สูงขึ้น ส่งผลให้เมฆมีโอกาสในการแลกเปลี่ยนไอทริเทียม (Isotopic exchange) ที่ชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนบนมากขึ้น น้ำฝนที่กลั่นจากพื้นที่สูง จึงมีปริมาณความเข้มข้นทริเทียมที่สูงกว่าน้ำฝนที่กลั่นตัวจากพื้นที่ระดับต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตาม สถานีผลิตน้ำแม่ข่ายเบตง จังหวัดยะลา (MKB) เป็นสถานีที่มีผลไม่สอดคล้องกับสถานีอื่น โดยมีค่าระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางสูงกว่าสถานีอื่น แต่กลับมีค่าความเข้มข้นทริเทียมต่ำกว่าสถานีอื่นที่มีระดับความสูงต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสถานี MKB ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดภาคใต้ของไทย มีลักษณะเป็นคาบสมุทรยาวแหลมขนาบด้วยอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ที่มีภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน (Tropical monsoon climate: Am zone) และฝนตกชุกนานต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของทริเทียมในน้ำฝนบริเวณนี้ อาจมีค่าลดลงจากการแลกเปลี่ยนไอโซโทประหว่างไอน้ำและความชื้นในบรรยากาศของพื้นที่ที่มีความเข้มข้นทริเทียมต่ำ (Tadros et al., 2014)

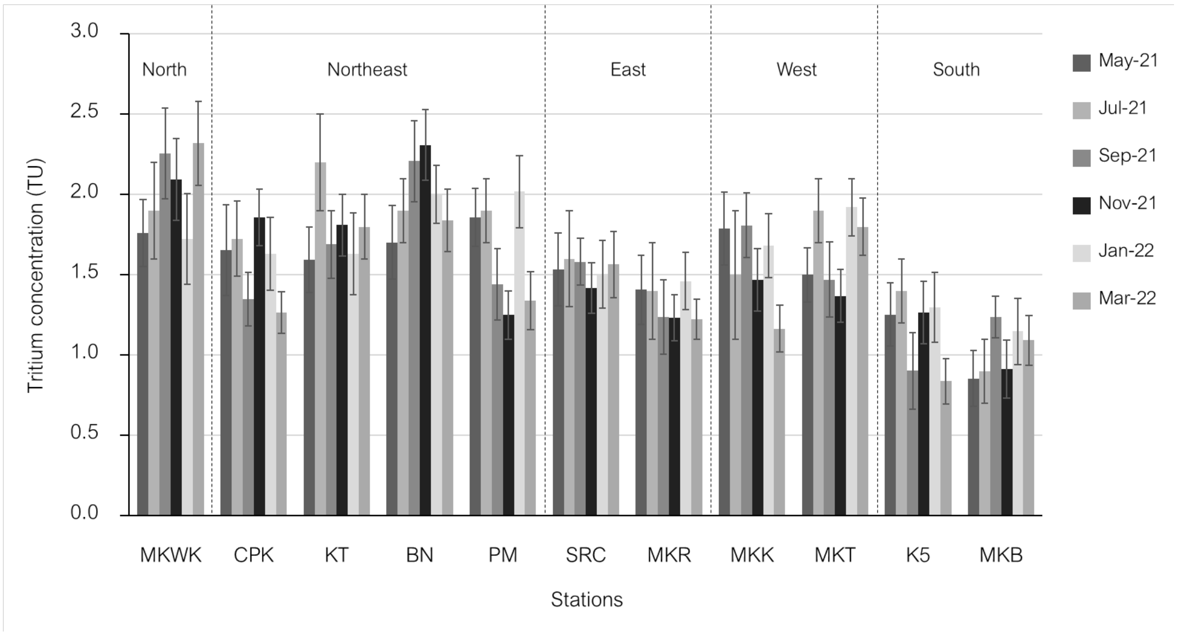


Fig. 2 Tritium concentration in 11 PWA tap water stations between May 21 and March 22, with the stations being classified into North, Northeast, East, West and South

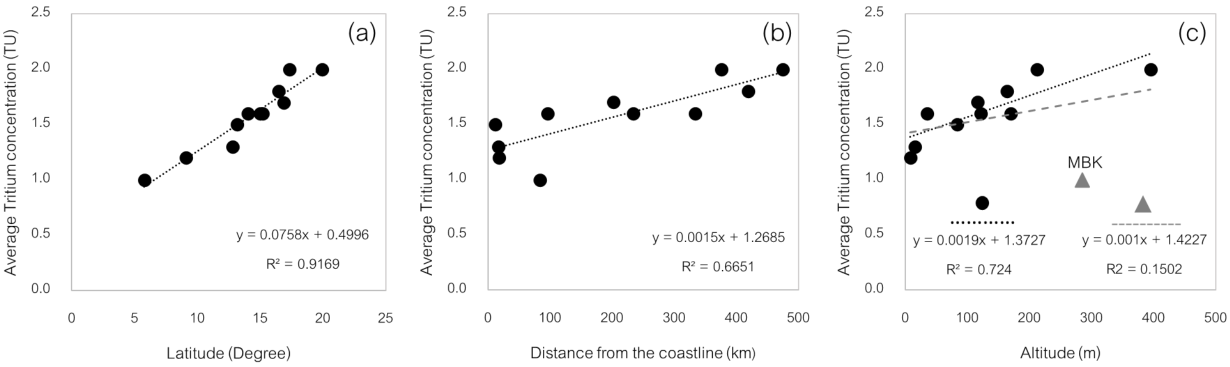


Fig. 3 Relationships between average tritium concentration (TU) in 11 tap water stations and three geographical parameters: (a) latitude (degree); (b) distance from the coastline (km); and (c) altitude (m). Note that there are two data correlations in the graph (c) : 1) grey dot line (------) displays correlation from 11 tap water stations with an R^2 = 0.1502, and 2) black dot line (·········) displays correlation from 10 tap water stations with an R^2 = 0.724 (without MKB station)

สรุปผลการทดลอง

ความเข้มข้นทริเทียมของตัวอย่างน้ำประปาส่วนภูมิภาคของประเทศไทยจำนวน 11 สถานี มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8±0.1 ถึง 2.3±0.2 TU โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.6±0.2 TU ซึ่งต่ำกว่าขีดจำกัดปริมาณความเข้มข้นทริเทียมในน้ำดื่ม (Limit for tritium in drinking water) กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก ซึ่งมีค่าที่ 10,000 Bq/L (8.47×10^4 TU) และจากการศึกษาพฤติกรรมของทริเทียมกับข้อมูลเชิงพื้นที่ ในการเก็บตัวอย่างน้ำประปา พบว่าความเข้มข้นทริเทียมเฉลี่ยของตัวอย่างน้ำประปามีค่าสูงสุดที่ภาคเหนือและต่ำสุดที่ภาคใต้ ซึ่งความเข้มข้นทริเทียมในตัวอย่างน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามละติจูด ระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่พื้นทวีปหรือแผ่นดิน และระดับความสูงของสถานีเก็บตัวอย่างน้ำเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง ทั้งนี้ผลการวิจัยการตรวจวัดระดับทริเทียมในตัวอย่างน้ำประปานี้ สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบปริมาณทริเทียมในแหล่งน้ำก่อนการก่อสร้างหรือดำเนินการเดินเครื่องเตาปฏิกรณ์ภายในประเทศไทยในอนาคต รวมถึงอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ เพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยของน้ำประปาสำหรับการอุปโภคและบริโภคต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยร่วม (Joint Research Program) ตามโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างไทย – ญี่ปุ่น (NRCT – JSPS) จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอขอบคุณการประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำประปาและผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไอโซโทปไฮโดรโลยี ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

การประปาส่วนภูมิภาค. 2564 ข้อมูลสถิติการให้บริการ. https://www.pwa.co.th/support-units/service, 6 กรกฎาคม 2564.

Anh, H.L., Anh, V.T., Giap, T.V., Hong Thinh, N.T., Minh, T.K., Hoai, V. 2018. Monitoring of tritium concentration in Hanoi's precipitation from 2011 to 2016. J. Environ. Radioact. 192: 143–149. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.06.009

Ansari, M.A., Mohokar, H.V., Deodhar, A., Jacob, N., Sinha, U.K. 2018. Distribution of environmental tritium in rivers, groundwater, mine water and precipitation in Goa, India. J. Environ. Radioact. 189: 120–126. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.04.004

Atwood, D.A. 2013. Radionuclides in the environment. John Wiley & Sons.

Chae, J.S., Kim, G. 2019. Seasonal and spatial variations of tritium in precipitation in Northeast Asia (Korea) over the last 20 years. J. Hydrol. 574: 794–800. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.058

Nakasone, S., Ishimine, A., Ishizu, Y., Shiroma, Y., Tanaka, M., Akata, N., Furukawa, M. 2019. Recent tritium concentration of monthly precipitation in Japan. Radiat. Prot. Dosimetry. 184(3–4): 334–337. doi.org/10.1093/rpd/ncz087

Okada, S., Momoshima, N. 1993. Overview of tritium: Characteristics, sources, and problems. Health Phys. 65(6): 595–609.

Rittirong, A., Noithong, P., Hazama, R., Sakuma, Y., Saenboonruang, K., Sudprasert, W. 2019. Determination of tritium levels in tap waters collected from various regions in Thailand using liquid scintillation counting. J. Phys. Conf. Ser. 285(1). doi.org/10.1088/1742-6596/1285/1/012021

Rodphothong, D., Thiabgoh, O., Nutaro, T. (2022). Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew under the Impact of Geomagnetic Vertical Cutoff Rigidity: Case Study of International Flights from Suvarnabhumi Airport, Thailand. Chiang Mai J. Sci. 49(2). doi.org/10.12982/cmjs.2022.032

Ruffolo, D. 2020. Time variations in galactic cosmic rays as measured from Southeast Asia. J. Phys. Conf. Ser. 1572(1). doi.org/10.1088/1742-6596/1572/1/012087

Rozanski, K., Groning, R. 2004. Tritium assay in water samples using electrolytic enrichment and liquid scintillation spectrometry. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:35085594, 12 December 2022.

Tadros, C.V., Hughes, C.E., Crawford, J., Hollins, S.E., Chisari, R. 2014. Tritium in Australian precipitation: A 50 year record. J. Hydrol. 513: 262–273. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.031

World Health Organization. 2011. Guidelines for drinking-water quality. Sun Fung. China.

Yongprawat, M., Kamdee, K., Noipow, N. 2012. Tritium content in rainfall for monitoring effect from Fukushima accident at Ongkharak rainfall station in Thailand. In: TIChE International Conference 2012, October 25 - 26, 2012, Nakornratchasima, Thailand.

Inhibitory effects of the extract from *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb) on cell viability and proliferation of Squamous Cell Carcinoma (A431 cell line)

Rungpailin Khonsap, Nattanan T-Thienprasert, Pichamon Kiatwuthinon, Napachanok Swainson, Attawan Aramrak*

Department of Biochemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fsciawa@ku.ac.th

Abstract

Orchids have been used as a folk medicine since they display important biological activities such as anti-oxidant, anti-inflammatory and anti-cancer. This study aims to investigate the viability rate of human Squamous Cell Carcinoma (cell line A431) when treated with the extracts from orchid hybrid *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb). The plants were extracted by using 4 solvents (water, methanol, ethanol, and 2-propanol). The rate of cell viability and IC50 were determined by MTT assay. Cell proliferation and morphology was tested by Hoechst 33342 staining. It was found that 2-propanolic extract (DT-P) significantly affected on the cells at 48 and 96h after incubation compared with other extracts. The cell viability was decreased in a dose-dependent manner when treated A431 cells with DT-P, and the IC50 was determined to be 14.66 µg/mL, indicating it is an active inhibitor. Based on Hoechst 33342 staining assay, it showed that DT-P can inhibit cell proliferation of A431 and can induce cell apoptosis due to the slightly morphological changes of the cells were observed. This study demonstrated that the extract from DtDb could be used in medical and cosmeceutical industries in the future for the treatment of squamous cell carcinoma.

Keywords: Anticancer, *Dendrobium*, Orchid, Natural products, Skin cancer

Introduction

Orchids belong to the family of *Orchidaceae* which is one of the largest families in the flowering plants (Chen, 2020). *Dendrobium* is the second largest genus and grows as epiphytes in tropical and subtropical Asia and Eastern Australia (Schuiteman, 2011). Recently, there are various orchid species that have been crossed to generate new hybrids and can be used for a variety of purposes including for being a source of natural antioxidants and for pharmaceutical application (Minh et al., 2016).

Dendrobium spp. have been used as traditional Chinese medicine for thousands of years since it contains many bioactive compounds such as polysaccharides, bibenzyl derivatives, phenanthrenes, resveratrol, stilbenoids and polyphenols (Zhang et al., 2019; Joshi et al., 2020). These compounds have been reported to exert biological properties such as anti-cancer, anti-inflammatory, and anti-oxidant (Chan et al., 2018). Several research studied the effect of *Dendrobium* extract on cancer cells including lung cancer, leukemia, and cervical cancer (Zhao et al., 2014; Prasad and Koch, 2014). It has been reported that some flavonoids found in orchid exhibit inhibitory effects on tumor formation and have a strong role in promoting cell apoptosis, inhibiting metastasis and proliferation, and regulating cell cycle and tumor angiogenesis (Tang et al., 2020).

Squamous cell carcinoma (SCC) is a type of skin cancer characterized by abnormal proliferation of invasive squamous cells but could cause metastasis. In addition, SCC shows a potential for recurrence depending on the tumor size, degree of histological differentiation, depth of the lesion, perineural invasion, patient's immune system, and anatomic localization (Apalla et al., 2017). SCC is the second most common type of cancers and associated with significant morbidity including ulceration and disfigurement. The mortality rate of people by SCC is similar to melanoma, an aggressive type of cancer (Rosenberg et al., 2019). Treatments for SCC include surgery and radiation for localized disease and chemotherapy for metastatic cancer. However, because of the side effects from the medical treatments adversely occur to patients, natural products have gained attention to use as modulators for patients in response or resistance to drugs (Rosenberg et al., 2019). However, the studies of orchid extract on the skin cancer are limited. Therefore, this research is focusing on studying the effect of the orchid extract from a hybrid orchid *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb) on human skin cancer SCC type in order to look for its potential use in skin care and skin treatment.

Materials and Methods

Preparation of orchid extracts

The whole plants of tissue-cultured orchid, *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb), were collected and ground freezing with liquid nitrogen. The ground sample was extracted with four solvents (deionized water, methanol, ethanol, and 2-propanol) with a ratio of 1:5 (w/v). Samples were macerated at room temperature for 24 h. The extraction was repeated three times. The filtrate was then collected through a filter paper (Whatman No.1). The filtrate was pooled and concentrated by a rotary evaporator and lyophilized. The

extracts were redissolved in 95% ethanol to have a final concentration of 3 mg/mL before use in further experiments.

Cell culture

An epidermoid cell line A431 (SCC type, ATCC® CRL-1555) was used in the experiment. Cells were cultured in a 25-cm^2 flask in Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) and grown at 37 °C under 5% CO_2. Culture media was supplemented with 10% fetal bovine serum (FBS; Gibco, Thermo Fisher Scientifc, Inc., Waltham, MA, USA) and 1% penicillin/streptomycin (Gibco, Thermo Fisher Scientifc, Inc., Waltham, MA, USA). When cells reached 80% confluence, they were subcultured by trypsinization with 0.25% trypsin (Gibco, Thermo Fisher Scientifc, Inc., Waltham, MA, USA).

Cell viability analysis by MTT assay

A431 cells were seeded in 96-well plates at a density of 5,000 cells/well and grown for 24 h. The extracts (in 9.5% ethanol) from 4 solvents were added in each well to have a final concentration of 100 μg/mL and incubated for 48 and 96 h to preliminary screening for the potential extract and appropriate time of exposure. The 2-propanolic extract was only selected to use in the further experiments. Cell viability of A431 was determined by exposed cells with 2-propanolic extract (DT-P) at a final concentration of 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 and 100 μg/mL for 96 h. Dimethyl sulfoxide (DMSO) at 5% was used as an inhibitor control. Wells containing 3.17% ethanol at a final concentration were served as controls (no inhibitor). Each treatment contained three replications, and the experiment was performed twice independently. Cell viability was measured by using a MTT assay. After exposed cells with the extracts, 40 μL of MTT solution was added in each well and incubated for 3 h. Then, 50 μL of 100% DMSO was added and measured the plates at 570 nm using a microplate reader (Tecan, Thermo Fisher Scientifc, Inc., Waltham, MA, USA). The half maximal inhibitory concentration (IC50) was determined from a dose response curve.

Morphology analysis by Hoechst 33342 staining

A431 cells were seeded at a density of 3×10^5 cells/well in tissue culture dish chamber 35×10 mm (SPL, Gyeonggi-do, Korea) for 24 h. Cells were then treated with DT-P extract with a final concentration at approximate IC50 value (15 μg/mL). Dishes containing only media and 5% DMSO were used as controls and inhibitor controls, respectively. Cells were observed for the morphological changes at 0 and 96 h after incubation. Cells were then stained with 10 μg/mL Hoechst 33342 (Sigma, Merck, Darmstadt, Germany) in phosphate buffer saline (PBS; pH 7.4) at room temperature for 15 min in the dark (Wu et al., 2017). The cellular morphology was examined by using a fluorescent microscope with 10X magnification (Olympus, Shinjuku, Tokyo, Japan).

Data and statistical analysis

A dose response curve and IC50 value were obtained and calculated by using GraphPad prism (Graph Pad Software, Inc.). Data were presented as mean ± standard deviation (SD). One-way ANOVA followed with Tukey's test was performed by R program (R Core Team, Vienna, Austria.)

Results and Discussion

Orchid extracts from difference solvents exhibit anti-cancer activity on A431

Several studies suggested that extracts from *Dendrobium* spp. can inhibit cancer cells (Prasad and Koch, 2014; Zhao, 2014). Therefore, we hypothesized that DtDb might contain anti-cancer activity on skin cancer as well. It was suggested that the phytochemical components, which exert the pharmacological characteristics, in the crude extract could be varied depending on the solvent used (Zhang et al., 2019). Thus, we preliminarily investigated the cell viability of skin cancer A431 exposed with 100 μg/mL of DtDb extracts from different solvents such as 2-propanol (DT-P), ethanol (DT-E), methanol (DT-M), and deionized water (DT-W) for 48 and 96 h (Fig. 1). The result suggested that A431 cell line significantly responded ($p < 0.001$ at 48 h and $p < 0.05$ at 96 h) to DtDb extracts, especially when it exposed for 96 h compared with control group, except the DT-M. DT-E and DT-P significantly inhibited cell viability on both incubation time points. Interestingly, DT-P exhibit the strongest inhibition effect on A431 at 48 h compared to other extracts. It indicates that DT-P might contain some bioactive compounds that specifically effect on A431 better than chemicals comprised in other samples. Therefore, DT-P was only selected and 96-h incubation was used to determine the half maximal inhibitory concentration.

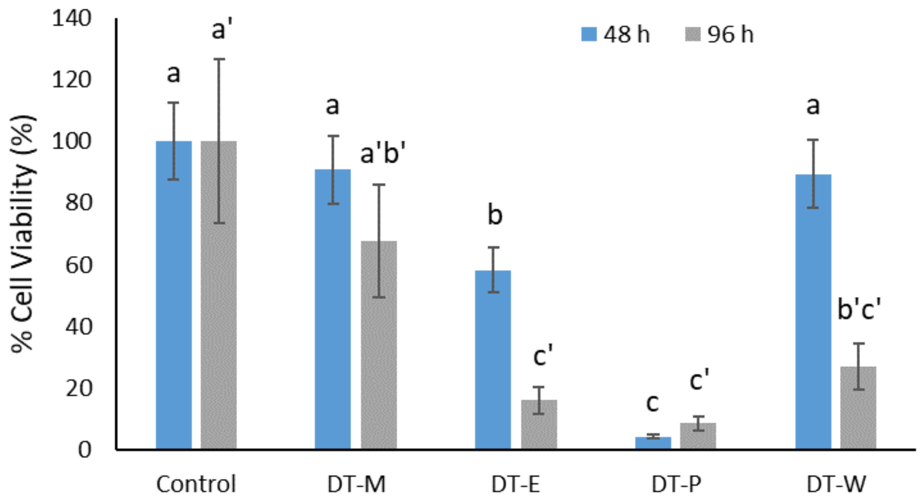


Fig. 1 Cell viability of A431 incubated with the extracts with different solvents. Blue and grey bars represent the exposure time of cells with the extracts at 48 h and 96 h, respectively. Different letters on bars mean significantly different between samples at the particular time (i.e. a-c represent for stat analysis of 48 h and a'-c' represent for that of 96 h) according to Tukey's comparison ($p < 0.001$ at 48 h and $p < 0.05$ at 96 h).

Determination of half maximal inhibitory concentration of DT-P extract

To estimate the half maximal inhibitory concentration (IC50), A431 skin cancer cells were treated with DT-P extract and performed a MTT assay. A431 cells were exposed with DT-P at various concentrations (0–100 μg/mL) and incubated for 96 h The results demonstrated that the cell viability of A431 gradually decreased when increased concentration of the DT-P extract in a dose-dependent manner. However, the rate of cell viability constantly reduced to about 40% once it exposed to DT-P at a concentration of 30 μg/mL to 100 μg/mL. However, based on TukeyHSD analysis, it revealed that there was no significant differences of cell viability in response to the DT-P extract at concentrations between 20 and 100 μg/mL. The IC50 of A431 cell line to DT-P was obtained from a dose response curve to be at 14.66 μg/mL (Fig. 2). Recent studies mentioned that orchids including *Dendrobium* species contain some bioactive compounds that can prevent cell cycle, inhibit cell proliferation, and promote cell apoptosis in many cancers such as lung, colorectal, pancreatic, breast and prostate cancers (Tungmunnithum et al., 2018; Tang et al., 2020). Our result suggests that *Dendrobium*, in this case DtDb, can inhibit A431 skin cancer cell at a low concentration. Interestingly, there is a report on a classification of cytotoxic effect against cancer cells. The extract can be classified into 3 levels as “very active”, “active”, and “moderately active” if the IC50 value is less than 10 μg/mL, between 10 and 100 μg/mL, and between 100 and 500 μg/mL, respectively (Susanto et al., 2022). Based on our IC50 result, the DT-P extract can be classified as an active inhibitor to human skin cancer A431.

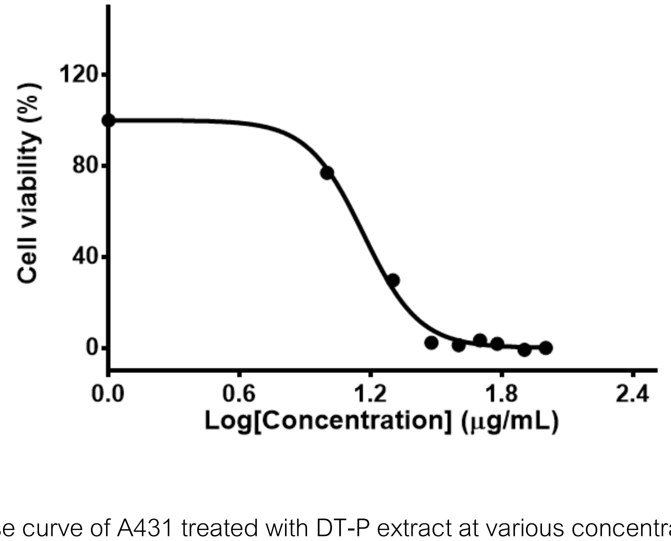
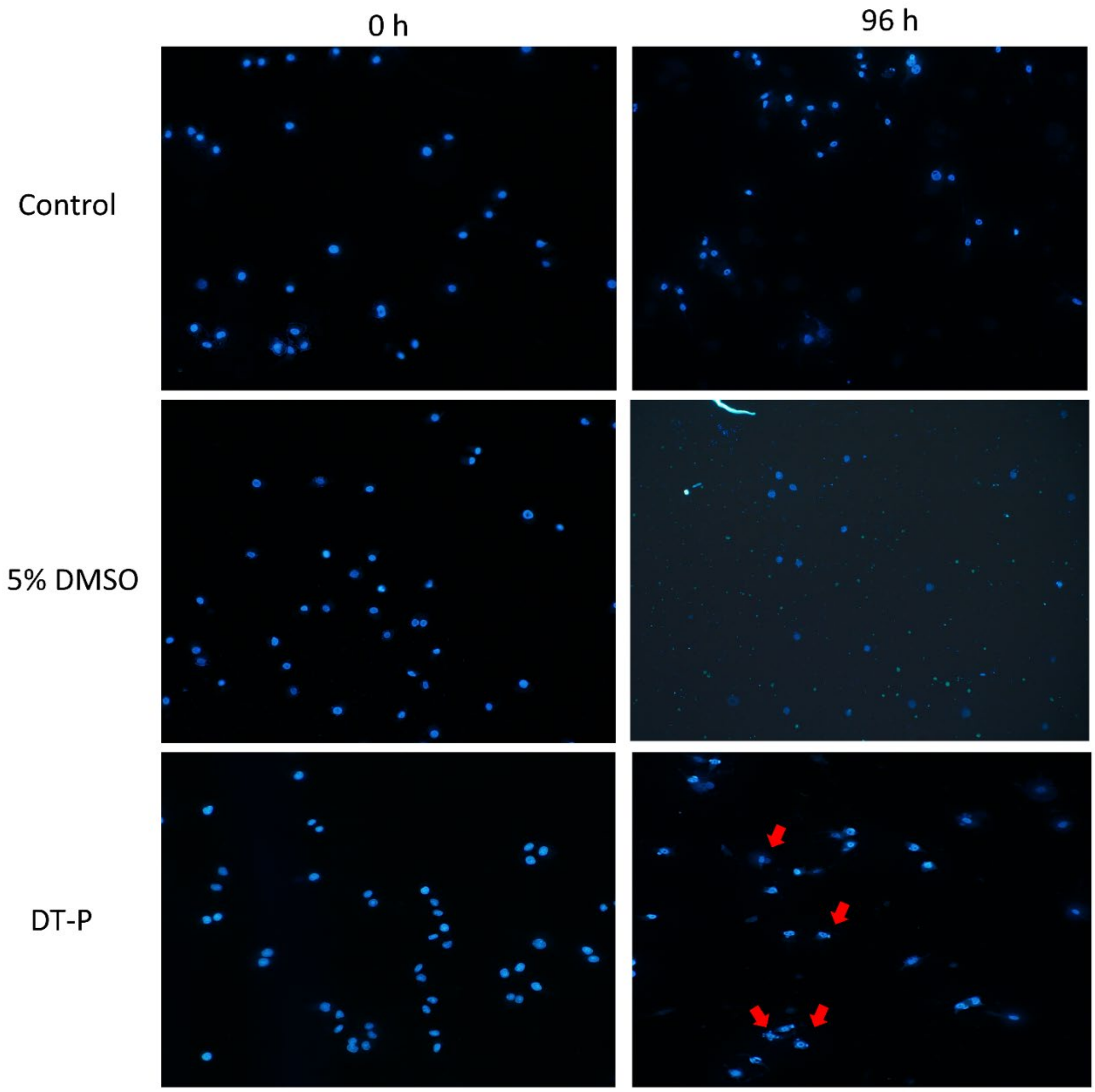


Fig. 2 A dose response curve of A431 treated with DT-P extract at various concentrations (μg/mL) for 96 h The concentrations were plotted in a Log scale generated by GraphPad prism to calculate for the IC50 value

Morphology analysis by Hoechst 33342 staining

To confirm that the DT-P extract can affect cell proliferation of skin cancer cells, Hoechst staining was performed to observe the reduction of cell number and to investigate the morphological changes due to cell apoptosis (Tu et al., 2020). After cells exposed with DT-P at approximate IC50 value (15 μg/mL) for 96 h, the

number of skin cancer cells decreased when compared with the 0-h treatment group (Fig. 3). Also, morphology of cells was slightly changed by having more condensed or fragmented nuclei than the untreated group. It indicated that DT-P extract can reduce cell proliferation and could induce cell apoptosis on skin cancer. However, the inhibitor control (5% DMSO) strongly reduced the rate of proliferation and induced cell apoptosis of A431. It has been reported that *D. draconis*, *D. falconeri*, *D. findlayanum*, *D. loddigesii* etc. have bioactive compounds that are able to inhibit various types of cancer cells through apoptosis pathway (Ghai et al., 2021). The study of apoptosis pathway or mechanism for skin cancer A431 should be further investigated in the future work.



.

Fig. 3 Cell proliferation and morphology of A431 skin cancer cell line analysed by Hoechst 33342 staining after exposed with DT-P (15 μg/mL) for 0 and 96 h. Condensed or fragmented nuclei of apoptotic cells (red arrows) were observed

In conclusion, our study suggested that DtDb extract contains bioactive compounds that also effect on cell viability and proliferation of A431 skin cancer cell line. The extraction with 2-propanol was the most efficient solvent to use, and the extract DT-P efficiently inhibited cell viability since 48 h of exposure. The extract can reduce cell proliferation and damage the cells at IC50 of 14.66 μg/mL. Thus, the extract from the orchid hybrid DtDb could be applied in medical and cosmeceuticals field for the future use.

Acknowledgments

Authors are grateful to thank the Department of Biochemistry, Faculty of Science, Kasetsart University and CordyBiotech Co., Ltd. for providing funds and research facilities.

References

Apalla, Z., Nashan, D., Weller, R.B., Castellsagué, X. 2017. Skin cancer: Epidemiology, disease burden, pathophysiology, diagnosis, and therapeutic approaches. Dermatology and therapy 7: 5–19. doi.org/ 10.1007/s13555-016-0165-y

Chan, C.F., Wu, C.T., Huang, W.Y., Lin, W.S., Wu, H.W., Huang, T.K., Chang, M.Y. Lin, Y.S. 2018. Antioxidation and melanogenesis inhibition of various *dendrobium* tosaense extracts. Molecules 23: 1810. doi.org/ 10.3390/molecules23071810

Chen, J.T. 2020. Orchid biochemistry. International journal of molecular sciences. 21: 2338.

Ghai, D., Verma, J., Kaur, A., Thakur, K., Pawar, S. Sembi, J. 2021. Bioprospection of orchids and appraisal of their therapeutic indications, pp. 401–424.

Joshi, P.R., Paudel, M.R., Chand, M.B., Pradhan, S., Pant, K.K., Joshi, G.P., Bohara, M., Wagner, S.H., Pant, B. Pant, B. 2020. Cytotoxic effect of selected wild orchids on two different human cancer cell lines. Heliyon. 6. doi.org/ 10.1016/j.heliyon.2020.e03991

Kasinkasampong, Y.2015. Quality management in *dendrobium* orchid for export.

Luo, A., Ge, Z., Fan, Y,. Luo, A., Chun, Z., He, X. 2011. In vitro and in vivo antioxidant activity of a water-soluble polysaccharide from *dendrobium* denneanum. Molecules 16: 1579–1592.

Prasad, R. Koch, B. 2014. Antitumor activity of ethanolic extract of *dendrobium formosum* in t-cell lymphoma: An in vitro and in vivo study. Biomedicine Research International 2014: 753451. doi.org/ 10.1155/2014/753451

Rosenberg, A.R., Tabacchi, M., Ngo, K.H., Wallendorf, M., Rosman, I.S., Cornelius, L.A., Demehri, S. 2019. Skin cancer precursor immunotherapy for squamous cell carcinoma prevention. JCI Insight. 4.

R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. http://www.R-project.org/, 31 December 2022.

Schuiteman, A. 2011. *Dendrobium* (*orchidaceae*): To split or not to split? Gardens' Bulletin Singapore 63: 245–257.

Susanto, Y., Nurfajar, R., Sindia, S., Khaerati, K., Saraswaty, V.J. 2022. Immunomodulatory activity of pepolo (*bischofia javanica blume*) stem bark ethanolic extract in staphylococcus aureus-stimulated macrophages and anticancer activity against mcf-7 cancer cells. Journal of Applied Pharmaceutical Science 12 (10): 109–116.

Sut, S., Maggi, F., Dall'Acqua, S. 2017. Bioactive secondary metabolites from orchids (*orchidaceae*). Chemistry and Biodiversity. 14.

Tang, S.M., Deng, X.T., Zhou, J., Li, Q.P., Ge, X.X., Miao, L. 2020. Pharmacological basis and new insights of quercetin action in respect to its anti-cancer effects. Biomedicine & Pharmacotherapy. 121: 109604. doi.org/10.1016/j.biopha.2019.109604

Tu, Y., Chen, L., Ren, N., Li, B., Wu, Y., Rankin, G.O., Rojanasakul, Y., Y.Wang, Y. Chen, Y.C. 2020. Standardized saponin extract from baiye no.1 tea (*camellia sinensis*) flowers induced s phase cell cycle arrest and apoptosis via akt-mdm2-p53 signaling pathway in ovarian cancer cells. Molecules 25. doi.org/10.3390/molecules25153515

Tungmunnithum, D., Thongboonyou, A., Pholboon, A., Yangsabai, A. 2018. Flavonoids and Other Phenolic Compounds from medicinal plants for pharmaceutical and medical aspects. Medicines. 5: 93.

Wu, Y., Zhang, P., Yang, H., Ge, Y., Xin, Y. 2017. Effects of demethoxycurcumin on the viability and apoptosis of skin cancer cells. Molecular Medicine Reports. 16: 539–546.

Zhang, L., Jiao, C., Cao, Y., Cheng, X., Wang, J., Jin, Q., Cai, Y. 2019. Comparative analysis and expression patterns of the plp dec genes in *dendrobium officinale*. International journal of molecular sciences. 21. doi.org/ 10.3390/ijms21010054

Zhao, X., Sun, P.,Qian, Y., Suo, H. 2014. D. Candidium has in vitro anticancer effect in hct-116 cancer cells and exerts in vivo anti-metastratic effects in mice. Nutrition research and practice. 8: 487–493.

Identification of bioactive compounds in the extract of *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb) by thin-layer chromatography and high resolution mass spectrometry.

Pilairath Meksangsee[a], Wannarat Phonphoem[a], Pakorn Wattana-Amorn[b], Attawan Aramrak[a,*]

[a]Department of Biochemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fsciawa@ku.ac.th

Abstract

Orchids have a high content of biologically active substances, which have the necessary properties for treating diseases and skin care. In addition, the main bioactive compounds are several secondary metabolites, such as phenols, flavonoids, alkaloids, and polysaccharides in orchids. In this study, we were interested in the analysis of phytochemical composition in the extract from *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb) by using thin-layer chromatography (TLC) and ultra-high-performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight (UHPLC-QTOF) mass spectrometry technique following 3 different methods in both the positive and negative modes. Based on TLC results, phenolics and flavonoids were detected. Using QTOF, we identified a total of 6 compounds, of which 4 substances were obtained from the positive mode and 2 substances from the negative mode. They were adenosine, proline, quercetagetin, shikimic acid, trigonelline, and nicotinamide. Their pharmacological properties were reported, such as anti-inflammatory, anti-oxidant, anti-microbial, and anti-cancer. Our results show that DtDb extract contains bioactive compounds that could be used in medical and pharmaceutical applications.

Keywords: HPLC-QTOF, Orchid, Phytochemical, Secondary metabolite, Thin-layer chromatography

Introduction

Orchids are economically important plants in Thailand, and their exportation worldwide is increasing yearly for both horticulture and material for industry purposes (Economics, 2022). Orchids have received a great interest in pharmaceutical and cosmeceutical studies. It has been reported that orchids contain high amounts of bioactive compounds essential for healing and nourishing properties for human use. Dendrobium species comprise of several bioactive secondary metabolites such as polyphenols, flavonoids, alkaloids, anthocyanins, and polysaccharides (Kanlayavattanakul et al., 2018). These compounds have been documented for many important biological activities. For instance, phenolics and flavonoids exhibit antioxidant capacity, antimicrobial effect, and reduced enzyme activity involved in aging and dark spots (Tungmunnithum et al., 2018). *D. moniliforme* contains bibenzyl derivatives, polyphenols, and flavonoids that have antioxidant and cytotoxic effects on cancer cells (Paudel et al., 2018). *D. denneanum* and *D. nobile* have also been found to contain bioactive polysaccharides in various plant parts and exhibit antioxidant properties (Luo et al., 2009; Luo et al., 2011). This information infers the potential pharmacological significance of *Dendrobium* genus. Detection and identification of unknown substances in the matrix sample pose analytical challenges. Thin-layer chromatography (TLC) and high-resolution mass spectrometry (HR-MS) are useful tools for target and non-target screening and for analyzing substances in complex sample matrices. HR-MS is increasingly used in pharmacological and toxicology studies. The increased resolution of HR-MS instrumentation makes it possible to distinguish isotopic distributions and generate fragmentation patterns, therefore, improving the accuracy of chemical formula prediction and library matching for compound identification (Li et al., 2013; Qiu et al., 2015; Wallace and McCord, 2020).

This research aimed to identify the secondary metabolites and chemical composition in the extract from a hybrid *Dendrobium* called *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb). We performed compound identification by using TLC and QTOF approaches. For QTOF, we followed three different chromatographic conditions and separation that were used to detect bioactive compounds such as dendrobine, gigantol and quercetin, commonly found in several Dendrobium. In this study, we detected phenolics, flavonoids, and other active ingredients in the DtDb extract.

Materials and Methods

Chemicals and Reagents

Acetic acid, acetonitrile, ethanol, ethyl acetate, and methanol were purchased from VWR International GmbH (Dietikon, Switzerland). Formic acids were purchased from Fisher Scientific International, Inc. (Singapore). Aminoethyl diphenylborate (NA) and quercetin were purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). Gigantol and dendrobine were purchased from Chengdu Biopurify Phytochemicals Ltd. (Chengdu, Sichuan, China). All chemicals and reagents were HPLC, or analytical grades were used depending on the experiments.

Sample Preparation and Extraction

Tissue-cultured plants (about 6 months old) grown in ½ MS Basal medium (Murashige and Skoog Basal medium) were harvested and extracted with 2-propanol with a ratio of 1:5 (g fresh weight/ml) by maceration under a closed system for 24 h. The extraction was repeated 3 times, and liquid samples were pooled. The samples were then filtered and evaporated using a rotary evaporator. Finally, the concentrated samples were lyophilized. The extraction was performed in two replications.

Thin-Layer Chromatography (TLC) Analysis

Each crude extract was prepared with 10 mg/ml concentration in 95% ethanol. The extracts were subjected to TLC analysis for the presence of phenolics, flavonoids, and polysaccharides. Quercetin was used as a reference for the flavonoid. About 5 droplets of samples were applied on 10 × 5 cm^2 silica gel plate (Merck, Darmstadt, Germany) and separated in a mobile phase consisting of ethyl acetate-acetic acid-water (8:1:1 v/v/v). The gel plate was then sprayed with 0.1% NA (aminoethyl diphenylborate) solution to visualize phenolics and flavonoids by using Spectroline™ Ultraviolet Viewing cabinets under a UV light at 366 nm (Maliński et al., 2021).

UHPLC-QTOF Analysis

The sample at a concentration of 1 mg/ml in 95% ethanol was filtered through a 0.2-μm nylon filter. The composition was separated using a high-resolution ultra-high-performance liquid chromatography-electrospray ionization quadrupole time of flight mass spectrometry (UHPLC-ESI-QTOF). All samples were sent to analyze at Scientific Equipment Center (Kasetsart University, Thailand). Dendrobine, gigantol, and quercetin were used as reference compounds, and the separation and detection methods for these compounds were followed according to Sarsaiya et al., 2020 (Method I), Chan et al., 2018 (Method II), and Kızıltaş et al. (2021) (Method III), respectively. Metabolite of crude extracts analyses were performed on a SCIEX X500R QTOF system with Turbo V™ source using the electrospray ionization (ESI) probe operated in both positive and negative ion modes. An ExionLC™ AD system equipped with a C-18 Kinetex® column (100 mm x 4.6 mm, 2.6 μm) was used for separation. An Information Dependent Acquisition (IDA) was also performed on a X500R QTOF system. The chromatographic separation and parameters were set up following Table 1 and Table 2, respectively. The compound standards were prepared at a concentration of 20 μg/ml in methanol. Mass spectra of compounds were matched with NIST Research Library. The exact mass of the compounds of interest was calculated by Exact Mass Calculator (Scientific Instrument Services, 2022).

Table 1 The mobile phase and solvent gradient used for each method.

Method	Mobile phase		Run time (min)					Wavelength
Method I			0–2	2–3	3–4	4–6	6–10	205 nm
Sarsaiya et al., 2020	A	0.1% Formic acid in DI water	90	82	62	0	95	
	B	Acetonitrile	10	18	38	100	5	
Method II			0–2	2–3	3–4	4–6	6–10	220 nm
Chan et al., 2018	A	0.1% Formic acid in DI water	90	82	62	0	95	
	B	0.1% Formic acid in Acetonitrile	10	18	38	100	5	
Method III			0–1	1–6	6–10			360 nm
Kızıltaş et al., 2021	A	1% Formic acid in DI water	50	0	50			
	B	1% Formic acid in Methanol	50	100	50			

Table 2 Parameters for UHPLC-ESI-QTOF of each method

	Method I	Method II	Method III
Injection volume	10µl	10µl	10µl
Ion transfer tube temperature	350 ºC	350 ºC	600 ºC
Spray voltage	3.5kV	3.5kV	4.5kV
Turbo electrospray ionization (ESI) source	Positive $[M+H]^+$	Negative $[M-H]^-$	Negative $[M-H]^-$

Results and Discussion

Detection of Phenolics, Flavonoids, Terpenes, and Polysaccharides by using TLC

Our previous research found that the propanolic extract had the most promising biological properties, such as anti-oxidant, anti-aging, and anti-cancer. Therefore, it was used to investigate the bioactive compounds in this study. Two replications of the DtDb extract were analyzed by TLC for initial screening and compared the pattern of bands and colors with quercetin (a flavonoid). After derivatization of the gel plate with NA reagent and inspection under the UV light, two distinct yellow/orange bands indicating the presence of flavonoids and one turquoise band indicating the presence of phenolics were clearly observed from both samples (Fig. 1) (Maliński et al., 2021). Quercetin was positively visible in yellow; however, it was located at a different position, as observed in the sample. It might be due to another class of flavonoids in the extract. From the preliminary test, it was found that DtDb extract contains phenolics and flavonoids, which are mostly bioactive and can be found in orchids and other plant species (Luo et al.,2009; Luo et al., 2011; Paudel et al., 2018).

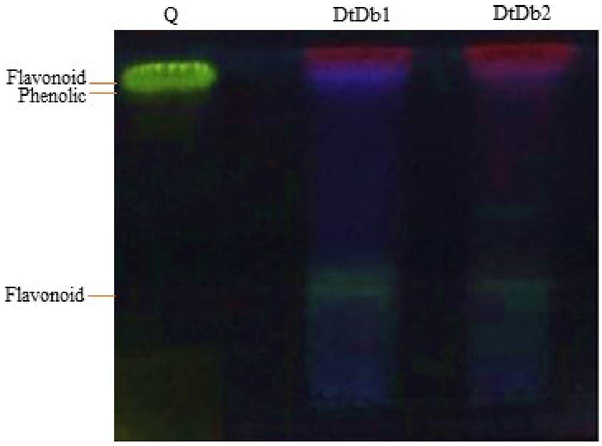


Fig. 1 TLC chromatogram of the extract from *Dendrobium* Topaz Dream x *Dendrobium bigibbum* (DtDb) at a concentration 10 mg/ml in 95% ethanol. Q - Quercetin, DtDb1 and DtDb2 represent the biological replication. The gel plate was observed under a UV light at 366 nm after derivatization with 0.1% NA (aminoethyl diphenylborate) solution

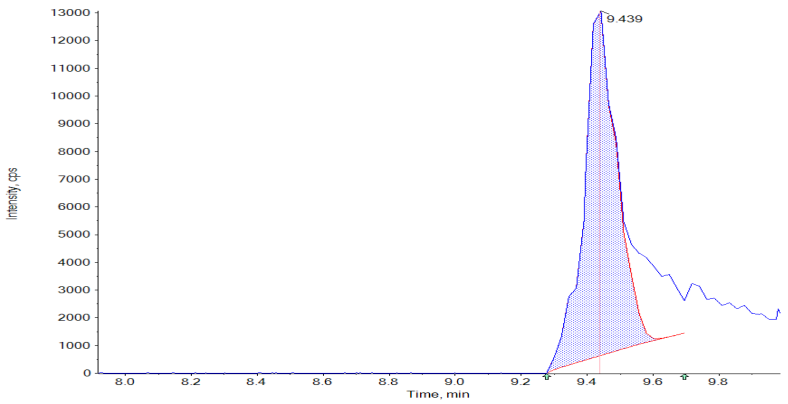
Identification of Tentative Compounds in DtDb Extract by using HR-MS

Chromatograms and sample fragment ions were obtained using UHPLC-ESI-QTOF with the ESI source operating in the positive and negative modes following the three methods described in Tables 1 and 2. The MS2 spectra were then matched with the NIST Research Library. There were about 255 compounds that were matched and obtained from the NIST. However, MS spectra were manually re-evaluated to avoid false-positive identifications. Also, we are interested in compounds with biological activities. Note that dendrobine, gigantol, and quercetin compounds are of our interest since they have been reported to accumulate in *Dendrobium* species and display several biological activities (Chen et al, 2012; Maliński et al., 2021). They have been used as reference compounds, but these compounds' chromatograms and MS spectra were ambiguous. Therefore, the parameters and conditions for a good qualification of mass spectra for each compound must be appropriately adjusted. From our efforts, we were able to identify 6 tentative compounds of interest in the samples. The analysis results, including retention time (t_R), observed ion mass (m/z), and biological activities, are summarized in Table 3. Although some predicted compounds have mass error more than 5 ppm but their mass fragmentation patterns are highly similar to that reported in the database. The chromatogram, precursor ions (MS1), and fragment ions (MS2) of quercetagetin, one of the tentative compounds, are shown in Fig. 2. The tentative compounds were amino acid/nucleotide, phenolic, shikimic acid, and alkaloid, which they exhibit pharmacological effects such as anti-oxidant, anti-aging, anti-cancer, anti-acne, anti-inflammatory, anti-viral, and whitening (Table 3). The structure of each compound is shown in Fig. 3.

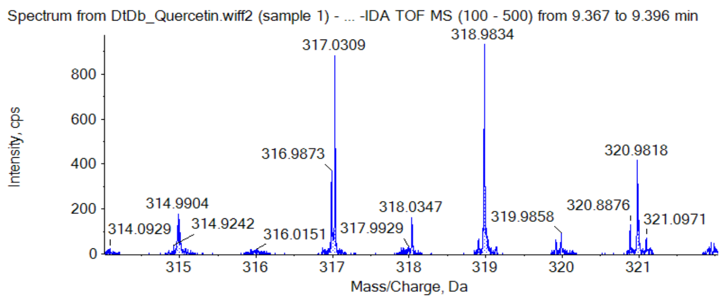
Table 3 Tentative compounds and secondary metabolites in the DtDb extract identified through UHPLC-ESI-QTOF and NIST Research Library

	Method I		Method II		Method III		Biological activity	Reference
	t_R	Observed *m/z* $[M+H]^+$ (calculated *m/z*, mass error)	t_R	Observed *m/z* $[M-H]^-$ (calculated *m/z*, mass error)	t_R	Observed *m/z* $[M-H]^-$ (calculated *m/z*, mass error)		
Amino acid/Nucleotide								
Adenosine ($C_{10}H_{13}N_5O_4$)	3.12	268.1032 (268.1051, -7.0867ppm)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Anti-inflammatory	Trevethick et al., 2008
Proline ($C_5H_9NO_2$)	2.94	116.0711 (116.0717, -5.1692 ppm)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Antioxidant Antimicrobial	Ozden et al., 2009
Flavonoid								
Quercetagetin ($C_{15}H_{10}O_8$)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	9.43	317.0308 (317.003, 1.5771 ppm)	Antioxidant, Antiviral	Wang et al., 2016
Shikimic acid ($C_7H_{10}O_5$)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2.48	173.0451 (173.0455, -2.3115 ppm)	Depigmentation Anti-acne	Chen et al., 2016
Alkaloid								
Trigonelline ($C_7H_7NO_2$)	2.85	138.0547 (138.0560, -9.4165 ppm)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Anti-cancer Antibacterial	Arauz et al., 2017
Nicotinamide ($C_6H_6N_2O$)	3.15	123.0548 (123.0564, -4.8758 ppm)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Anti-cancer Anti-acne	Snaidr et al., 2019

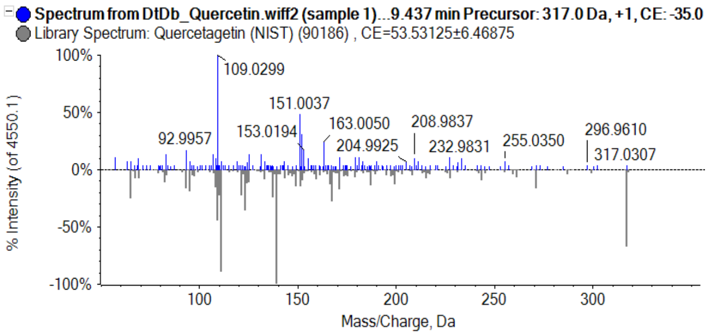
t_R = retention time; m/z = mass per charge; n.a. = not available.



(A)



(B)



(C)

Fig. 2 Chromatogram and mass spectra pattern of quercetagetin, a tentative compound identified in the DtDb extract: (A) Extracted ion chromatogram; (B) Precursor ion (MS1); and (C) Fragment ions (MS2). UHPLC-ESI-QTOF-MS of quercetagetin calculated for $C_{15}H_9O_8$ $[M-H]^-$ 317.0303, found m/z observed was 317.0308

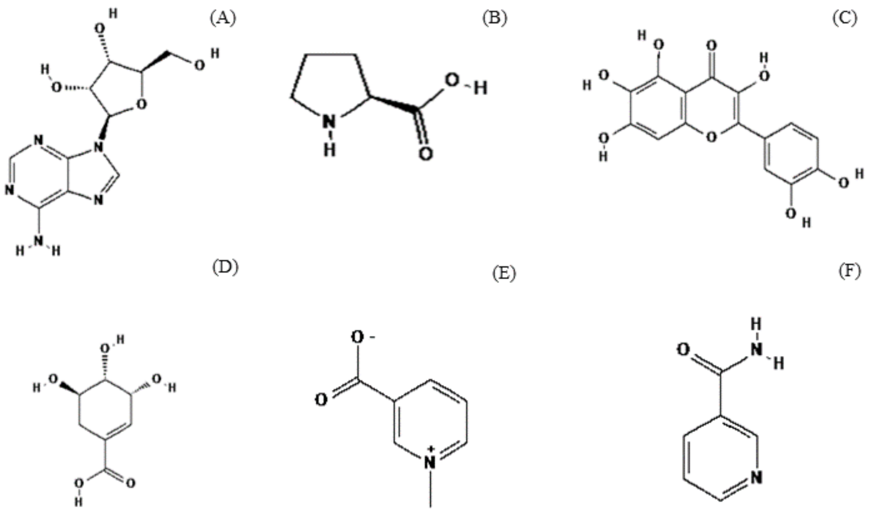


Fig. 3 Structure of tentative compound identified. Compounds were grouped into 1. Amino group: (A) Adenosin; (B) Proline, 2. Phenolic acid; (C) Quercetagetin, 3. Flavonoid; (D) Shikimic acid, and 4. Alkaloid; (E) Trigonelline; (F) Nicotinamide

Acknowledgments

The authors acknowledge the Department of Biochemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, and Cordy Biotech Co., Ltd. for providing laboratory facilities and financial support this project.

References

Arauz, J., Ramos-Tovar, E., Muriel, P. 2017. Coffee and the liver. In: Liver Pathophysiology. Academic Press. pp. 675–685.

Chan, C.F., Wu, C.T., Huang, W.Y., Lin, W.S., Wu, H.W., Huang, T.K., Chang, M.Y., Lin, Y.S. 2018. Antioxidation and Melanogenesis Inhibition of Various *Dendrobium tosaense* Extracts. Molecules 23(7): 1810.

Chen, Y.H., Huang, L., Wen, Z.H., Zhang, C., Liang, C.H., Lai, S.T., Wang, G.H. 2016. Skin whitening capability of shikimic acid pathway compound. Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci. 20: 1214–1220.

Chen, Y., Zhu, Z., Guo, Q., Zhang, L., Zhang, X. 2012. Variation in concentrations of major bioactive compounds in *Prunella vulgaris* L. related to plant parts and phenological stages. Biological Research 45(2): 171–175.

Economics, O.o.A. 2022. Agricultural economic data of flowering plant. Bangkok, Thailand. http://mis-app.oae.go.th/product, 14 December 2022.

Kanlayavattanakul, M., Lourith, N., Chaikul, P. 2018. Biological activity and phytochemical profiles of *Dendrobium*: A new source for specialty cosmetic materials. Industrial Crops and Products 120: 61–70.

Kızıltaş, H., Bingol, Z., Gören, A.C., Kose, L.P., Durmaz, L., Topal, F., Gulcin, İ. 2021. LC-HRMS profiling and antidiabetic, anticholinergic, and antioxidant activities of aerial parts of kınkor (*Ferulago stellata*). Molecules 26: 2469.

Li, X., Shen, B., Jiang, Z., Huang, Y., Zhuo, X. 2013. Rapid screening of drugs of abuse in human urine by high-performance liquid chromatography coupled with high resolution and high mass accuracy hybrid linear ion trap-Orbitrap mass spectrometry. J. Chromatogr. 1302: 95–104.

Luo, A., Ge, Z., Fan, Y., Luo, A., Chun, Z., He, X. 2011. In vitro and in vivo antioxidant activity of a water-soluble polysaccharide from *Dendrobium denneanum*. Molecules 16(2): 1579–1592. doi.org/10.3390/molecules16021579

Luo, A., He, X., Zhou, S., Fan, Y., He, T., Chun, Z. 2009. In vitro antioxidant activities of a water-soluble polysaccharide derived from *Dendrobium nobile Lindl.* extracts. Int. J. Biol. Macromol. 45(4): 359–363. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.07.008

Maliński, M.P., Kikowska, M.A., Soluch, A., Kowalczyk, M., Stochmal, A., Thiem, B. 2021. Phytochemical screening, phenolic compounds and antioxidant activity of biomass from *Lychnis flos-cuculi L.* In vitro cultures and intact plants. Plants 10(2): 206.

Ozden, M., Demirel, U., Kahraman, A. 2009. Effects of proline on antioxidant system in leaves of grapevine (*Vitis vinifera L.*) exposed to oxidative stress by H2O2. Scientia Horticulturae 119(2): 163–168.

Patel, B.H., Suhagia, B. N., Patel, M.M., Patel, J.R., 2008. High-performance liquid chromatography and thin-layer chromatography for the simultaneous quantitation of rabeprazole and mosapride in pharmaceutical products. J. Chromatogr. Sci. 46:10–14.

Paudel, M., et al., 2018. Antibacterial activity of selected *Dendrobium* species against clinically isolated multiple drug resistant bacteria. African journal of microbiology research. 12(18): 426–432.

Qiu, S., Yang, W. Z., Shi, X. J., Yao, C. L., Yang, M., Liu, X. Jiang, B.-H., Wu, W.-Y., Guo, D.-A. 2015. A green protocol for efficient discovery of novel natural compounds: characterization of new ginsenosides from

the stems and leaves of Panax ginseng as a case study. Anal. Chim. Acta. 893: 65–76. doi.org/10.1016/j.aca.2015.08.048

Rittié, L. and Fisher G.J., 2015. Natural and sun-induced aging of human skin. Cold Spring Harb Perspect Med. 5(1): a015370.

Sarsaiya, S., Jain, A., Fan, X., Jia, Q., Xu, Q., Shu, F., Zhou, Q., Shi, J., Chen, J. 2020. New insights into detection of a dendrobine compound from a novel endophytic *Trichoderma longibrachiatum* strain and its toxicity against phytopathogenic bacteria. Front Microbiol. 11: 337.

Scientific Instrument Services. 2022. Exact mass calculator, single isotope version. Palmer, Massachusetts, USA. https://www.sisweb.com/referenc/tools/exactmass.htm, 26 December 2022.

Snaidr, V.A., Damian, D.L., Halliday, G.M. 2019. Nicotinamide for photoprotection and skin cancer chemoprevention: A review of efficacy and safety. Exp. Dermatol. 28: 15–22. doi.org/10.1111/exd.13819

Trevethick, M.A., Mantell, S.J., Stuart, E.F., Barnard, A., Wright, K.N., Yeadon, M. 2008. Treating lung inflammation with agonists of the adenosine A2A receptor: Promises, problems and potential solutions. Br. J. Pharmacol. 155(4): 463–474. doi.org/10.1038/bjp.2008.329

Tungmunnithum, D., Thongboonyou, A., Pholboon, A., Yangsabai, A. 2018. Flavonoids and other phenolic compounds from medicinal plants for pharmaceutical and medical aspects: An overview. Medicines 5(3): 93. doi.org/10.3390/medicines5030093

Wahab, N. 2014. Assessment of antioxidant capacity, anti-collagenase and anti-elastase assays of Malaysian unfermented cocoa bean for cosmetic application. Nat. Prod. Chem. Res. 2: 5. doi.org/10.4172/2329-6836.S1.002

Wallace, M.A.G., McCord, J.P. 2020. High-resolution mass spectrometry. In: Beauchamp, J., Davis, C., Pleil J. (Eds.). Breathborne Biomarkers and the Human Volatilome. Elsevier. 2nd ed., pp. 253–270.

Wang, W., Xu, H., Chen, H., Tai, K., Liu, F., Gao, Y., 2016. In vitro antioxidant, anti-diabetic and antilipemic potentials of quercetagetin extracted from marigold (*Tagetes erecta L.*) inflorescence residues. J. Food Sci. Technol. 53(6): 2614–2624. doi.org/10.1007/s13197-016-2228-6

การใช้แอคติโนมัยซีทในการควบคุมวัชพืชที่ก่อปัญหาสำหรับการเพาะปลูกพืชในวงศ์ผักกาด

The use of Actinomycetes to control problem weeds for the planting of vegetables of the family Brassicaceae

พรสวรรค์ พวยอ้วน, **<u>พัชรนันท์ อมรรัตนพันธ์</u>***
Pornsawan Pauyaun, <u>Patcharanan Amornrattanapan</u>*
ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131
Department of Microbiology, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131, Thaiand
*Corresponding author. E-mail address: patcharanan@go.buu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้สารเคมีในการกำจัดหรือควบคุมวัชพืชเพิ่มมากขึ้น ทำให้ส่งผลเสียต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อม งานวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ Culture filtrates ของแอคติโนมัยซีทในการควบคุมวัชพืชหญ้าตีนนกและหญ้าแพรกแทนการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชในการปลูกผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาวปลี ซึ่งผักทั้งสองชนิดนี้เป็นพืชวงศ์ผักกาดและเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยนำแอคติโนมัยซีทจำนวน 4 ไอโซเลท ได้แก่ D7, D13, D33 และ D36 ไปเลี้ยงในอาหาร SCN นำไปบ่มในเครื่องบ่มแบบเขย่า ความเร็ว 150 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 10 วัน เพื่อเตรียม Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7, D13, D33 และ D36 และนำมาฉีดพ่นใส่ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกและทำการตรวจผลในวันที่ 5 หลังจากฉีดพ่น Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7, D13, D33 และ D36 พบว่า Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 ทำให้ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกมีอาการที่ผิดปกติได้รุนแรงที่สุด จากนั้นนำ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีท ไอโซเลท D7 มาฉีดพ่นในชุดทดลองทั้ง 6 ถุงเพาะชำ พบว่า Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีท ไอโซเลท D7 ทำให้เกิดอาการใบเหี่ยว ใบเหลือง ใบไหม้ ใบม้วน และลำต้นไหม้ของต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกได้ แต่แทบไม่มีผลต่อผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาว จากผลการทดลองที่ได้ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าแอคติโนมัยซีทในการศึกษานี้อาจสร้างสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิออกมาควบคุมต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกที่ก่อปัญหาในการเพาะปลูกพืชผักวงศ์ผักกาดได้ในระยะหลังการงอกของวัชพืช โดยไม่ส่งผลที่ผิดปกติต่อผักกวางตุ้งเขียว และผักกาดขาวปลี

คำสำคัญ: พืชวงศ์ผักกาด, วัชพืช, แอคติโนมัยซีท

Abstract

Nowadays, the use of chemicals to kill or control weeds is increasing thus causing detrimental effects on both human beings and environments. This study aimed to investigate the use of culture filtrates derived from actinomycetes for weed elimination or weed control instead of using chemical herbicides for the cultivation of Choy sum and Chinese cabbage, both of which are vegetables in the Family Brassicaceae and it is also a cash crop of Thailand. Four isolates of actinomycetes; D7, D13, D33 and D36, were cultured in SCN medium and incubated in a shaker incubator with a speed of 150 rpm at 30 °C for 10 days to prepare culture filtrates of each actinomycete isolate. Each culture filtrate was sprayed on Finger grass and Bermuda grass and symptoms of both types of grass were observed on day 5. The results showed that culture filtrate from isolate D7 had the strongest effects on both type of grasses. Further experiments were done in 6 planting bags by spraying culture filtrate from isolate D7 to post-emergence stages of Finger grass and Bermuda grass as well as Choy sum and Chinese cabbage. The result showed that culture filtrate from isolate D7 caused withering leaves, yellow leaves, burned leaves, curling leaves and burned stems of the Finger grass and Bermuda grass but only slightly affected Choy sum and Chinese cabbage. From the experimental results above, it can be concluded that actinomycetes in this study may produce secondary metabolites to control the Finger grass and Bermuda grass that could cause problems in the cultivation of vegetables in the Family Brassicaceae at post-emergence stages.

Keywords: Actinomycetes, Brassicaceae, Weed

คำนำ

พืชวงศ์ผักกาดหลายชนิดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในอุตสาหกรรมเครื่องปรุงรส อาหารสัตว์ และยังรวมไปถึงเชื้อเพลิงไบโอดีเซล (Gidik et al., 2019) ผักกาดขาวปลีและผักกวางตุ้งเขียวเป็นพืชในวงศ์ผักกาดซึ่งผักกวางตุ้งเขียวเป็นผักที่นิยมนำมาบริโภค เนื่องจากเจริญเติบโตเร็วโดยใช้เวลาในการงอกจากเมล็ดไปเป็นต้นอ่อนเพียง 7–10 วัน (ฐานข้อมูลพืชผัก บทความเกษตร, 2551ก) และมีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นประมาณ 35–45 วัน เป็นผักที่มีคุณค่าทางอาหารสูง สามารถปลูกได้ทุกฤดู รากเป็นระบบรากแก้วยาวประมาณ 1.20 เซนติเมตร มีรากแขนงแตกออกจากรากแก้วมาก โดยรากแขนงจะแผ่อยู่ตามบริเวณผิวดิน ลำต้นตั้งตรงมีสีเขียว ใบมีสีเขียว เป็นใบเดี่ยว ใบเรียบไม่ห่อ และจะออกดอกเมื่ออายุประมาณ 50 วัน สามารถขึ้นได้ในดินแทบทุกชนิด แต่จะเจริญได้ดีที่สุดในสภาพดินร่วนปนทรายที่มีความอุดมสมบูรณ์ มีอินทรียวัตถุสูง ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของดินควรอยู่ระหว่างสภาพเป็นกรดเล็กน้อยจนถึงปานกลาง คือ pH อยู่ระหว่าง 6–6.8 อีกทั้งยังชอบดินที่มีความชื้นสูงเพียงพอ (สมชาย และอัญชลี, 2558) ส่วนผักกาดขาวปลีเป็นผักพื้นเมืองในแถบเอเชียตะวันออก เป็นพืชอายุสองปี แต่นิยมปลูกเป็นพืชล้มลุกปีเดียว มีถิ่นกำเนิดทางตอนเหนือของประเทศจีน มีระบบรากแก้วแต่ตื้น ลำต้นสั้น ไม่มีกิ่งแขนง ใบมีสีเขียวอ่อน ลักษณะเป็น ผืนเดียวตลอด กาบใบหรือก้านใบกว้างแบน มีสีขาว กรอบ มีน้ำมาก ใบจะห่อคล้ายปลี อาจแน่นหรือหลวมขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ จะเริ่มห่อหัวเมื่อมีใบจริง 12–15 ใบ (ฐานข้อมูลพืชผัก บทความเกษตร, 2551ข) ดินที่เหมาะสมต่อการปลูกควรเป็นดินที่ร่วนซุย มีความอุดมสมบูรณ์สูง pH 6.0–6.5 การเตรียมดินควรขุดให้หน้าดินลึก การระบายน้ำ และอากาศดี ควรให้น้ำอย่างเพียงพอและสม่ำเสมอ และได้รับแสงแดดอย่างเต็มที่ตลอดทั้งวัน (รักบ้านเกิด, 2552)

ในปัจจุบันพบว่าเกษตรกรมีการใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืช ซึ่งทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพของมนุษย์ โดยสามารถแบ่งผลกระทบออกเป็น 2 ประเภท คือ ผลกระทบที่เป็นพิษเฉียบพลัน ซึ่งผู้ป่วยจะมีอาการในทันทีหลังจากสัมผัสสารเคมี เช่น คลื่นไส้ อาเจียน ปวดหัว ปวดกล้ามเนื้อ ท้องร่วง หายใจติดขัด และตาพร่า เป็นต้น และผลกระทบที่เป็นพิษเรื้อรัง ซึ่งเกิดจากพิษสะสมที่ก่อให้เกิดโรคหรือปัญหาอื่น ๆ เช่น มะเร็ง เบาหวาน อัมพฤกษ์ อัมพาต และโรคผิวหนังต่างๆ เป็นต้น (ฝ่ายข้อมูล มูลนิธิชีววิถี, 2554) อีกทั้งสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดวัชพืชยังทำให้เกิดวัชพืชที่สามารถต้านทานต่อสารเคมีได้ ซึ่งวัชพืชที่สร้างปัญหาในการเพาะปลูกผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาวปลีจะเป็นวัชพืชใบแคบวงศ์หญ้า เช่น หญ้าตีนนก (*Digitaria adscendens* (L.)) และหญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) เป็นต้น (โสมฤทัย, 2556) และวัชพืชยังก่อให้เกิดปัญหากับการใช้พื้นที่ดินในการปลูกพืชผัก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของวัชพืชนั้นทำให้พื้นที่ดินในการปลูกพืชผักนั้นลดลง ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาการควบคุมวัชพืชโดยการใช้แบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงแต่กำจัดวัชพืชได้เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืช (Harding and Raizada, 2015)

แอคติโนมัยซีท เป็นแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติทั่วไป เช่น ดิน ปุ๋ยหมักที่มีอุณหภูมิสูง โคลน แม่น้ำ ทะเลสาบ แต่ปกติมักจะเจริญอยู่ผิวดินหรือในดินที่ลึกไม่เกิน 4 เซนติเมตร จึงเป็นเชื้อที่พบได้ง่าย แอคติโนมัยซีทสามารถสร้างสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิที่มีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายจึงเป็นแหล่งสำคัญของการสร้างสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive Compound) เช่น สารปฏิชีวนะและรงควัตถุ เป็นต้น (วิชุดา และสายใจ, 2563) นอกจากนี้ยังมีการใช้แอคติโนมัยซีทในการผลิตสารกำจัดแมลงและสารกำจัดวัชพืช เช่น สาร Bilanaphos ซึ่งเป็นสารกำจัดวัชพืชที่สกัดได้จาก *Streptomyces hygroscopicus* SF1293 สาร Glufosinate ammonium ที่เป็นสารเมตาบอไลต์ที่ผลิตโดย *Streptomyces hygroscopicus* และถูกนำไปใช้เป็นอันดับต้น ๆ ของสารกำจัดวัชพืชที่นิยมใช้กันทั่วโลกในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีสาร Blasticidin S ซึ่งเป็นสารสกัดของ *Streptomyces grisechromogenes* สาร herbicidins A และ B ที่สกัดได้จาก *Streptomyces saganonensis* และ *Streptomyces scopuliridis* และยังมีสาร nigericin, hydantocidin และ geldanamycin ที่ถูกนำมาพัฒนาเป็นสารกำจัดวัชพืชทางชีวภาพจากสารที่ออกฤทธิ์ของ *Streptomyces hygroscopicus* (Bo et al., 2019) ซึ่งการค้นพบนี้จึงอาจนำไปสู่การใช้ประโยชน์ในการควบคุมโรคพืชได้ในอนาคต (ทายาท และคณะ, 2558) เนื่องจากวัชพืชทำหน้าที่เป็นโฮสต์สำหรับแมลงพาหะที่สามารถนำเชื้อก่อโรคไปสู่พืชผักได้ ดังนั้นการกำจัดวัชพืชนั้นจึงเป็นการกำจัดที่อยู่อาศัยของเชื้อก่อโรคในแมลงพาหะนั่นเอง (National Council of Educational Research and Training, 2018)

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้จัดทำจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกแอคติโนมัยซีทที่สามารถสร้างสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิในการควบคุมวัชพืช โดยนำมาควบคุมวัชพืชทางชีวภาพในการปลูกผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาวปลีซึ่งเป็นพืชในวงศ์

ผักกาดแทนการใช้สารเคมี ซึ่งไม่ส่งผลเสียหรือส่งผลเสียน้อยต่อสุขภาพของมนุษย์เมื่อเทียบกับการใช้สารเคมี และทำให้ระบบนิเวศไม่เสียสมดุลอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

แอคติโนมัยซีท

แอคติโนมัยซีทจำนวน 4 ไอโซเลทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ไอโซเลท D7, D13, D33 และ D36 เป็นแอคติโนมัยซีทที่แยกมาจากดินป่าชายเลน ตำบลเสม็ด อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี (วรางคณา, 2564)

การเลี้ยงแอคติโนมัยซีทเพื่อผลิตสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิ

เขี่ยแอคติโนมัยซีทที่เจริญบนอาหารแข็ง Starch Casein Agar (SCA) ที่มีพื้นที่ในการเจริญประมาณ 1 cm^2 มาใส่ในอาหารเหลว Starch Casein Nitrate Broth (SCN) ปริมาตร 30 ml ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml แล้วนำไปบ่มในเครื่องบ่มแบบเขย่า ความเร็ว 150 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 10 วัน จากนั้นเก็บเชื้อในอาหารเหลว SCN ทั้งหมด นำมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรองปราศจากเชื้อที่มีขนาดรูพรุน 0.20 µm แล้วเก็บส่วน Culture filtrateเพื่อนำไปทดสอบกิจกรรมการกำจัดวัชพืชในขั้นตอนต่อไป

การคัดกรองกิจกรรมการกำจัดวัชพืชของสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิที่ผลิตโดยแอคติโนมัยซีท (ดัดแปลงจาก Singh et al., 2018)

นำต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกซึ่งซื้อมาจากร้านค้าออนไลน์ที่มีอายุ 15 วันมาลงในดินร่วนที่บรรจุในกระถางปลูกพืชพลาสติก ขนาด 10.16 cm × 7.62 cm (กว้าง × สูง) แล้วปลูกไว้เป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกฟื้นตัว แล้วจึงฉีด Culture filtrate ของเชื้อแต่ละไอโซเลท ได้แก่ D7, D13, D33 และ D36 ลงไปให้ทั่วลำต้น กิ่ง และใบของต้นหญ้าตีนนก และต้นหญ้าแพรก โดยฉีด Culture filtrate ปริมาตร 2 ml ในวันที่ 1 จากนั้นสังเกตอาการของวัชพืชในวันที่ 3 เช่น ใบม้วน ใบไหม้ และใบเหี่ยว เป็นต้น และเตรียมชุดควบคุมโดยฉีดอาหารเลี้ยงเชื้อ SCN ที่ปราศจากเชื้อลงไปที่ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกแทน Culture filtrate

การทดสอบกิจกรรมการฆ่าต้นวัชพืชร่วมกับการตรวจสอบผลของ Culture filtrate ที่มีต่อผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาวปลีในระยะหลังการงอก

ใส่ต้นวัชพืชที่สั่งจากร้านค้าออนไลน์แต่ละชนิดลงในถุงเพาะชำขนาด 12.70 cm × 27.94 cm ถุงเพาะชำละ 4 ต้น และใส่เมล็ดผักกวางตุ้งเขียวและเมล็ดผักกาดขาวปลี โดยแต่ละถุงเพาะชำมีส่วนประกอบ (พรพรรณ, 2550) ดังนี้

สภาวะ	ส่วนประกอบใน 1 ถุงเพาะชำ	จำนวนถุงเพาะชำที่ทำการทดลอง
Test 1	ดินร่วน + ต้นหญ้าตีนนก *หรือ* ต้นหญ้าแพรก 4 ต้น	3
Control 1	ดินร่วน + ต้นหญ้าตีนนก *หรือ* ต้นหญ้าแพรก 4 ต้น	1
Test 2	ดินร่วน + ต้นหญ้าตีนนก *หรือ* ต้นหญ้าแพรก 4 ต้น + เมล็ดผักกวางตุ้งเขียว 4 เมล็ด	3
Control 2	ดินร่วน + ต้นหญ้าตีนนก *หรือ* ต้นหญ้าแพรก 4 ต้น + เมล็ดผักกวางตุ้งเขียว 4 เมล็ด	1
Test 3	ดินร่วน + ต้นหญ้าตีนนก *หรือ* ต้นหญ้าแพรก 4 ต้น + เมล็ดผักกาดขาวปลี 4 เมล็ด	3
Control 3	ดินร่วน + ต้นหญ้าตีนนก *หรือ* ต้นหญ้าแพรก 4 ต้น + เมล็ดผักกาดขาวปลี 4 เมล็ด	1

ให้น้ำวันละ 2 ครั้ง เป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ต้นวัชพืชฟื้นตัวและเพื่อให้เมล็ดผักกวางตุ้งเขียวและเมล็ดผักกาดขาวปลีเกิดการงอก จากนั้นนำ Culture filtrate ปริมาตรรวม 3 ml (2+1 ml) มาแบ่งฉีด 2 ครั้ง ในถุงเพาะชำที่เป็นชุดทดสอบ (Test) โดย

การฉีดครั้งแรก : ฉีด Culture filtrate ปริมาตร 2 ml ให้ทั่วลำต้น กิ่ง และใบของต้นวัชพืชและต้นผักในวันที่ 1 จากนั้นสังเกตอาการของวัชพืชและผักในวันที่ 3 เช่น ใบม้วน ใบไหม้ และใบเหี่ยว เป็นต้น

การฉีดครั้งที่สอง : ฉีด Culture filtrate ปริมาตร 1 ml ให้ทั่วลำต้น กิ่ง และใบของต้นวัชพืชและต้นผักในวันที่ 3 และสังเกตอาการของวัชพืชและผักในวันที่ 5

สำหรับชุดควบคุม (Control) ได้ใช้อาหาร SCN ที่ปราศจากเชื้อฉีดต้นพืชแทน Culture filtrate

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเลี้ยงแอคติโนมัยซีทเพื่อผลิตสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิ

จากการเพาะเลี้ยงแอคติโนมัยซีทจำนวน 4 ไอโซเลท ได้แก่ D7, D13, D33 และ D36 ในอาหารเหลว SCN ปริมาตร 30 ml ในขวดรูปชมพู่ ในเครื่องบ่มแบบเขย่า ความเร็ว 150 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 10 วัน แล้วเก็บเซลล์ทั้งหมดมากรองด้วยแผ่นเยื่อกรองปราศจากเชื้อที่มีขนาดรูพรุน 0.20 µm พบว่า Culture filtrate ของทุกไอโซเลท มีลักษณะใส ไม่มีตะกอน โดย Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 มีสีน้ำตาลแกมดำ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D13 มีสีเหลือง Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D33 มีสีเหลืองเข้ม และ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D13 มีน้ำตาลเข้ม ในขณะที่อาหารเหลว SCN เปล่าที่ไม่ได้เพาะเลี้ยงแอคติโนมัยซีทมีสีเหลืองอ่อน ดังแสดงใน Fig.1 สีของอาหารที่เปลี่ยนไปหลังจากการเพาะเลี้ยงแอคติโนมัยซีทแต่ละไอโซเลทแสดงให้เห็นว่าน่าจะมีสารที่แอคติโนมัยซีทสร้างขึ้นแล้วปล่อยลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ

(a) (b) (c) (d) (e)

Fig. 1 Culture filtrates of actinobacterial isolatesซ (a) D7; (b) D13; (c) D33; (d) D36 obtained from the cultivation of each isolate in 30 ml SCN broth at 30 °C for 10 days with 150 rpm shaking speed. SCN broth without any actinobacterial culture is shown in (e)

การคัดกรองกิจกรรมการกำจัดวัชพืชของสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิที่ผลิตโดยแอคติโนมัยซีท

ในการทดลองนี้ได้นำ Culture filtrates ของแอคติโนมัยซีททั้ง 4 ไอโซเลท (D7, D13, D33 และ D36) มาทดสอบกับต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรก พบว่าในวันที่ 3 หลังจากได้รับ Culture filtrate ของทุกไอโซเลท ต้นหญ้าตีนนกมีอาการใบเหลือง ใบเหี่ยว ใบไหม้ และใบม้วน (Fig. 2) และต้นหญ้าแพรกมีอาการใบเหลือง ใบเหี่ยว ใบไหม้ ใบม้วน และลำต้นไหม้ (Fig. 3) โดยต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกที่ได้รับ Culture filtrate ของเชื้อ แอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 มีอาการที่หลากหลายและรุนแรงกว่าต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกที่ได้รับ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลทอื่นๆ อีกทั้งสัดส่วนของใบหญ้าทั้งสองชนิดที่แสดงอาการที่ผิดปกติก็มีค่าที่สูงหลังจากได้รับ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 (Table 1)

Treatments	Control	With culture filtrate of D7	With culture filtrate of D13	With culture filtrate of D33	With culture filtrate of D36
Before spraying with culture filtrate					
After spraying with culture filtrate					

Fig. 2 Weed control activities of culture filtrates from four actinobacterial isolates (D7, D13, D33 and D36) on Finger grass at day 3 after spraying with culture filtrates

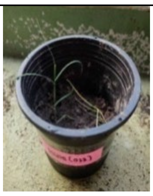
Treatments	Control	With culture filtrate of D7	With culture filtrate of D13	With culture filtrate of D33	With culture filtrate of D36
Before spraying with culture filtrate					
After spraying with culture filtrate					

Fig. 3 Weed control activities of culture filtrates from four actinobacterial isolates (D7, D13, D33 and D36) on Bermuda grass at day 3 after spraying with culture filtrates

Table 1 Symptoms of weed leaves after spraying with culture filtrates from actinobacterial isolates (D7, D13, D33 and D36) for 3 days

Source of culture filtrate	Symptoms of Finger grass after spraying with culture filtrate				Symptoms of Bermuda grass after spraying with culture filtrate		
	Yellow leaves*	Withering leaves*	Burned leaves*	Curling leaves*	Yellow leaves*	Withering leaves*	Burned leaves*
D7	4/7 (57.14%)	5/7 (71.43%)	5/7 (71.43%)	3/7 (42.86%)	8/16 (50%)	8/16 (50%)	8/16 (50%)
D13	3/5 (60%)	2/5 (40%)	-	-	9/17 (52.94%)	9/17 (52.94%)	-
D33	3/8 (37.50%)	3/8 (37.50%)	-	-	2/8 (25%)	-	-
D36	3/8 (37.50%)	3/8 (37.50%)	-	-	2/8 (25%)	-	-
Sterile SCN broth (Control)	-	-	-	-	-	-	-

* Digits shown in the table represent No. of affected leaves / Total No. of leaves and values in the brackets indicate percentage of affected leaves. S.D. values were not calculated because all of the leaves in each experiment were counted altogether without separating into replicates.

- indicates that no symptoms were found

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีททั้ง 4 ไอโซเลท (D7, D13, D33 และ D36) ทำให้เกิดอาการผิดปกติกับต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกได้ โดยทำให้เกิดอาการใบไหม้ ใบเหี่ยว ใบเหลือง ใบม้วน และลำต้นไหม้ ซึ่งการที่ Culture filtrates ของแอคติโนมัยซีทสามารถทำให้ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกเกิดการเปลี่ยนแปลงได้นั้น อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากใน Culture filtrates มีสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่แอคติโนมัยซีทผลิตออกมา (Selim et al., 2021) โดยสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิที่แอคติโนมัยซีทสร้างขึ้นทำให้เกิดกิจกรรมที่เป็นพิษต่อพืช เช่น ใบซีดเหลือง การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการทำให้ต้นแคระแกร็น โดยคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เป็นข้อกำหนดเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นสารควบคุมวัชพืช (Bo et al., 2019)

การทดสอบกิจกรรมการควบคุมวัชพืชหลังการงอกของต้นหญ้าตีนนก ต้นหญ้าแพรก ต้นผักกวางตุ้งเขียว และต้นผักกาดขาวปลี โดยการฉีด Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 ทำให้ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกแสดงอาการที่ผิดปกติได้มากกว่าไอโซเลท D13, D33 และ D36 จึงได้เลือก Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 มาใช้ในการทดสอบต่อ โดยนำต้นวัชพืชที่สั่งซื้อจากร้านค้าออนไลน์แต่ละชนิดลงในถุงเพาะชำ ถุงละ 4 ต้น ให้น้ำวันละ 2 ครั้ง เป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ต้นวัชพืชฟื้นตัวและเพื่อให้เมล็ดผักกวางตุ้งเขียวและเมล็ดผักกาดขาวปลีเกิดการงอก จากนั้นนำ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 ปริมาตรรวม 3 ml (2+1 ml) มาแบ่งฉีด 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ฉีดในวันที่ 1 ปริมาตร 2 ml และตรวจอาการผิดปกติที่เกิดกับวัชพืชในวันที่ 3 พบว่าต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกมีอาการใบม้วน ใบเหลือง ใบไหม้ และลำต้นไหม้ และครั้งที่ 2 ฉีดในวันที่ 3 ปริมาตร 1 ml เมื่อสังเกตอาการของวัชพืชในวันที่ 5 พบว่าต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกมีอาการใบม้วน ใบเหลือง ใบไหม้ และลำต้นไหม้เพิ่มขึ้น โดยจากวันที่ 3 ถึงวันที่ 5 หลังจากการฉีด Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 พบว่าต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกค่อย ๆ มีอาการที่ผิดปกติ คือ ใบเหี่ยว ใบไหม้ ใบเหลือง ใบม้วน และลำต้นไหม้เพิ่มมากขึ้น ส่วนต้นผักกวางตุ้งเขียวและต้นผักกาดขาวปลีไม่มีอาการที่ผิดปกติ ดัง Fig. 4 และ Fig. 5 โดยในการศึกษานี้ ได้ใช้ต้นวัชพืชในการทดสอบ แทนที่จะใช้

เมล็ดวัชพืชใส่ลงไปในถุงเพาะชำพร้อมกับเมล็ดผักหรือใส่หลังจากการเพาะเมล็ดผัก เนื่องจากได้ทำการทดลองปลูกเมล็ดวัชพืชและเมล็ดผักมาก่อนแล้ว พบว่าเมล็ดวัชพืชไม่เกิดการงอกในถุงเพาะชำ ในขณะที่เมล็ดผักสามารถงอกได้ภายใต้สภาวะการปลูกปกติ ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบกิจกรรมการควบคุมวัชพืชหลังการงอกของวัชพืชได้ จึงได้นำต้นวัชพืชมาทดสอบแทนเพื่อเป็นการจำลองการมีต้นวัชพืชเจริญขึ้นในถุงเพาะชำที่มีผักเจริญอยู่ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยยังไม่ได้ทดลองเพาะเมล็ดผักก่อนที่จะนำต้นวัชพืชไปลงในถุงเพาะชำ ซึ่งจะเป็นการจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้จริงในแปลงปลูกของเกษตรกรที่อาจพบวัชพืชเจริญขึ้นหลังจากเพาะปลูกผักไปแล้ว

หญ้าตีนนกและหญ้าแพรกเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Kanupriya et al., 2021; Das et al., 2021) ซึ่งมีลักษณะการเจริญเติบโตของลำต้นส่วนใหญ่อยู่ใต้พื้นดิน มีระบบรากเป็นรากฝอย ซึ่งเมื่อพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว ตามบริเวณลำต้นจะเกิดข้อและปล้องขึ้นชัดเจน โดยที่ภายในลำต้นจะมีกลุ่มเนื้อเยื่อลำเลียงกระจัดกระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้พืชใบเลี้ยงเดี่ยวไม่มีการเจริญเติบโตออกทางด้านข้าง ไม่มีกิ่งก้านสาขา (คัดคณัฐ, 2562ก) ส่วนผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาวปลีซึ่งเป็นพืชใน Family Brassicaceae เป็นพืชใบเลี้ยงคู่ (Goldberg, 1986) ซึ่งเป็นพืชที่มีรากเป็นระบบรากแก้ว และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว จะไม่เกิดข้อและปล้องขึ้นชัดเจนตามบริเวณลำต้น ท่อลำเลียงอาหารและน้ำจัดเรียงอยู่ภายในลำต้นอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้มีการเจริญเติบโตทางด้านข้างและสามารถแผ่กิ่งก้านสาขาได้ (คัดคณัฐ, 2562ข) จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า Culture filtrate ของเชื้อแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 ส่งผลให้ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกมีอาการที่ผิดปกติ แต่ไม่ส่งผลต่อต้นผักกวางตุ้งเขียวและต้นผักกาดขาวปลี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 มีกลไกในการออกฤทธิ์กับพืชใบเลี้ยงเดี่ยวแต่ไม่มีฤทธิ์ต่อพืชใบเลี้ยงคู่ อีกทั้งการเจริญเติบโตของหญ้าตีนนกและหญ้าแพรกซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีการเจริญเติบโตของลำต้นส่วนใหญ่อยู่ใต้พื้นดินอาจทำให้ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 เข้าทำลายส่วนของเนื้อเยื่อได้ง่ายกว่า และกลไกการยับยั้งวัชพืชหลังการงอกของ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 โดยสารเมตาบอไลต์ที่แอคติโนมัยซีทสร้างขึ้นอาจจะเป็นสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิที่สามารถเข้าถึงส่วนของระบบลำเลียงน้ำและระบบลำเลียงอาหารที่ไม่เป็นระเบียบของต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรก ทำให้ทั้งสองระบบเสียหาย จึงส่งผลให้เกิดอาการที่ผิดปกติ ได้แก่ ใบเหลือง ใบไหม้ ใบเหี่ยว และใบม้วน ส่วนลำต้นของต้นผักกวางตุ้งเขียวและต้นผักกาดขาวปลี ซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงคู่จะมีเปลือกลำต้นที่หนาและแข็งแรง Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 อาจจะเข้าถึงระบบลำเลียงน้ำและอาหารได้ยากกว่า จึงทำให้ต้นของผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาวปลีไม่แสดงอาการที่ผิดปกติ

ผลการทดลองจากการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่าแอคติโนมัยซีทอาจจะสร้างสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิที่สามารถควบคุมหญ้าตีนนกและหญ้าแพรกในระหว่างการปลูกผักกวางตุ้งเขียวและผักกาดขาวปลีได้ อย่างไรก็ตาม ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไปวิเคราะห์ว่าสารออกฤทธิ์ใน Culture filtrate เป็นสารชนิดใด อีกทั้งการจำแนกชนิดของแอคติโนมัยซีทก็มีความจำเป็นเพื่อช่วยให้สามารถยืนยันความปลอดภัยสำหรับการนำเชื้อเหล่านี้ไปใช้อีกด้วย

	Control	With culture filtrate of D7 (*n*=3)
Finger grass (*n*=4) / each planting bag		
Finger grass (*n* = 4) + Choy sum (*n* = 4) / each planting bag		
Finger grass (*n* = 4) + Chinese cabbage (*n* = 4) /each planting bag		

Fig. 4 Weed control during post-emergence stage of Finger grass, Choy sum, and Chinese cabbage after treatment with the culture filtrate of D7 for 5 days

	Control	With culture filtrate of D7 (*n* = 3)
Bermuda grass (*n*=4) / each planting bag		
Bermuda grass (*n*=4) + Choy sum (*n*=4) / each planting bag		
Bermuda grass (*n*=4) + Chinese cabbage (*n*=4) / each planting bag		

Fig. 5 Weed control during post-emergence stage of Bermuda grass, Choy sum, and Chinese cabbage after the treatment with culture filtrate of D7 for 5 days

สรุป

จากผลการคัดเลือกแอคติโนมัยซีท 4 ไอโซเลท ได้แก่ ไอโซเลท D7, D13, D33, และ D36 โดยใช้วิธีการทดสอบ Culture filtrate กับต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรก พบว่า Culture filtrate แอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 มีกิจกรรมการกำจัดวัชพืช คือ ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกได้ดีที่สุด เนื่องจากต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกมีอาการใบไหม้ ใบม้วน ใบเหี่ยว และใบเหลืองมากกว่าต้นหญ้าที่ได้รับ Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D13, D33 และ D36 และจากการทดสอบกิจกรรมควบคุมวัชพืชหลังการงอกของในถุงเพาะชำ พบว่า Culture filtrate ของแอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 ทำให้ต้นหญ้าตีนนกและต้นหญ้าแพรกมีอาการใบเหลือง ใบเหี่ยว และใบไหม้ แต่แทบไม่พบอาการที่ผิดปกติของต้นผักกวางตุ้งและต้นผักกาดขาวปลีหลังจากได้รับ Culture filtrate ของ แอคติโนมัยซีทไอโซเลท D7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการนำ Culture filtrate ไปใช้ในการควบคุมวัชพืชโดยไม่ส่งผลเสียต่อผักที่ปลูกได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

คัดคณัฐ ชื่นวงศ์อรุณ. 2562ก. พืชใบเลี้ยงเดี่ยว. National geographic ฉบับภาษาไทย. https://ngthai.com/science/25103/monocotyledon/, 20 เมษายน 2565.

คัดคณัฐ ชื่นวงศ์อรุณ. 2562ข. พืชใบเลี้ยงคู่. National geographic ฉบับภาษาไทย. https://ngthai.com/science/25114/dicotyledon/, 20 เมษายน 2565.

ฐานข้อมูลพืชผัก บทความเกษตร. 2551ก. ผักกาดเขียวกวางตุ้ง. https://vegetweb.com/ผักกาดเขียวกวางตุ้ง/, 2 กันยายน 2564.

ฐานข้อมูลพืชผัก บทความเกษตร. 2551ข. ผักกาดขาวปลี ฉบับเกษตรที่สูง. https://vegetweb.com/ผักกาดขาวปลี-ฉบับเกษตรท/, 14 มีนาคม 2565.

ทายาท ศรียาภัย, พิชาภัค ศรียาภัย, กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์, อรินทม์ งามนิยม, วิรงรอง ดวงใจ. 2558. ศักยภาพด้านชีวภาพของเชื้อแอคติโนมัยสีทจากดินป่าชายเลนจังหวัดสตูล. วารสารวนศาสตร์ 34(2): 51–61.

ฝ่ายข้อมูลมูลนิธิชีววิถี. 2554. ผลกระทบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชต่อสุขภาพคนไทย. https://thaipan.org/wp-content/uploads/2018/10/BriefingPesticideHEALTH.pdf, 2 กันยายน 2564.

พรพรรณ อู่สุวรรณ. 2550. การใช้เชื้อ *Bacillus* และ *Streptomyces* spp. ในการควบคุมโรคเชื้อราในองุ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

รักบ้านเกิด. 2552. ผักกาดขาวปลี. https://www.rakbankerd.com/agriculture/print.php?id=1122&s=tblplant, 14 มีนาคม 2565.

วรางคณา ไชยศรี. 2564. การคัดแยกและคัดกรองแอคติโนมัยซีทที่มีกิจกรรมยับยั้งแบคทีเรียจากดินป่าชายเลน. โครงงานทางจุลชีววิทยา ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาจุลชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

วิชุดา ทุ่งยอ, สายใจ วัฒนเสน. 2563. ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้จากตัวอย่างดินป่าชายเลนจังหวัดสตูล. ใน: รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาภาคใต้ ครั้งที่ 5. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช, นครศรีธรรมราช, หน้า 845–855.

สมชาย ชคตระการ, อัญชลี จาละ. 2558. การเจริญเติบโตของต้นกล้าผักกวางตุ้งดอกบนวัสดุปลูกที่เติมปุ๋ยหมักไส้เดือนดิน. Thai Journal of Science and Technology. 4(3): 236–243.

โสมฤทัย อินทมะโน. 2556. การป้องกันกำจัดวัชพืชในแปลงผัก. ศูนย์ปฏิบัติการข่าวเกษตร. http://sukhirin.narathiwat.doae.go.th/data/newsongserm/newsongserm01-05-56.pdf, 14 มีนาคม 2565.

Bo, A.B., Kim, J.D., Kim, Y.S., Sin, H.T., Kim, H.J., Khaitov, B., Ko, Y.K., Park, K.W., Choi, J.S. 2019. Isolation, identification and characterization of *Streptomyces* metabolites as a potential bioherbicide. PloS One 14(9): 1–18.

Das, S., Morya, S., Neumann, A., Chattu, V.K. 2021. A review of the pharmacological and nutraceutical properties of *Cynodon dactylon*. Pharmacogn Res.13(3): 104–112.

Gidik, B., Gul, V., Sefali, A. 2019. A study of wild plant species of Brassicaceae family in Bayburt region of Turkey. Pak. J. Bot. 51(2): 681–687.

Goldberg, A. 1986. Classification, evolution, and phylogeny of the Families of Dicotyledons. Smithsonian Institution Press. Washington.

Harding, D.P., Raizada, M.N. 2015. Controlling weeds with fungi, bacteria and viruses: A review. Front. Plant Sci. 6: 1–14.

Kanupriya, Kumar, M., Sharma, A., & Dhiman, A. 2021. Medicinal potential of *Digitaria*: An overview. J. Pharmacogn. Phytochem. 10(1): 1717–1719.

National Council of Educational Research and Training. 2018. Insect pests, diseases and weed management. https://ncert.nic.in/vocational/pdf/kefc106.pdf, 3 September 2021.

Selim, M.S.M., Abdelhamid, S.A., Mohamed, S.S. Secondary metabolites and biodiversity of actinomycetes. 2021. J. Genet. Eng. Biotechnol. 19(1): 72. doi.org/10.1186/s43141-021-00156-9

Singh, H., Naik, B., Kumar, V., Bisht, G.S. 2018. Screening of endophytic actinomycetes for their herbicidal activity. Ann. Agrar. Sci. 16: 101–107.

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงินแบบขั้นตอนเดียว: ผลของเงินต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Single-Step synthesis of silver-doped titanium dioxide nanoparticles: Effect of silver on structure and photocatalytic efficiency

สุวธิดา จีนเดิม[a,b], **หาญชนะ เกตมาลา**[c], **ณัฐธิดา รักกะเปา**[a,b,*]

Suwathida Jeenderm[a,b], Harnchana Gatemala[c], Natthida Rakkapao[a,b,*]

[a] สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี 84000

[b] ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา 90110

[c] ฝ่ายวิจัยเทคโนโลยีพลังงานใหม่ สถาบันนวัตกรรม ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) อยุธยา 13170

[a] Department of Applied Chemistry, Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, 84000 Thailand

[b] Center of Excellence in Membrane Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla, 90110 Thailand

[c] New Energy Technology Research Department, PTT Innovation Institute, PTT Public Company Limited, Ayutthaya, 13170 Thailand

*Corresponding author. E-mail address: natthida.r@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน (TiO_2/Ag) ปริมาณ 5% w/w โดยใช้ Tetraisopropyl Orthotitanate เป็นสารตั้งต้น จากผลการทดลองพบว่าทั้ง TiO_2 และ TiO_2/Ag ต่างมีโครงสร้างผลึกเป็นเฟสอนาเทสผสมรูไทล์ โดยการเจือด้วยเงินนั้นทำให้ทั้งขนาดอนุภาคและขนาดผลึกของ TiO_2 เล็กลง เมื่อศึกษาการดูดกลืนแสงย่าน UV-Vis พบว่าการเจือด้วยเงินนั้น นอกจากจะทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจาก 3.30 eV เป็น 3.33 eV แล้ว และยังปรากฏพีคการดูดกลืนใหม่ที่ 400-600 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยพิจารณาจากการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์จำลอง ซึ่งพบว่า TiO_2 บริสุทธิ์ มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูดีกว่า TiO_2/Ag โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0458 และ 0.0227 min^{-1} ตามลำดับ

คำสำคัญ: ไททาเนียมไดออกไซด์, ไททาเนียมไดออกไซด์เจือเงิน, การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Abstract

This research aims to study the synthesis of pure titanium dioxide (TiO_2) and 5% w/w silver-doped titanium dioxide nanoparticles (TiO_2/Ag) using Tetraisopropyl orthotitanate as a precursor. From the experimental results, both TiO_2 and TiO_2/Ag exhibited a rutile-mixed anatase phase crystal structure. By doping silver, both the particle size and crystallite size of TiO_2 are smaller. From UV-Vis DRS spectra, it was found that silver doping not only increased the activation energy of TiO_2 from 3.30 eV to 3.33 eV, but also appeared a new absorption peak at 400–600 nm. This absorption is related to the surface plasmon resonance phenomenon, which is a unique property of the silver nanoparticles (AgNPs). The photocatalytic efficiency of TiO_2 and TiO_2/Ag was tested by considering the degradation of methylene blue under UV-Vis stimulation. The pure TiO2 provided a better degradation efficiency compared to TiO_2/Ag and the degradation rate constants (k) were 0.0458 and 0.0227 min^{-1}, respectively.

Keyword: photocatalytic, silver-doped titanium dioxide, nanoparticles titanium dioxide

คำนำ

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์พยายามค้นคว้าหาวิธีแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งนาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญ โดยมีการพัฒนาอนุภาคขนาดนาโนมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อลดปัญหามลพิษทางน้ำ และมีแนวโน้มที่จะนำตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงขนาดนาโนไปใช้งานในอุตสาหกรรมมากขึ้นเนื่องจากไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนต่ำ

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นหนึ่งในวัสดุที่สามารถเตรียมให้มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้ และจัดเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจาก TiO_2 มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง UV อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นข้ามแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้เกิดคู่ electron-hole ขึ้น ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องและนำไปสู่การย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้

อย่างไรก็ตาม TiO_2 ก็ยังไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเท่าที่ควร เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นสูงและยังเกิดการรวมตัวกันของคู่ electron-hole ได้ง่าย ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ทดลองเจือ TiO_2 ด้วยโลหะมีตระกูลต่างๆ เพื่อช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานและพลังงานกระตุ้นลง ซึ่งการเจือ TiO_2 ด้วยเงิน (Ag) ได้รับความสนใจอย่างมากต่อการพัฒนาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 เนื่องจากมีการรายงานว่าการเจือด้วยโละเงินสามารถลดพลังงานกระตุ้นของ TiO_2 จาก 3.34 eV เป็น 3.04 eV ได้ โดยการเจือเงินเพียง 5% (Jongprateep et al. 2018) อีกทั้งอนุภาคนาโนเงิน (Ag) ก็ยังดูดกลืนแสงในช่วง visible ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance, SPR) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนเงินและทอง (Zhao et al., 2011) เมื่ออนุภาคนาโนเงินสัมผัสกับแสงย่าน visible ซึ่งมีความยาวคลื่นสอดคล้องพอดีกับความถี่ของการสั่นของอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวของอนุภาค ก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวของอนุภาคนาโนเงินหลุดได้ ซึ่งจะส่งเสริมสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 ให้มีความว่องไวขึ้น โดยช่วยลดการรวมตัวกลับของคู่ electron-hole ดังนั้นอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน (TiO_2/Ag) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งในช่วง UV และ visible

โดยงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือเงินแบบขั้นตอนเดียว และศึกษาผลของการเจือเงินต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนคอมพอสิต TiO_2/Ag เทียบกับ TiO_2 บริสุทธิ์

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์ TiO_2

การสังเคราะห์ TiO_2 มีขั้นตอนการเตรียมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 นำสารละลายเตตระไอโซโพรพิลออร์โทไททาเนต (TTIP) ปริมาตร 14.21 กรัม นำมาผสมกับกรดอะซิติก ปริมาตร 4.64 มิลลิลิตร และเติมเอทานอล 12.37 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเตรียม ส่วนที่ 2 นำกรดไนตริก pH = 2 ปริมาตร 4.64 มิลลิลิตร นำมาผสมกับเอทานอล ปริมาตร 6.18 มิลลิลิตร ทำการกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก เป็นเวลา 10 นาที และทำการนำส่วนที่ 2 ผสมกับส่วนที่ 1 ทำการกวนสารละลายเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำสารที่ได้ไปอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่ 60 °C นาน 96 h จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 2 h จะได้ TiO_2

การสังเคราะห์ TiO_2/Ag

การสังเคราะห์ TiO_2/Ag มีขั้นตอนการเตรียมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 นำสารละลายเตตระไอโซโพรพิลออร์โทไททาเนต (TTIP) ปริมาตร 14.21 กรัม นำมาผสมกับกรดอะซิติก ปริมาตร 4.64 มิลลิลิตร และเติมเอทานอลปริมาตร 12.37 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเตรียม ส่วนที่ 2 นำกรดไนตริก pH = 2 ปริมาตร 4.64 มิลลิลิตร นำมาผสมกับเอทานอล ปริมาตร 6.18 มิลลิลิตร ทำการกวนสารละลายเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ปริมาณ 0.0425

กรัม และทำการนำส่วนที่ 2 ผสมกับส่วนที่1 ทำการกวนสารละลายเป็นเวลา 20 นาที นำสารที่ได้ไปอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่ 60 °C นาน 96 h จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 2 h จะได้ TiO_2/Ag

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

X-RAY Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ PANALYTICAL รุ่น EMPYREAN ประเทศเนเธอร์แลนด์ ถูกนำมาใช้วิเคราะห์โครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึก *TiO_2 และ TiO_2/Ag* โดยบันทึกค่า 2θ ระหว่าง 5 ° ถึง 90° และนอกจากประโยชน์การวิเคราะห์เชิงคุณภาพแล้ว XRD ยังสามารถใช้วิเคราะห์เชิงปริมาณ นั่นคือ ใช้ในการ วัดขนาดอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร โดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) โดยใช้ทุกพีคที่ปรากฏดัง Fig.1B ในการหาค่าขนาดผลึก และคำนวณได้จาก Equation 1:

$$t=\frac{0.9\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (1)$$

โดย t คือ ขนาดอนุภาค

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ 1.5406 A

β คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่ง ของความสูงสูงสุดของกราฟระฆัง หรือ full width half maximum (FWHM)

θ คือ มุมของแบรก (Bragg's angle)

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-5200 ประเทศญี่ปุ่น ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะ รูปร่าง ขนาด และพื้นผิวของตัวอย่าง เตรียมตัวอย่างโดยอบไล่ความชื้นก่อนนำผงตัวอย่างไปติดบนเทปนำไฟฟ้าสองหน้า ซึ่งอยู่บนสตับแล้วเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า

วิเคราะห์ธาตุเด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์

วิเคราะห์ธาตุเพิ่มเติมด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS) จะช่วยให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างได้ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Apreo ประเทศเนเธอร์แลนด์

การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นของ TiO_2 และ TiO_2/Ag ด้วยเทคนิค UV–vis diffuse reflectance spectroscopy (DRS)

เทคนิค UV-Vis DRS ได้ถูกนำมาใช้ในการวัดค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy; E_a) ของตัวอย่าง TiO_2 เทียบกับ TiO_2/Ag โดยวิเคราะห์จากค่าการดูดกลืนแสงของผงตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 5B โดยค่า E_a นั้นคำนวณจาก Tauc plot ดังรูปที่ 5A ซึ่งปรากฏขอบการดูดกลืนแสงของ TiO_2 ที่ความยาวคลื่นประมาณ 328 นาโนเมตร โดย E_a และ α มีความสัมพันธ์ดัง Equation 2

$$(\alpha h\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_a) \quad (2)$$

โดย α คือ absorption coefficient

h คือ ค่าคงที่ของ Planck

ν คือ photon's frequency

A คือ proportionality constant

การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 และ TiO_2/Ag

สมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวอย่าง TiO_2 และ TiO_2/Ag พิจารณาจากประสิทธิภาพในการการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue; MB) ภายใต้สภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์จำลอง คือ แสงจากหลอดเมทัลฮาไลด์ กำลังไฟ 400 วัตต์ ทดสอบโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2 และ TiO_2/Ag 5% w/w ปริมาณ 0.1 กรัม ทำการทดลองโดย เติมลงในสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 20 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้ 10 นาที ก่อนฉายแสงจากหลอดเมทัลฮาไลด์ไปยังตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 120 นาที ซึ่งทำการกวนอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูภายหลังการฉายแสงทุกๆ 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่น 200-700 นาโนเมตร โดยค่าการดูดกลืนสูงสุดของสีย้อมเมทิลีนบลู (λ_{max})=292 นาโนเมตร โดยสามารถคำนวณการสลายย้อมเมทิลีนบลู ดัง Equation 3:

$$D\ (\%) = \left(1-\frac{C}{C_0}\right)\times 100 \qquad (3)$$

โดย D คือ Degraded efficiency

C คือ ค่าความเข้มข้นของการสลายสีย้อมเมทิลีบลู

C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของการสลายสีย้อมเมทิลีบลู

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 และ TiO_2/Ag

เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้แบบจำลองของ Langmuir-Hinshelwood ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 (first-order reaction) สามารถคำนวณได้ดัง Equation 4:

$$k=\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) \qquad (4)$$

โดย k คือ อัตราค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

C คือ ค่าความเข้มข้นของการสลายสีย้อมเมทิลีบลู

C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของการสลายสีย้อมเมทิลีบลู

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์คอมพอสิตของ TiO_2 ที่เจือด้วยเงินปริมาณ 5% w/w (TiO_2/Ag) โดยวิธี *Insitu* dopy เพื่อให้เงินไปปรับเปลี่ยนโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ TiO_2 ซึ่งอาจส่งผลให้ระดับพลังงานกระตุ้นของ TiO_2 ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุคอมพอสิตดีขึ้นเมื่อเทียบกับ TiO_2 บริสุทธิ์ โดยพบว่าตัวอย่างที่เจือด้วยเงินนั้นมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างจาก TiO_2 บริสุทธิ์ แสดงดัง Fig.1 ซึ่ง TiO_2 มีลักษณะเป็นผงร่วน สีขาว เนื้อละเอียด ขณะที่ TiO_2/Ag มีลักษณะเป็นผงร่วน สีครีม และมีเนื้อหยาบกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะกันของอนุภาค

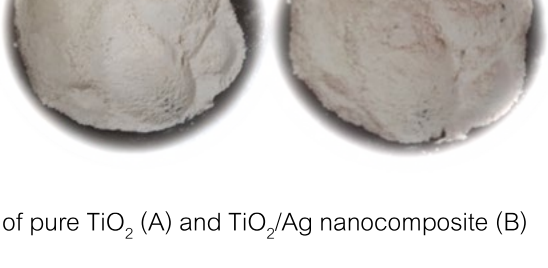
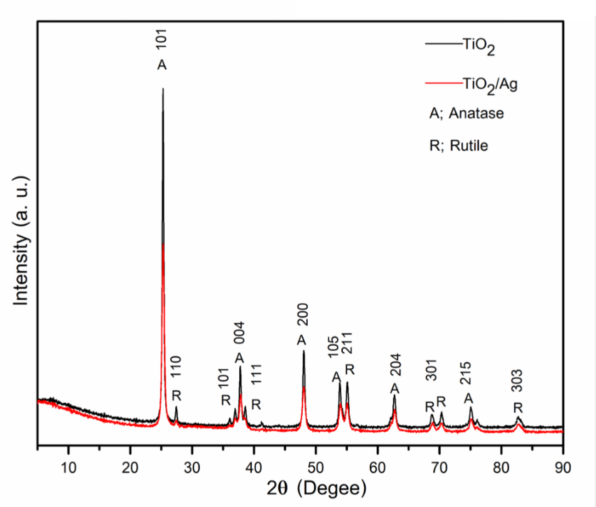


Fig.1 Physical characteristics of pure TiO_2 (A) and TiO_2/Ag nanocomposite (B)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของตัวอย่าง TiO_2และ TiO_2/Ag แสดงดัง Fig.2A ยืนยันว่าผลึกของทั้ง 2 ตัวอย่างเป็นเฟสผสมระหว่าง Anatase และ Rutile โดยปรากฏให้เห็นพีคหลักๆ ของทั้ง 2 เฟสอย่างชัดเจน ซึ่งเฟส Anatase ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.2°, 37.8°, 48.0°, 53.9°, 55.0° 63.0°, 69.2°, 70.8° 75.3°, และ 82.7° (Deorsola and Vallauri , 2008) และ และเฟส Rutile ปรากฏพีคที่ 2θ เท่ากับ 25.2°, 36.1°, 41.1°, 43.0°, 54.3°, 56.6°, 62.5°, 64.0°, 69.0° และ 69.8° (Thamaphat et al., 2008) ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเจือด้วยเงินนั้นทำให้ทุกพีคมีความเข้มลดลงซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของความสมบูรณ์ของผลึก TiO_2 และเนื่องจากปริมาณเงินที่เจือลงไปเพียง 5% w/w นั้นอาจน้อยเกินไปจึงไม่ปรากฏพีคของเงิน เช่น silver (200) ที่ 2θ เท่ากับ 44.57° หรือพีคของ AgO (Meng et al. 2010) ให้เห็นเลย

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึกโดยเทคนิค XRD พบว่าสามารถคำนวณขนาดผลึกจากทุกพีคสัญลักษณ์ของทั้งเฟส Anatase และ Rutile ของ TiO_2 ด้วยสมการของ Scherrer โดยขนาดผลึกเฉลี่ยแสดงดัง Fig.2B ซึ่งพบว่าผลึกทั้งเฟส Anatase และ Rutile ของ TiO_2 บริสุทธิ์ นั้นมีขนาดใหญ่กว่าของ TiO_2/Ag ทั้งนี้การเติมเงินอาจไปรบกวนการเกิดผลึกของ TiO_2 ทำให้ผลึกของ TiO_2/Ag นั้นมีขนาดเล็กลงประมาณ 40% โดยของเฟส Anatase ลดลงจาก 35.34 เป็น 21.21 นาโนเมตร ขณะที่ของเฟส Rutile ลดลงจาก 53.25 เป็น 31.96 นาโนเมตร ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาการเจือ TiO_2 ด้วย Eu^{3+} ซึ่งมีค่ารัศมีไอออนเท่ากับ 0.95 Å (Huang et al. 2012) ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดของ Ag^{+} ซึ่งมีรัศมีเท่ากับ 1.15 Å (Abdel Khalek et al. 2017) ขณะที่รัศมีของ Ti^{4+} เท่ากับ 0.68 Å (Pal et al. 2012) โดยการลดลงของขนาดผลึก TiO_2 นั้นอาจเป็นผลจากแทรกตัวของสารเจือคือ Eu^{3+} หรือ Ag^{+} ในแลตทิซของ TiO_2 จึงทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึก ส่งผลทำให้ทั้งขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกลดลง (Pal et al. 2012)

(A)



(B)

Sample	Crystal size (nm)	
	Anatase	Rutile
TiO_2	36.94	48.62
TiO_2/Ag	25.78	33.61

Fig.2 X-ray diffraction (XRD) patterns (A) and crystallite size of anatase and rutile phases (B) of TiO_2 and TiO_2/Ag nanocomposite

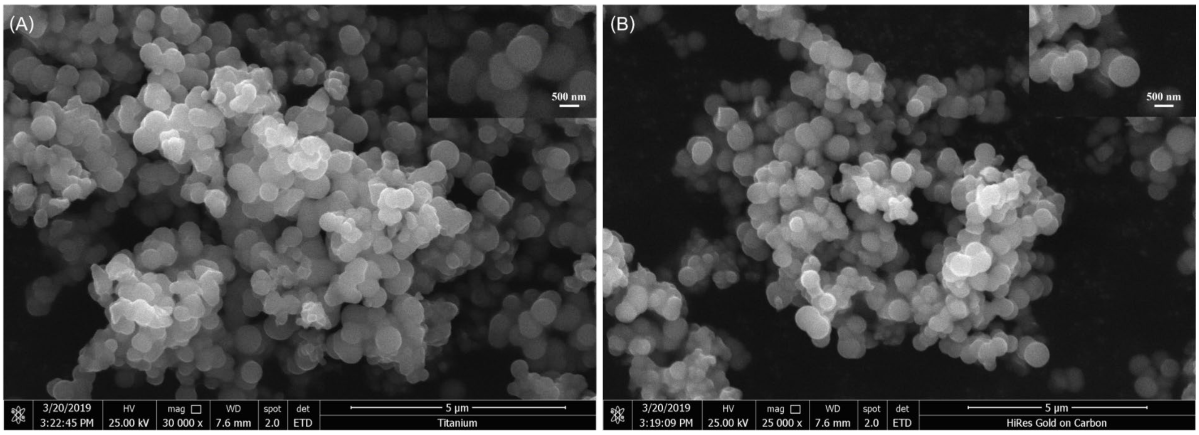


Fig.3 SEM image of samples: (A) TiO_2 and (B) TiO_2/Ag nanocomposite

ผลการศึกษาลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาของ TiO_2 และ TiO_2/Ag โดยเทคนิค SEM แสดงดัง Fig.3 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า TiO_2 มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 680 นาโนเมตร ดัง Fig.3A และการเจือด้วยเงินนั้นมีผลอย่างชัดเจนต่อทั้งขนาดและลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาของอนุภาค โดยใน Fig.3B พบว่าอนุภาค TiO_2/Ag นั้นมีขนาดเล็กกว่า TiO_2 อย่างเห็นได้ชัด โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 560 นาโนเมตร ซึ่งเล็กลง 17% เมื่อเทียบกับ TiO_2 บริสุทธิ์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเจือ TiO_2 ด้วยเงินนั้นทำให้ทั้งขนาดผลึกและขนาดอนุภาคเล็กลง ซึ่งอาจเกิดจาก Ag^+ เข้าไปแทรกตัวในโครงผลึกของ TiO_2 (Pal et al. 2012)

เทคนิค Energy-dispersive spectroscopy (EDS) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการมีอยู่ของเงินในตัวอย่าง TiO_2/Ag ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดัง Fig.4 โดยพบเพียงธาตุ Ti, O และ Ag เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง TiO_2/Ag ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐาน โดยพบว่าเงินผสมเข้ากับ TiO_2 ได้เป็นอย่างดี และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของ TiO_2 โดยผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณจากสเปกตรัม EDS พบว่ามีองค์ประกอบของเงิน 5.27% w/w ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเงินที่เจือในลงในตัวอย่าง คือ 5% w/w

(A) (B)

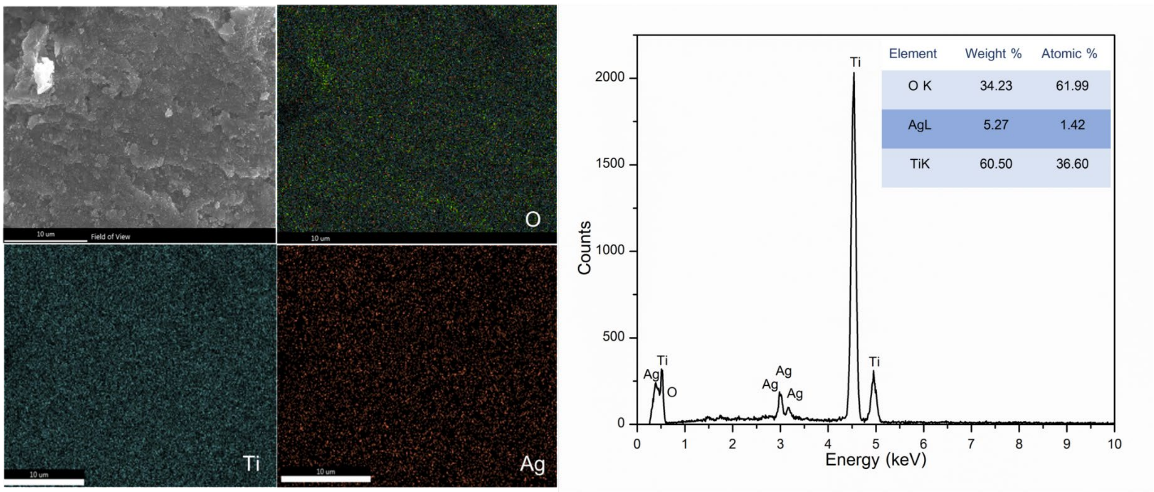


Fig.4 SEM-EDS images (A) and EDS pattern (B) of TiO_2/Ag nanocomposite

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของผงตัวอย่างด้วยเทคนิค UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy (DRS) แสดงดัง Fig. 5A และ Fig. 5B เมื่อพิจารณา Fig. 5A พบว่าตัวอย่าง TiO_2/Ag นั้นปรากฏการดูดกลืนแสง 2 ช่วง คือ การดูดกลืนแสงของ TiO_2 ในช่วง UV ซึ่งปรากฏที่ความยาวคลื่น 318 นาโนเมตร และการดูดกลืนในช่วง visible ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-600 นาโนเมตร (Mehrdel and Aziz 2018) ขณะที่ TiO_2 ซึ่งไม่มีการเจือด้วยเงินนั้นจะพบการดูดกลืนแสงเพียงช่วง UV ที่ความยาวคลื่น 328 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่า E_a ของ TiO_2 (Zhang et al. 1999) และยังพบว่าความเข้มของพีคการดูดกลืนแสงในช่วง UV ของ TiO_2 นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเจือด้วยเงิน โดยค่า E_a สามารถคำนวณได้จาก Tauc plot ของพีคการดูดกลืนแสงในช่วง UV แสดงดัง Fig. 5B ซึ่งพบว่า E_a ของ TiO_2 มีค่า 3.30 eV และการเจือด้วยเงินเพียง 5% w/w นั้นทำให้ค่า E_a ของ TiO_2 เพิ่มขึ้น 0.91% เป็น 3.33 eV จากข้อมูลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าการเจือด้วยเงินนั้นมีผลต่อโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ TiO_2

โดย Mou Pal และคณะ (2012) พบปรากฏการณ์ที่คล้ายคลึงกันในการศึกษา TiO_2 เจือ Eu^{3+} โดยพบว่าค่า E_a ของตัวอย่างที่เจือ Eu^{3+} ปริมาณ 5% w/w นั้นเพิ่มขึ้น 1.27% เมื่อเทียบกับ TiO_2 บริสุทธิ์ โดยอธิบายว่าการเพิ่มขึ้นของค่า E_a ของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์เช่น TiO_2 นั้นนอกจากจะสัมพันธ์กับสมบัติทางเคมีของสารเจือแล้ว ยังสัมพันธ์กับความแตกต่างระหว่างรัศมีไอออนของสารเจือและไอออนบวกของโฮสต์ ซึ่งรัศมีของ Ti^{4+} เท่ากับ 0.68 Å (Pal et al. 2012) ขณะที่ไอออนของสารเจือ เช่น Eu^{3+} (0.95 Å; (Pal et al. 2012))หรือ Ag^+ (1.15 Å; (Abdel Khalek et al. 2017)) นั้นมีขนาดใหญ่กว่ามาก โดยสาเหตุที่ค่าพลังงานกระตุ้นของ TiO_2 เพิ่มขึ้นเมื่อเจือด้วยเงินเนื่องจากแถบการนำไฟฟ้าของ TiO_2 นั้นจะเลื่อนขึ้นไปเหนือกว่าระดับพลังงานกระตุ้นแรก (first excited state) ของ Ag^+ โดย Ag^+ ในสถานะถูกกระตุ้นจะเกิดอันตรกริยากับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าของ TiO_2 ทำให้ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก TiO_2 ไปยัง Ag^+

ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวอย่าง TiO_2 และ TiO_2/Ag โดยทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์จำลอง เป็นเวลา 120 นาที โดยผลการทดลองแสดงดัง Fig. 5C ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2/Ag ด้อยลงเมื่อเทียบกับ TiO_2 บริสุทธิ์ โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 0.0458 และ 0.0227 min^{-1} ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 5D:

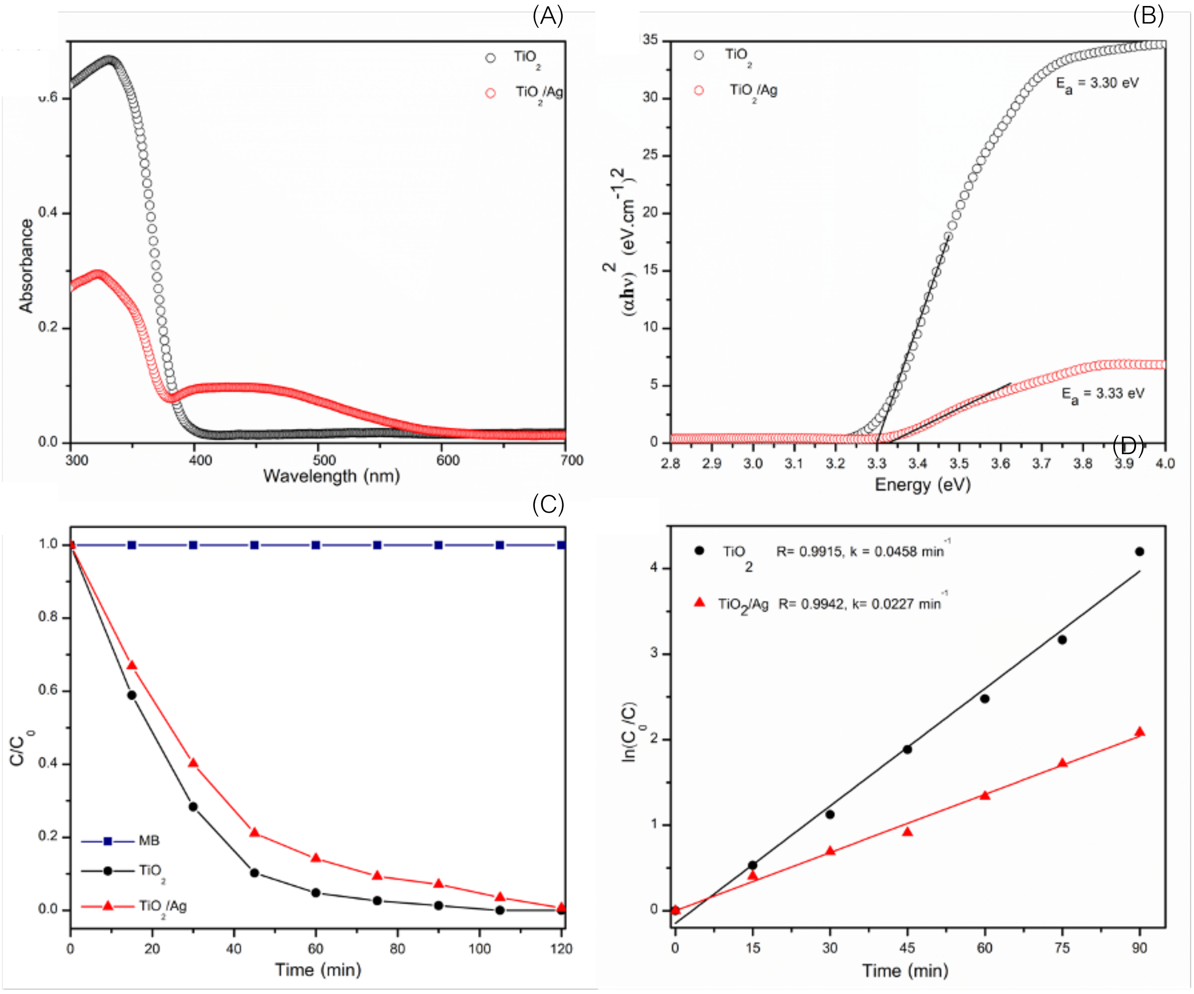


Fig.5 UV-Vis DRS spectra (A), Tauc plot and the band gap energy (B), photodegradation curves of methylene blue (C), and plot of ln(C_0/C) versus time (D) of TiO_2 and TiO_2/Ag nanocomposite.

สรุป

การสังเคราะห์ TiO_2 และ TiO_2/Ag โดยวิธี *Insitu*-dopy พบว่าการเจือด้วยเงินเพียง 5% w/w นั้นมีผลทั้งต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึก TiO_2 โดยทำให้ขนาดผลึกของเฟส Anatase และ Rutile เล็กลง และยังมีผลทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงอีกด้วย โดยอนุภาค TiO_2 และ TiO_2/Ag มีขนาดประมาณ 680 และ 560 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยอนุภาค TiO_2/Ag นั้นปรากฏการดูดกลืนแสง 2 ช่วง คือช่วง UV ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของ TiO_2 และช่วง visible ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) โดยพบว่าการเจือด้วยเงินนั้นมีผลต่อโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ TiO_2 โดยทำให้ค่า E_a ของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจาก 3.30 eV เป็น 3.33 eV ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยพิจารณาจากการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์จำลอง ซึ่งพบว่า TiO_2 มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูดีกว่า TiO_2/Ag โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0458 และ 0.0227 min^{-1} ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ SIT6201045S และ SCI6305091b ประจำปีการศึกษา 2563 และทุนบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาโท จากศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้าน

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่เน้นการศึกษาวิจัย ประจำปีการศึกษา 2561 จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

เอกสารอ้างอิง

Abdel Khalek, M.A.I., Osama, K.A., Selim, F. I., el Hosiny, M.A., Abdel Khalek, I. Osama, I. Kinetics, O. 2017. Kinetics and Thermodynamics of Some Heavy Metals Removal from Industrial Effluents Through Electro-Flotation Process. Colloid and Surface Science 2(2): 47–53. doi.org/10.11648/j.css.20170202.11

Deorsola, FA., Vallauri, D. 2008. Synthesis of TiO_2 nanoparticles through the gel combustion process. J. Mater. Sci. 43(9): 3274–3278. doi.org/10.1007/s10853-008-2530-4

Huang, C.W., Lin, B.J., Lin, H.Y., Huang, C.H., Shih, F.Y., Wang, W.H., Liu, C.Y., Chui, H.C. 2012. Observation of strain effect on the suspended graphene by polarized Raman spectroscopy. Nanoscale Res. Lett. 7: 1–6. Springer New York LLC. doi.org/10.1186/1556-276X-7-1

Jongprateep, O., Meesombad, K., Techapiesancharoenkij, R., Surawathanawises, K. 2018. Chemical composition, microstructure, bandgap energy and electrocatalytic activities of TiO_2 and Ag-doped TiO2 powder synthesized by solution combustion technique. Ceram. Int. 44: S228–S232. Elsevier Ltd. doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.108.

Mehrdel, B., Aziz, A.A. 2018. The sensitivity of surface plasmon resonance damping for colloidal silver nanoparticles. International Conference of Solid State Science and Technology; Penang (Malaysia); 13–16 Nov 2017. J. Phys. Conf. Ser. 53(10). Institute of Physics Publishing. doi.org/10.1088/1742-6596/1083/1/012042

Meng, F., Lu, F. Sun, Z., Lü. J. 2010. A mechanism for enhanced photocatalytic activity of nano-size silver particle modified titanium dioxide thin films. Sc.i China Technol. Sci. 53(11): 3027–3032. Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/s11431-010-4116-z.

Pal, M., U. Pal, J. Miguel, G. Y. Jiménez, and F. Pérez-Rodríguez. 2012. Effects of crystallization and dopant concentration on the emission behavior of TiO_2: Eu nanophosphors.

Thamaphat, K., Limsuwan, P. Ngotawornchai, B. 2008. Phase Characterization of TiO_2 powder by XRD and TEM. Nat. Sci.).

Zhang, Y., Zhou, G.E., Zhang, Y.H., Li, L., Yao, L.Z. Mo, C.M. 1999. Preparation and optical absorption of dispersions of nano-TiO_2/MMA (methyl methacrylate) and nano-TiO_2/PMMA (polymethylmethacrylate). Mater Res Bull, 34 (5): 701–709. Elsevier Science Ltd. doi.org/10.1016/S0025-5408(99)00065-3.

Zhao, W., Feng, L., Yang, R., Zheng, J., Li, X. 2011. Synthesis, characterization, and photocatalytic properties of Ag modified hollow SiO_2/TiO_2 hybrid microspheres. Appl. Catal. B. 103(1–2): 181–189. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.01.025

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และศึกษาผลของการเจือกราฟีนออกไซด์ต่อสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

Synthesis of graphene oxide and studying the effect of graphene oxide decorating on the photocatalytic property of titanium dioxide nanoparticles

วรันยา ไสไทย[a], ณัฐธิดา รักกะเปา[a,b,*], หาญชนะ เกตมาลา[c], ศุภรัตน์ แสงศร[a], ธาริกานต์ สาคะโร[a]

Warunya Saithai[a], Natthida Rakkapao[a,b,*], Harnchana Gatemala[c], Suparat Saengson[a], Tarikan Sakaro[a]

[a]สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี 84000

[b]ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา 90110

[c]ฝ่ายวิจัยเทคโนโลยีพลังงานใหม่ สถาบันนวัตกรรม ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) อยุธยา 13170

[a]Department of Applied Chemistry, Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani 84000, Thailand

[b]Center of Excellence in Membrane Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla 90110, Thailand

[c]New Energy Technology Research Department, PTT Innovation Institute, PTT Public Company Limited, Ayutthaya 13170, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: natthida.r@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมกราไฟต์ที่หลุดลอก โดยใช้ H_2SO_4 ร่วมกับ $KMnO_4$ และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอย่างรวดเร็วด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า จากนั้นนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยวิธี Hummer's เพื่อให้ได้ กราฟีนออกไซด์ที่มีคุณภาพดี จากนั้นนำกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ไปคอมพอสิตกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดีขึ้น จากผลการทดลองพบว่าการผลิตกราฟีนออกไซด์จากกราไฟต์ที่หลุดลอกนั้นเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับการเตรียมจากกราไฟต์แบบดั้งเดิม โดยพบว่าอนุภาคนาโนคอมพอสิตไทเทเนียมไดออกไซด์เจือกราฟีนออกไซด์จากกราไฟต์ที่หลุดลอกนั้นมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงดีที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนคอมพอสิตไทเทเนียมไดออกไซด์เจือกราฟีนออกไซด์จากกราไฟต์และไทเทเนียมไดออกไซด์ดั้งเดิม โดยมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบูลได้อย่างสมบูรณ์ ในเวลาเพียง 90 นาที ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง

คำสำคัญ: กราฟีนออกไซด์, กราไฟต์ที่หลุดลอก, ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง, นาโนคอมพอสิต, ไทเทเนียมไดออกไซด์

Abstract

This research aimed to study the preparation of exfoliated graphite (G_E) by using H_2SO_4 in presence of $KMnO_4$ and rapidly heating the sample by arc-discharge method. Then used G_E as a raw material for synthesizing good quality graphene oxide by Hummer's method. The prepared graphene oxide was then composited with TiO_2, aimed to improve the photocatalytic properties of TiO_2. The results showed that the fabrication of graphene oxide from exfoliated graphite is an efficient method and yielded better product quality compared to a conventional Hummer's method that graphite was used as raw material. It was found that graphene oxide-doped TiO_2 nanocomposites from exfoliated graphite (TiO_2/G_EO) had the best photocatalytic efficiency compared to the graphene oxide-doped TiO_2 nanocomposites from graphite (TiO_2/GO) and the pristine TiO_2. The TiO_2/G_EO was found to be effective in complete degradation of methylene blue dye in only 90 minutes under UV-Vis irradiation.

Keyword: Exfoliated Graphite, Graphite Oxide, Nanocomposites, Photocatalyst, Titanium dioxide

คำนำ

ผู้วิจัยสนใจปรับปรุงประสิทธิภาพของสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 โดยเติมสารตัวเติมอื่นเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม คือ กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูง (Pala and Tokat, 2002) มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ (Robinson et al., 2001) และมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Ambrosi et al., 2014) กราฟีนออกไซด์เตรียมได้จากกระบวนการออกซิเดชันของกราไฟต์โดยใช้สารเคมีเข้มข้นและเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง ดังนั้นการเตรียมกราฟีนออกไซด์ในระดับอุตสาหกรรมจึงค่อนข้างจำกัดและเป็นไปได้ยาก ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตกราฟีนออกไซด์คุณภาพดีจากกราไฟต์ที่หลุดลอก (Exfoliate Graphite; G_E) ซึ่งสามารถผลิตได้จากสารแทรกสอดและการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอย่างรวดเร็ว โดยกราไฟต์ทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินเทอร์คาเลต (Intercalated Compounds; ICs) ซึ่งที่นิยมใช้คือ H_2SO_4 จะแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นของคาร์บอน (Geng et al., 2011) และเมื่อได้รับความร้อน สารอินเทอร์คาเลตจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ และกลายเป็นไอ (Saidaminov et al., 2013) ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของระนาบคาร์บอนและได้ผลิตภัณฑ์เป็นกราไฟต์ที่หลุดลอก (Anderson and Chung, 1984) ทั้งนี้มีรายงานว่าการเตรียมโดยใช้ ICs ร่วมกับการเติมตัวออกซิไดซ์นั้นส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ G_E ที่มีคุณภาพดีขึ้น (Liu and Liangb, 2014) ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะทำหน้าที่ออกซิไดซ์บริเวณขอบและจุดบกพร่องของอนุภาคกราไฟต์ จึงช่วยส่งเสริมให้เกิดการแทรกสอดของ ICs ได้ดีขึ้น อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังนำการอาร์คดิสชาร์จด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ความร้อนแก่สารประกอบอินเทอร์คาเลตของกราไฟต์ (Graphite Intercalated Compounds; GICs) ซึ่งการอาร์คดิสชาร์จด้วยไฟฟ้านั้นเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และมีต้นทุนต่ำ จึงมีศักยภาพในการขยายกำลังการผลิต G_E สู่ระดับอุตสาหกรรมได้ โดยงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมกราไฟต์ที่หลุดลอกโดยใช้ H_2SO_4 ร่วมกับ $KMnO_4$ และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอย่างรวดเร็วด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า และนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ที่มีคุณภาพดีกว่าการสังเคราะห์จากกราไฟต์ดั้งเดิมด้วยวิธี Hummer's จากนั้นนำกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ไปคอมพอสิตกับไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบ Solvothermal เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดีขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมกราไฟต์ที่หลุดลอก (Exfoliated Graphite)

แช่ผงกราไฟต์ในกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น ปริมาณ 40 มิลลิลิตร และเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ปริมาณ 7.2 กรัม กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 3 h จากนั้นนำไปบ่มในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 6 °C เป็นเวลา 10 วัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำและอบตัวอย่างให้แห้งด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 h เพื่อให้ได้ผงตัวอย่างแห้ง และนำตัวอย่างไปให้ความร้อนอย่างรวดเร็วด้วยการอาร์คโดยใช้กระแสไฟฟ้า 68 A จะได้ผลิตภัณฑ์กราไฟต์ที่หลุดลอก (G_E)

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)

สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยใช้กราไฟต์บริสุทธิ์ (G) และกราไฟต์ที่หลุดลอก (G_E) เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ด้วยวิธี Hummer's (William S. Hummers et al., 1958) โดยนำผงวัตถุดิบตั้งต้น 1 กรัม และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดทำปฏิกิริยาและกวนผสมอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก จากนั้นเติมโซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$) 1.5 กรัม และกวนผสมเป็นเวลา 2 h แล้วเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) 8 กรัม ลงในสารแขวนลอยและกวนผสมเป็นเวลา 2 h พร้อม

กับควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C จะได้ตัวอย่างสารแขวนลอยสีน้ำตาลอมเทา เมื่อเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงในขวดทำปฏิกิริยา อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็น 95 °C และเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที สารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 30 wt% ปริมาณ 30 มิลลิลิตร สีของสารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลอมเหลือง จากนั้นล้างตะกอนด้วยสารละลายเจือจางของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และน้ำกลั่น ทำตะกอนให้แห้งโดยการแช่เยือกแข็ง จะได้กราฟีนออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ (Suktha et al., 2019) โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการเตรียมกราฟีนออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธี Hummer's แบบดั้งเดิมตามที่อธิบายไว้ข้างต้น โดยทดลองใช้กราไฟต์ที่หลุดลอก (G_E) เป็นสารตั้งต้นแทนกราไฟต์บริสุทธิ์ (G) โดยจะนิยามผลิตภัณฑ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้เป็น G_EO และ GO ตามลำดับตามวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมพอสิตไทเทเนียมไดออกไซด์เจือกราฟีนออกไซด์

สังเคราะห์ด้วยวิธี solvothermal โดยใช้ TiO_2 (P25) 1 กรัม กระจายตัวในตัวทำละลายผสมของน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และเอทานอล 100 มิลลิลิตร จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที และเติมผงกราฟีนออกไซด์ GO หรือ G_EO ที่สังเคราะห์ได้ ปริมาณ 0.003 กรัม โดยคิดเป็น 3 wt% จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 15 นาที จนตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารที่ได้ใส่ในหม้อนึ่งความดัน (Teflon-lined stainless autoclave) และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 3 h เมื่อครบเวลาจึงนำอนุภาคนาโนคอมพอสิตที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 6 h (Martins et al., 2018)

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-5200 ประเทศญี่ปุ่น ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะ รูปร่าง ขนาด และพื้นผิวของตัวอย่าง เตรียมตัวอย่างโดยอบไล่ความชื้นก่อนนำผงตัวอย่างไปติดบนเทปนำไฟฟ้าสองหน้า ซึ่งอยู่บนสตับแล้วเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

X-RAY Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ PANALYTICAL รุ่น EMPYREAN ประเทศเนเธอร์แลนด์ ถูกนำมาใช้วิเคราะห์โครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึกกราไฟต์ โดยบันทึกค่า 2θ ระหว่าง 5 ° ถึง 65 °

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น Spectrum Two ประเทศสหรัฐอเมริกา ถูกนำมาใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีภายในโครงสร้างของตัวอย่างกราไฟต์ที่หลุดลอกและกราฟีนออกไซด์ โดยวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟาเรดในโหมด ATR ช่วงเลขคลื่น 4,000-400 cm^{-1} ทำการสแกนที่ความละเอียด 2 cm^{-1} จำนวน 32 ซ้ำต่อสเปกตรัม

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงพิจารณาจากความเร็วในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue; MB) ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง โดยใช้หลอดเมทัลฮาไลด์กำลังไฟ 400 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง ทดสอบโดยเติมตัวเร่ง

ปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2, TiO_2/GO หรือ TiO_2/G_EO ปริมาณ 0.05 กรัม ในสารละลาย MB เข้มข้น 20 ppm ปริมาณ 50 มิลลิลิตร กวนผสมกันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นฉายแสงจากหลอดเมทัลฮาไลด์ไปยังตัวอย่าง เป็นเวลา 120 นาที โดยเก็บตัวอย่างสารละลาย MB ทุกๆ 15 นาที เพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่น 200-700 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่เวลาต่างๆ (A_i) มาเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย MB เริ่มต้น (A_0) และคำนวณร้อยละการย่อยสลาย (%D) ตาม Equation 1

$$\%D = \frac{(A_0 - A_i)}{A_0} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ D คือ ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวอย่าง

A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น

A_i คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

กราไฟต์ที่หลุดลอกและกราฟีนออกไซด์

ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างกราไฟต์ (G) แสดงดัง Fig. 1A และเมื่อนำกราไฟต์ไปผ่านกระบวนการปรับสภาพและให้ความร้อนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จด้วยไฟฟ้าจะได้กราไฟต์ที่หลุดลอกเป็นผลิตภัณฑ์แสดงดัง Fig. 1B ซึ่งพบว่ามีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างจากกราไฟต์ดั้งเดิมโดยสิ้นเชิง โดยมีลักษณะเป็นผงสีดำละเอียด ฟู มีน้ำหนักเบา และฟุ้งกระจายได้ง่าย

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างกราฟีนออกไซด์ซึ่งสังเคราะห์จากกราไฟต์ (GO) และสังเคราะห์จากกราไฟต์ที่หลุดลอก (G_EO) เทียบกับกราไฟต์ดั้งเดิม (G) และกราไฟต์ที่หลุดลอก (G_E) แสดงดัง Fig. 2 ซึ่งพบว่าตัวอย่างกราไฟต์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนที่จับตัวกันอย่างหนาแน่น มีทั้งขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน เมื่อมีการปรับสภาพและให้ความร้อนด้วยการอาร์คดิสชาร์จ พบว่าอนุภาคกราไฟต์นั้นแตกตัวและกระจายออกเป็นแผ่นขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างกราไฟต์ตั้งต้น และเมื่อนำตัวอย่าง G และ G_E ไปผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยวิธี Hummer'sพบว่าแผ่นกราฟีนออกไซด์ GO และ G_EO ที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่นบางและคลี่ตัวออกโดยไม่พบว่ามีการรวมตัวเป็นอนุภาคหลงเหลืออยู่อีกต่อไป ทั้งนี้พบว่าตัวอย่าง G_EO นั้นมีลักษณะเป็นแผ่นที่มีขนาดเล็กและไร้ระเบียบกว่าของ GO ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการผ่านกระบวนการปรับสภาพและให้ความร้อนด้วยการอาร์คดิสชาร์จมาก่อน โดยนักวิจัยคาดว่าจะสามารถลดการแตกหักของแผ่นกราฟีนออกไซด์ลงได้ โดยการลดความเข้มข้นของสารเคมีในกระบวนการ Hummer's ลง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กราฟีนออกไซด์ที่มีคุณภาพดีและมีลักษณะของแผ่นที่สมบูรณ์ที่สุด

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึกกราไฟต์ โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของตัวอย่างกราไฟต์ดั้งเดิม กราไฟต์ที่หลุดลอก กราฟีนออกไซด์จากกราไฟต์ และกราฟีนออกไซด์จากกราไฟต์ที่หลุดลอก แสดงดัง Fig. 3 โดยตัวอย่างกราไฟต์นั้นปรากฏพีคอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง 26.5 ° ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของระนาบ (002) ของผลึกกราไฟต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะห่างระหว่างระนาบ d_{002} ที่ 3.40 นาโนเมตร ทั้งนี้พบว่าตัวอย่าง G_E นั้นยังปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เดิม แต่มีความเข้มของพีคลดลง ซึ่งแสดงถึงความบกพร่องของโครงสร้างผลึกกราไฟต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่พบการแตกออกของอนุภาคกราไฟต์เมื่อผ่านการปรับสภาพและให้ความร้อนด้วยการอาร์คด้วยไฟฟ้า และเมื่อนำตัวอย่างไปผ่านกระบวนการ Hummer's พบว่า GO นั้นปรากฏพีคของระนาบผลึก (002) ที่ตำแหน่ง 10.3 ° ซึ่งสอดคล้องกับ d_{002} ที่ 8.60 นาโนเมตร ซึ่งการขยายตัวของระนาบ

(002) นั้นเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันทำให้หมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนเข้ามาแทรกตัวอยู่ระหว่างระนาบของแผ่นกราฟีน ซึ่งนอกจากจะพบการขยายตัวของระนาบ (002) แล้ว ยังพบว่าความเข้มของพีคดังกล่าวลดลงอันเนื่องมาจากผลึกกราไฟต์ถูกทำลายจึงกลายเป็นแผ่นกราฟีนออกไซด์อิสระมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และพบว่าการใช้ G_E เป็นวัตถุดิบตั้งต้นแทนกราไฟต์นั้นช่วยส่งเสริมให้การเกิดออกซิเดชันมีความสมบูรณ์และทั่วถึงมากขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ G_EO ที่มีคุณภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับ GO โดยแผ่นกราฟีนออกไซด์ของ G_EO นั้นมีความอิสระมากขึ้น ดังเห็นได้จากการเลื่อนของพีคระนาบผลึก (002) ไปที่ตำแหน่ง 9.4 ° ซึ่งสอดคล้องกับ d_{002} ที่ 9.45 นาโนเมตร

เทคนิค FTIR ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวอย่างกราไฟต์ที่หลุดลอก (G_E) เมื่อผ่านกระบวนการ Hummer's และได้กราฟีนออกไซด์ (G_EO) เป็นผลิตภัณฑ์ โดย FTIR สเปกตราของตัวอย่าง G_E และ G_EO แสดงเทียบกันแสดงดัง Fig. 4 จากผลการทดลองพบว่า FTIR สเปกตรัมของ G_EO นั้นปรากฏพีคการดูดกลืน อันได้แก่ การสั่นแบบยืด (stretching) ของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ที่ 3,439 cm^{-1}, การสั่นแบบยืดของพันธะ C=O ของหมู่คาร์บอนิล ที่ 1730 cm^{-1}, การสั่นแบบยืดของพันธะ C=C ที่ 1630 cm^{-1}, การสั่นของพันธะ C-O ของหมู่อีพอกไซด์ ที่ 1200 cm^{-1}, และการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O-C ที่ 1055 cm^{-1} ซึ่งการดูดกลืนเหล่านั้นสามารถยืนยันการเกิดหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนชนิดต่างๆ เช่น คาร์บอนิล อีพอกซี และไฮดรอกซิล เป็นต้น (Zhang et al., 2018) บนแผ่นกราไฟต์ที่หลุดลอกเมื่อผ่านกระบวนการออกซิเดชันและได้กราฟีนออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ โดยพีคดังกล่าวนั้นมีความเข้มต่ำหรือไม่ปรากฏเลยในตัวอย่าง G_E ซึ่งเป็นสารตั้งต้น สอดคล้องกับผลการขยายระยะห่างระหว่างระนาบที่กว้างขึ้นเนื่องจากมีการแทรกตัวของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค XRD

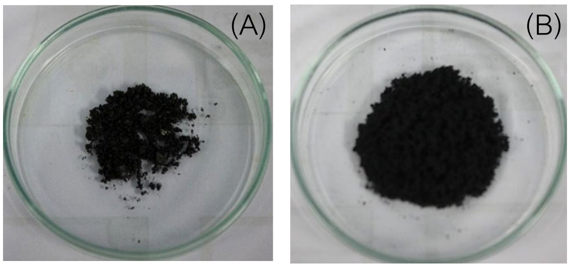


Fig. 1 (A) Physical characteristics of graphite; and (B) thermal expansion of the exfoliated graphite after arc discharge

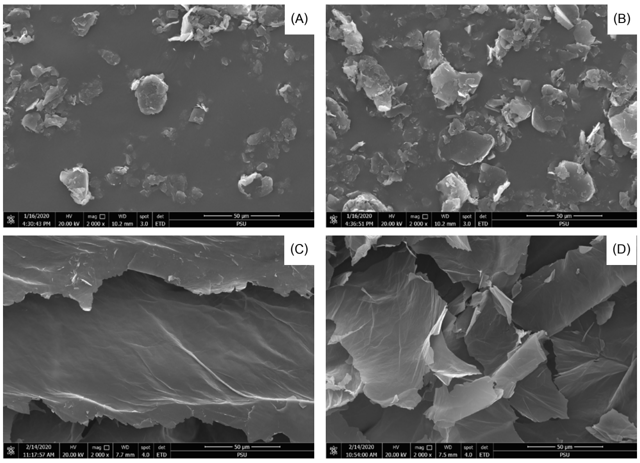


Fig. 2 SEM micrographs at 2,000 magnification of (A) graphite, (B) exfoliated graphite, and graphene oxide; (C) from graphite; and (D) from exfoliated graphite. The scale bar is 50 μm

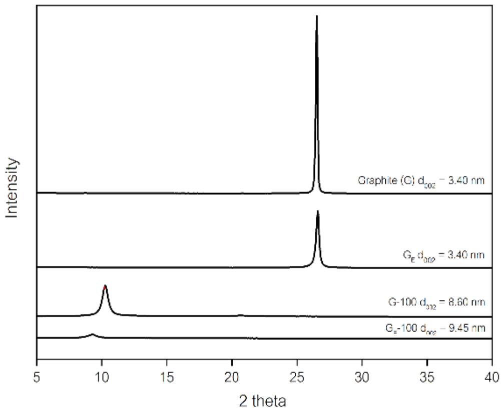


Fig. 3 X-Ray diffraction patterns of graphite (G), exfoliated graphite (G_E), graphene oxide from graphite (GO) and graphene oxide from exfoliated graphite (G_EO)

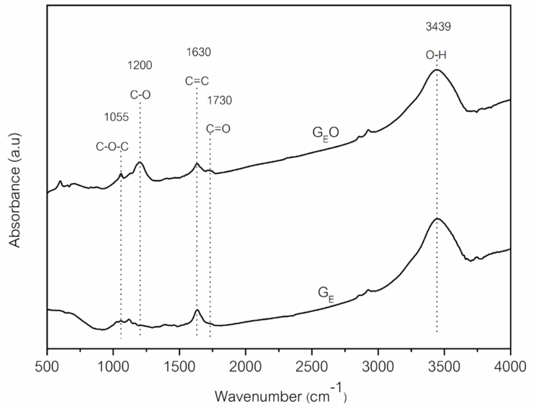


Fig. 4 ATR-FTIR spectra of exfoliated graphite (G_E) and graphene oxide from exfoliated graphite (G_EO)

อนุภาคนาโนคอมพอสิตไทเทเนียมไดออกไซด์เจือกราฟีนออกไซด์

เมื่อทดลองนำตัวอย่างกราฟีนออกไซด์ GO และ G_EO ไปคอมพอสิตกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าได้ผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกัน โดยมีลักษณะเป็นผงเนื้อละเอียดสีเทาร่วนๆ เมื่อนำตัวอย่างนาโนคอมพอสิต TiO_2/GO และ TiO_2/G_EO ไปทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม MB ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์จำลอง เป็นเวลา 120 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับของ TiO_2 บริสุทธิ์ แสดงดัง Fig. 5 โดยประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างนาโนคอมพอสิตนั้นเป็นผลมาจากการเจือกราฟีนออกไซด์ซึ่งมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี จึงช่วยลดการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอน (e^-) และหลุมอิเล็กตรอน (h^+) ของไทเทเนียม ดังนั้นคุณภาพและความสมบูรณ์ของแผ่นกราฟีนออกไซด์จึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวอย่างนาโนคอมพอสิตดังกล่าว โดยอนุภาคนาโนคอมพอสิตที่มีแผ่นกราฟีนออกไซด์คุณภาพดีกว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 ได้ดีกว่าเช่นกัน จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่าง TiO_2/G_EO นั้นแสดงประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม MB ภายใต้แสงอาทิตย์จำลองได้ดีที่สุด โดยย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในเวลาเพียง 90 นาที ซึ่งสูงกว่าของ TiO_2/GO และ TiO_2 บริสุทธิ์ ซึ่งใช้เวลา 105 และ 120 นาที ตามลำดับ

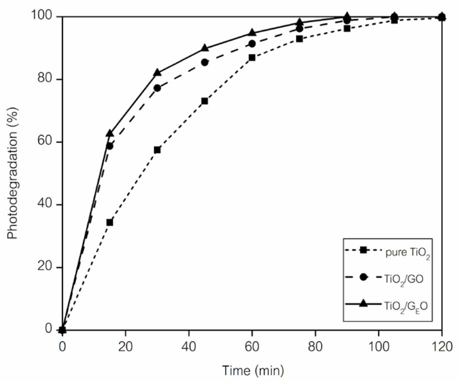


Fig. 5 The photocatalytic degradation under UV-Vis light irradiation of methylene blue of pure TiO_2 and graphene oxide decorated TiO_2 (TiO_2/GO and TiO_2/G_EO) nanocomposites

สรุป

ผลการเตรียมกราไฟต์ที่หลุดลอกโดยใช้ H_2SO_4 ร่วมกับตัวออกซิไดซ์ที่แรงคือ $KMnO_4$ และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอย่างรวดเร็วด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธี Hummer's พบว่ากระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยใช้กราไฟต์ที่หลุดลอก (G_E) เป็นสารตั้งต้นแทนกราไฟต์นั้นช่วยส่งเสริมให้การเกิดออกซิเดชันมีความสมบูรณ์และทั่วถึงมากขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กราฟีนออกไซด์ที่มีคุณภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์จากกราไฟต์ดั้งเดิม โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าการใช้ G_E เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสามารถขยายระนาบของชั้นคาร์บอนได้มากขึ้น โดยตัวอย่าง G_EO มีค่าระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 9.45 นาโนเมตร ขณะที่ตัวอย่าง GO ซึ่งเตรียมจากกราไฟต์ดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 8.61 นาโนเมตร ซึ่งบ่งชี้ถึงการแยกตัวออกและความอิสระของแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ความสมบูรณ์ของผลึกกราไฟต์ลดลง และเมื่อนำตัวอย่าง GO และ G_EO ไปคอมพอสิตกับ TiO_2 ด้วยวิธี solvothermal เพื่อพัฒนาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/GO และ TiO_2/G_EO พบว่าการเจือ กราฟีนออกไซด์นั้นช่วยปรับปรุงสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2ให้ดีขึ้น โดยตัวอย่าง TiO_2/G_EO มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบูลได้อย่างสมบูรณ์ ในเวลาเพียง 90 นาที ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์จำลอง ซึ่งเร็วกว่าของตัวอย่าง TiO_2/GO และ TiO_2 บริสุทธิ์ ซึ่งใช้เวลา 105 และ 120 นาที ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ SIT6201045S และ SCI6305091b ทุนโครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอก ระหว่าง วว. กับสถาบันการศึกษา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ทุนบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาโทจากศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2563 จากบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2563 จากบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

เอกสารอ้างอิง

Ambrosi, A., Cardozo, N.S.M., Tessaro, I.C. 2014. Membrane separation processes for the beer industry: A review and state of the art. Food bioprocess Technol. 7 (4): 921–936. Springer.

Anderson, S.H., Chung, D.D.L. 1984. Exfoliation of intercalated graphite. Carbon 22(3): 253–263.

Geng, Y., Zheng, Q., Kim, J.-K. 2011. Effects of stage, intercalant species and expansion technique on exfoliation of

graphite intercalation compound into graphene sheets. J. Nanosci. Nanotechnol. 11(2): 1084–1091. American Scientific Publishers.

Liu, D. F., Liangb, J.Z. 2014. Preparation of expandable graphite by ozone oxidation method. Adv. Mater. Res. 18(4): 483–488. doi.org/10.1007/s10965-010-9440-2

Martins, P.M., Ferreira, C.G., Silva, A.R., Magalhães, B., Alves, M.M., Pereira, L., Marques, P., Melle-Franco, M., Lanceros-Méndez, S. 2018. TiO_2/graphene and TiO_2/graphene oxide nanocomposites for photocatalytic applications: A computer modeling and experimental study. Compos. Part B Eng. 145: 39–46.

Pala, A., Tokat, E. 2002. Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives. Water Res. 36(11): 2920–2925.

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., Nigam, P. 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresour. Technol. 77(3): 247–255.

Saidaminov, M.I., Maksimova, N.V., Sorokina, N.E., Avdeev, V.V. 2013. Effect of graphite nitrate exfoliation conditions on the released gas composition and properties of exfoliated graphite. Inorg. Mater. 49(9): 883–888.

Suktha, P., Chiochan, P., Krittayavathananon, A., Sarawutanukul, S., Sethuraman, S., Sawangphruk, M. 2019. *In situ* mass change and gas analysis of 3D manganese oxide- graphene. RSC Adv. 9: 28569–28575. doi.org/10.1039/C9RA05444H

Hummers, W.S., Rochard, O.E. 1958. Preparation of graphitic oxide. J. Am. Chem. Soc. 80(6): 1339. doi.org/10.1021/ja01539a017

Zhang, H., Wang, X., Li, N., Xia, J., Meng, Q., Ding, J., Lu, J. 2018. Synthesis and characterization of TiO_2/graphene oxide nanocomposites for photoreduction of heavy metal ions in reverse osmosis concentrate. RSC Adv. 8(60): 34241–34251.

การคัดแยกแบคทีเรียชอบเกลือจากอาหารหมักพื้นบ้านของไทยและคุณสมบัติโพรไบโอติก

Screening of halophilic bacteria isolated from Thai traditional fermented foods and their probiotic properties

สาวิตรี ดือราแม[a,*], **ซาฟียะห์ สะอะ**[b], **พัทธินันท์ วาริชนันท์**[b]

Sawitree Dueramae[a,*], Safiah Saah[b], Patthinan Varichanan[b]

[a]สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

[b]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Division of Biological Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, Thailand

[b]Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail: sawitree.d@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้คัดแยกแบคทีเรียชอบเกลือที่มีคุณสมบัติโพรไบโอติกจากอาหารหมักพื้นบ้านของไทยในจังหวัดนราธิวาส สตูล สมุทรสงคราม กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ตาก ลำพูน และลำปาง จำนวน 30 ตัวอย่าง โดยแยกเชื้อแบคทีเรียชอบเกลือได้จำนวน 117 ไอโซเลต นำมาทดสอบการผลิตกรดบนอาหาร MRS พบว่า มีเชื้อจำนวน 91 ไอโซเลต จากนั้นศึกษาคุณสมบัติโพรไบโอติกโดยทดสอบความทนกรด และเกลือน้ำดี พบว่า เชื้อสามารถทนกรด และเกลือน้ำดีได้จำนวน 34 และ 12 ไอโซเลต ตามลำดับ และทดสอบความไวต่อยาปฏิชีวนะด้วยวิธี Disc diffusion พบว่า ทุกไอโซเลตไวต่อยา penicillin G, amoxicillin, chloramphenicol, erythromycin และ tetracycline แต่ดื้อต่อยา gentamicin และทดสอบการยับยั้งเชื้อก่อโรคด้วยวิธี Agar well diffusion พบว่า มีเชื้อจำนวน 4 ไอโซเลต ได้แก่ HFMAW-03, HFMG-02, HCM-02-2 และ HCM-03-2 สามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus, B. cereus, E. coli*, *S. typhimurium* และ *L. casei* ได้ และจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียด้วย 16s rRNA พบว่า HFMAW-03, HFMG-02, HCM-02-2 และ HCM-03-2 ใกล้เคียงเชื้อ *Staphylococcus cohnii*, *S. pasteuri*, *S. saprophyticus* และ *S. Saprophyticus* ตามลำดับ ดังนั้น จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นกล้าเชื้อหรือส่วนประกอบอาหารเชิงฟังก์ชั่น (functional ingredient) สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารโดยเฉพาะอาหารหมักดองที่มีเกลือเป็นองค์ประกอบได้ต่อไป

คำสำคัญ: แบคทีเรียชอบเกลือ, คุณสมบัติโพรไบโอติก, อาหารหมัก

Abstract

In this study, thirty samples of traditionally fermented Thai foods from Narathiwat, Satun, Samut Songkhram, Bangkok, Chiang Mai, Tak, Lamphun, and Lampang provinces were screened for halophilic bacteria with potential probiotic properties. A total of 117 isolates were isolated from the samples. The results demonstrated that the ninety-one isolates could produce acids on MRS agar. Potential probiotic isolates were evaluated for both acid- and bile-salt tolerance. Only 34 isolates were acidic, and 12 isolates were resistant to bile-salt conditions. All isolates were susceptible to penicillin G, amoxicillin, chloramphenicol, erythromycin, and tetracycline but resistant to gentamicin, as determined by the disc diffusion method. In addition, the agar well diffusion method revealed that four isolates have broad-spectrum antibacterial activity against *S. aureus, B. cereus, E. coli*, *S. typhimurium*, and *L. casei*. The isolate HFMAW-03, HFMG-02, HCM-02-2 and HCM-03-2 were identified as *Staphylococcus cohnii*, *S. pasteuri*, *S. saprophyticus* and *S. Saprophyticus*, respectively. Therefore, the isolate with probiotic properties is excellent for functional food ingredient application in food products, especially, salty fermented foods.

Keywords: Halophilic bacteria, Probiotic properties, Fermented food

คำนำ

ผลิตภัณฑ์อาหารหมักในประเทศไทยมีมากมายหลายชนิด และเป็นอาหารที่เกิดจากภูมิปัญญาที่มีมาตั้งแต่โบราณของแต่ละท้องถิ่นตกทอดจากรุ่นสู่รุ่น เมื่อวัตถุดิบผ่านกรรมวิธีการหมักทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีอายุการเก็บรักษานานและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (สุพรรณี, 2556) โดยในสองทศวรรษที่ผ่านมานักวิจัยให้ความสำคัญกับจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการผลิตอาหารหมักเป็นอย่างมาก จนนำไปสู่การประยุกต์ใช้กล้าเชื้อแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆเพื่อปรับปรุงคุณภาพ (Yongsmith and Malaphan, 2016) ซึ่งหนึ่งในจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในอาหารหมัก คือ แบคทีเรียชอบเกลือ (Halophilic bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งที่มีบทบาทอย่างยิ่งในอาหารหมักดองที่มีเกลือสูง เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีความสามารถในการเจริญได้ดีในสภาวะที่มีเกลือสูงตั้งแต่ 1.5 ถึง 5.8 โมลาร์ (Fariq and Yasmin, 2020) อีกทั้งยังมีความสามารถในการผลิตสารต่างๆและเอนไซม์หลายชนิดที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร อาทิเช่น เอนไซม์โปรติเอส (protease) ไลเปส (lipase) อะไมเลส (amylase) ดีเอนเอส (Dnase) และนิวคลีเอส (nuclease) (Rohnban *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตามพบว่า ยังไม่มีการศึกษาถึงคุณสมบัติโพรไบโอติกในกลุ่มแบคทีเรียชอบเกลือ เนื่องจากในปัจจุบันอาหารเพื่อสุขภาพกำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติโพรไบติก ซึ่งจัดเป็นจุลินทรีย์ที่มีความปลอดภัยและไม่มีผลข้างเคียงใด ๆ ต่อผู้บริโภค สามารถสังเคราะห์วิตามินบี มีฤทธิ์ต้านโรคอ้วน และมีความสามารถในการลดคอเลสเตอรอล ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาแบคทีเรียชอบเกลือที่มีคุณสมบัติโพรไบโอติกสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การเป็นส่วนประกอบเชิงฟังก์ชั่น การผลิตอาหารหมัก การผลิตสารให้กลิ่นรส หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพที่มีคุณค่าสูงต่อไปในอนาคต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกเชื้อแบคทีเรียชอบเกลือที่มีคุณสมบัติโพรไบโอติกจากอาหารหมักพื้นบ้านของไทย และจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียที่คัดเลือกได้ด้วยลักษณะทางฟีโนไทป์และลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยวิธี 16S rRNA sequencing

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การคัดแยกแบคทีเรียชอบเกลือจากผลิตภัณฑ์อาหารหมัก

ทำการแยกเชื้อแบคทีเรียชอบเกลือจากตัวอย่างอาหารหมักของไทย 30 ตัวอย่างจากที่วางจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดของประเทศไทย นำตัวอย่าง 1 กรัม ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Sehgal and Gibbons Complex (SGC) broth ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 % และปรับพีเอชเป็น 7.2 ปริมาณ 9 มิลลิลิตร บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-7 วัน เพื่อนำมา spread plate ลงบน SGC agar บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-7 วัน และเขี่ยเชื้อแบคทีเรียที่มีลักษณะแตกต่างกันในแต่ละจานอาหารเลี้ยงเชื้อมาทำให้เชื้อบริสุทธิ์และเก็บไว้ศึกษาต่อไป

การทดสอบการผลิตกรด (Acid resistance)

นำเชื้อจากตู้เก็บเชื้อจุลินทรีย์ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ -20 องศาเซลเซียส มาเพาะเลี้ยงใน SGC agar ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต และปรับพีเอชเป็น 7.2 ปริมาณ 9 มิลลิลิตร บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-7 วัน โดยเขี่ยโคโลนีเดี่ยวลง MRS agar ที่เติม $CaCO_3$ และ 20% glucose และ

เติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต จากนั้นทำการ spot เชื้อบริสุทธิ์ที่แยกได้ บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารเลี้ยงเชื้อ และทำการวัดขนาดวงใสรอบโคโลนี

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นโพรไบโอติก

การเตรียมเชื้อแบคทีเรีย

นำเชื้อจากตู้เก็บเชื้อจุลินทรีย์ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ -20 องศาเซลเซียส มาเพาะเลี้ยงใน MRS broth ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต บ่มใน candle jar ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เซลล์แขวนลอยอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.85% (w/v) โดยปรับเซลล์เชื้อเริ่มต้นด้วย 0.5 McFarland standard ให้อยู่ในช่วง 1.5×10^8 CFU/ml เพื่อนำไปใช้ศึกษาต่อไป

การทดสอบการทนต่อกรด (Acid tolerance test)

นำเชื้อที่เตรียมได้ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ใส่ใน MRS broth ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต และปรับค่า pH เริ่มต้นเป็น 4 ที่มีปริมาตร 5 มิลลิลิตรในหลอดทดลอง บ่มใน Candle jar ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตรวจนับปริมาณเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี spread plate ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 0 และ 24 ชั่วโมง บน MRS agar ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต

การทดสอบการทนต่อสภาวะของเกลือน้ำดี (Bile tolerance test)

นำเชื้อที่เตรียมได้ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ใส่ใน MRS broth ที่มีกาที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต และเติม Bile salt (Oxgal, Fluka) ปริมาณ 0.5% (w/v) ที่มีปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปบ่มใน candle jar อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตรวจนับปริมาณเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี spread plate ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 0 และ 24 ชั่วโมง บน MRS agar ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต

การทดสอบความไวต่อยาปฏิชีวนะ โดยวิธี Disc diffusion method

นำเชื้อแต่ละไอโซเลตที่เตรียมไว้ ปริมาตร 500 ไมโครลิตร นำมา swab ลงอาหารเลี้ยงเชื้อ SGC agar ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของแต่ละไอโซเลต จากนั้นวาง Antibiotic disc : penicillin G, amoxicillin, gentamicin, chloramphenicol, erythromycin, และ tetracycline บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเชื้อ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 1 วัน สังเกตการเกิดการยับยั้งเป็นวงใสและวัดขนาด inhibition zone

การศึกษาคุณสมบัติในการยับยั้งชื้อก่อโรคด้วยวิธี Agar well diffusion

เชื้อก่อโรคที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย แบคทีเรียแกรมบวก 2 สายพันธุ์ ได้แก่ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus cereus* ATCC 11778 และแบคทีเรียแกรมลบ 2 สายพันธุ์ ได้แก่ *Escherichia coli* ATCC 25922 และ *Salmonella typhimurium* ATCC 13311 และแบคทีเรียแลคติก 1 สายพันธุ์ ได้แก่ *Lactobacillus casei* TISTR 1463

ทำการเพาะเลี้ยงเชื้อก่อโรคและแบคทีเรียแลคติกลงในอาหาร Tryptic soy broth (TSB) และ MRS broth ตามลำดับ เตรียมแบคทีเรียชอบเกลือที่คัดเลือกได้โดยทำการเพาะเลี้ยงในอาหาร MRS broth ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการเจริญของแต่ละไอโซเลต ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็น

เวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นทำการถ่ายเชื้อแบคทีเรียก่อโรคลงในน้ำเกลือ 0.85 % ให้ได้ความขุ่นเท่ากับ 0.5 McFarland จากนั้นใช้ไม้พันสำลีเกลี่ยลงบนอาหารแข็งที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์แต่ละสายพันธุ์ จากนั้นนำมาเจาะหลุมด้วยปลายของ sterile pasteur pipette และทำการปิเปตเชื้อแบคทีเรียชอบเกลือใส่ลงไปในหลุม 70 ไมโครลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-7 วัน นำจานอาหารเพาะเชื้อที่ทำการทดสอบและบ่มแล้ว มาทำการวัดและบันทึกผลขนาด Zone of Inhibition (ZOI)

การพิสูจนเอกลักษณ์ของแบคทีเรียชอบเกลือโดยอาศัยลักษณะทางฟีโนไทป์

นำแบคทีเรียชอบเกลือที่คัดเลือกได้ มาเทียบเคียงหรือระบุหาชนิดของแบคทีเรีย ตามวิธีของ Bergey's Manual of Systermatic Bacteriology โดยศึกษาลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา เช่น การติดสีแกรม รูปร่างลักษณะ และสีของโคโลนี และศึกษาลักษณะทางชีวเคมี เช่น การใช้ซิเตรทเป็นแหล่งคาร์บอน การสร้างเอนไซม์ยูรีเอส การรีดิวซ์ในเตรท การทดสอบ O-F test และความสามารถในการหมักคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น

การจัดเทียบเคียงชนิดของแบคทีเรียด้วยวิธีการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทป์ยีน 16S rRNA sequencing และการวิเคราะห์สายวิวัฒนาการ (phylogenetic analysis)

ทำการสกัดดีเอนเอ เพิ่มปริมาณ 16S rRNA gene ด้วยเทคนิค PCR (polymerase chainreaction) และหาลำดับเบสของ 16S rRNA ด้วยเครื่องหาลำดับเบสอัตโนมัติ โดยใช้ Primers 27 F (5’ –AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3’) และ 1492R (5’-TACGGYTACCTTACGACTT-3’) นำข้อมูลลำดับเบสของแบคทีเรียที่แยกได้มาหาเปอร์เซ็นต์ความคล้ายคลึง (% similarity) โดยเปรียบเทียบความเหมือนกับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล GeneBank โดยใช้โปรแกรม BLAST เปรียบเทียบที่ http://www.ncbi.nlm.nih.gov

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การคัดแยกแบคทีเรียชอบเกลือจากผลิตภัณฑ์อาหารหมักและการทดสอบการผลิตกรด

ผลิตภัณฑ์อาหารหมักของไทยจำนวน 30 ตัวอย่าง ได้เก็บตัวอย่างจากจังหวัดนราธิวาส สตูล สมุทรสงคราม กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ตาก ลำพูน และลำปาง ซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วง 3.30–7.72 และมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันตามชนิดของตัวอย่างอาหารหมัก โดยจากการคัดแยกเชื้อจากตัวอย่างอาหารหมักโดยวิธี spread plate ลงบนอาหาร SGC agar ที่มีการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้น 0%, 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% (w/v) พบว่า สามารถคัดแยกเชื้อได้จำนวน 117 ไอโซเลต ซึ่งแต่ละไอโซเลตมีลักษณะโคโลนีและความสามารถในการเจริญที่ความเข้มข้นเกลือ NaCl ต่าง ๆ โดยเชื้อที่สามารถเจริญได้ที่ 5%, 10%, 15% และ 20% (w/v) จำนวน 35, 31, 11 และ 2 ไอโซเลต และเชื้อสามารถเจริญได้บนอาหารไม่มีการเติมเกลือ จำนวน 38 ไอโซเลต ในขณะที่อาหารที่มีการเติมเกลือ 25 % (w/v) ไม่พบการเจริญของเชื้อ (ดังแสดงใน Fig. 1) จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในอาหารหมักส่วนใหญ่ คือแบคทีเรียที่ไม่ชอบเกลือ(Non-halophilic) แบคทีเรียชอบเกลือเล็กน้อย (Slight halophilic) แบคทีเรียชอบเกลือปานกลาง (Moderate halophilic) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของอำพรรณ และคณะ (2558) ที่คัดแยกแบคทีเรียชอบเกลือจากปลาร้าจากตลาดในจังหวัดนนทบุรี กรุงเทพมหานคร พะเยา และเชียงราย พบว่า ไอโซเลตที่แยกได้สามารถเจริญได้ในในความ

เข้มข้นเกลือ NaCl 0–20% (w/v) โดยมี 11 ไอโซเลตที่จัดเป็นพวกชอบเกลือสูง และมี 1 ไอโซเลตที่จัดเป็นพวกชอบเกลือปานกลาง

จากนั้นทำการทดสอบการผลิตกรดของแบคทีเรียที่คัดแยกได้โดยนำมา spot ลง บน MRS agar ที่เติม $CaCO_3$ และ 20% glucose พบว่า เชื้อที่สามารถผลิตกรดได้ จำนวน 91 ไอโซเลต โดยตัวอย่างอาหารหมักหมูส้มมูเซอสามารถพบไอโซเลตที่สามารถสร้างได้กรดมากที่สุด คือ ไอโซเลต TA-05 โดยให้ค่าประสิทธิภาพของขนาดวงใสต่อโคโลนีเท่ากับ 9.31 ซึ่งการผลิตกรดเป็นสารเมแทบอไลต์ชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสภาพของอาหารหมัก ทำให้มีกลิ่นรสที่ดี และช่วยทำให้อาหารหมักสามารถเก็บไว้ได้นานยิ่งขึ้น

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นโพรไบโอติก

การทดสอบการทนต่อกรดและเกลือน้ำดี Bile salt และความไวต่อยาปฏิชีวนะ

หลังจากเตรียมเชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกได้สำหรับทดสอบคุณสมบัติโพรไบโอติก โดยเพาะเลี้ยงใน MRS broth บ่มใน candle jar เป็นเวลา 48 ชั่วโมงแล้วนำไปทดสอบการทนต่อกรด โดยเพาะเลี้ยงใน MRS brothที่ปรับ pH เริ่มต้นเป็น 4 และตรวจนับปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่เวลา 0 และ 24 ชั่วโมง พบว่า เชื้อที่สามารถทนกรดที่ pH 4 ได้จำนวน 34 ไอโซเลต และเมื่อนำเชื้อที่ทนกรดได้มาทดสอบความสามารถในการทนต่อสภาวะเกลือน้ำดี โดยเพาะเลี้ยงใน MRS broth ที่เติม 0.5 % (w/v) Bile salt และตรวจนับปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่เวลา 0 และ 24 ชั่วโมง พบว่า เชื้อที่สามารถทนต่อสภาวะเกลือน้ำดีได้ จำนวน 12 ไอโซเลต ซึ่งจากการทดสอบนี้ พบว่า เชื้อแบคทีเรียชอบเกลือที่มีคุณสมบัติทนต่อกรดและสภาวะเกลือน้ำดีมีจำนวน 9 ไอโซเลต โดยแบคทีเรียชอบเกลือที่สามารถทนทานต่อกรดและสภาวะเกลือน้ำดีได้ เนื่องจากมีกลไกป้องกันกรดไม่ให้แพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้าเคมี และมีความสามารถในการไฮโดรไลซ์เกลือน้ำดีด้วยเอนไซม์ไฮโดรเลส ส่งผลให้ฤทธิ์ของเกลือน้ำดีอ่อนลงทำให้ไม่เกิดการทำลายชั้นไขมันและกรดไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ (Swetwiwathana and Visessanguan, 2015)

นำเชื้อที่ผ่านการทดสอบดังกล่าวมาทดสอบความไวต่อยาปฏิชีวนะ โดยวิธี Disc diffusion method พบว่า เชื้อทุกไอโซเลตมีความไวต่อยา penicillin G, amoxicillin, chloramphenicol, erythromycin และ t9etracycline แต่เชื้อทุกไอโซเลตเกิดการดื้อต่อยา gentamicin ดังแสดงใน Table 1 ดังนั้น ความไวต่อยาปฏิชีวนะก็เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สามารถบ่งบอกได้ว่า แบคทีเรียชอบเกลือดังกล่าวมีความเป็นโพรไบโอติก ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Liu *et al.* (2009) ที่ได้ทดสอบความไวต่อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติโพรไบโอติกจากผลิตภัณฑ์นมหมักและสารเติมแต่งยาในประเทศจีน พบว่า เชื้อทั้งหมดที่คัดแยกได้มีความไวต่อยา chloramphenicol, tetracycline, ampicillin, amoxicillin/clavulanic acid, cephalothin และ imipenem แต่ดื้อต่อยา ciprofloxacin, amikacin, trimethoprim/sulphamethoxazole และ gentamycin โดยการดื้อยาของแบคทีเรียชอบเกลือเกิดจากพลาสมิดที่มียีนดื้อยาและสามารถขับยาออก (efflux pump) ซึ่งถือเป็นกลไกที่ทำให้แบคทีเรียต้านทานยาปฏิชีวนะได้ (Shinde and Thombre, 2016)

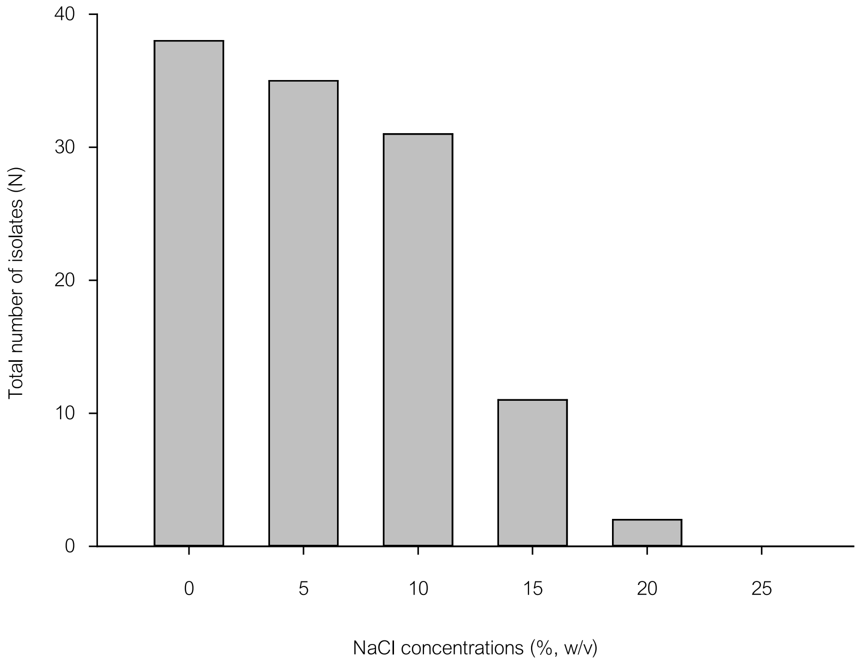


Fig. 1 Total number of isolates (N) on SGC agar with various salt concentrations in the agar based on the standard values used to define halophiles: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% (w/v)

Table 1 Antibiotic susceptibility of selected isolates

Isolates	Fermented foods	Inhibition zones (mm.)					
		Penicillin G	Amoxicillin	Gentamicin	Chloramphenicol	Erythromycin	Tetracycline
HFMAW-03	Fermented rice (nham)	37.74	32.88	-	24.06	24.12	19.22
HFMG-02	Pickled mustard	8.64	10.54	-	24.70	22.86	15.10
HCM-01-2	Meang	11.76	13.60	-	27.40	27.46	18.88
HCM-02-2	Pla-som	25.76	27.50	-	25.20	24.36	14.60
HCM-03-2	Pickled mustard	9.30	11.34	-	25.70	25.52	15.26
HCM-06-2	Pickled mustard doi	25.80	28.36	-	26.82	20.86	19.22
HTA-01-5	Kimsung pickled bamboo shoots	32.10	30.26	-	26.08	24.04	17.40
HTA-04-6	Muser meang	24.88	24.90	-	24.62	22.44	17.10
HLPH-02-3	Pickled bamboo shoots	9.40	10.50	-	26.50	21.84	15.38

การศึกษาคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อก่อโรคด้วยวิธี Agar well diffusion

จากการทดสอบการยับยั้งเชื้อก่อโรคด้วยวิธี Agar well diffusion โดยนำเชื้อแบคทีเรียชอบเกลือที่มีคุณสมบัติโพรไบโอติกมาทดสอบกับเชื้อก่อโรค พบว่า มีเชื้อ 4 ไอโซเลตที่สามารถยับยั้งเชื้อก่อโรคได้ทุกสายพันธุ์ คือ HFMAW-03 (แยกได้จากแหนมเห็ดข้าวกล้อง), HFMG-02 (ผักกาดดอง), HCM-02-2 (ปลาส้ม) และ HCM-03-2 (ผักกาดดอง) ดังแสดงใน Table 2 สอดคล้องกับการทดลองของ รัชนูและเสาวนิต (2562) ได้ศึกษาการยับยั้งเชื้อก่อโรคของ *Lactobacillus plantarum* BL60a ที่มีคุณสมบัติโพรไบโอติกที่แยกจากอาหารหมักในจังหวัดสุพรรณบุรี สมุทรสาคร และกรุงเทพมหานคร พบว่า เชื้อดังกล่าวสามารถยับยั้งเชื้อก่อโรคแกรมบวก (*Bacillus cereus*) และแกรมลบ (*Escherichia coli, Salmonella enterica* serovar *Typhi* และ *Pseudomonas aeruginosa*) ซึ่งเป็นผลมาจากที่แบคทีเรียมีความสามารถในการหลั่งเปปไทด์ต้านทานจุลชีพหรือแบคเทอริโอซินและสารเมแทบอไลต์อื่น ๆ ที่สามารถยับยั้งจุลชีพได้ และแบคเทอริโอซิน (Bacteriocins) จัดเป็นเปปไทด์ต้านจุลชีพที่สังเคราะห์ด้วยไรโบโซมของแบคทีเรียแกรมบวก สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ (Daba and Elkhateeb, 2020) ดังนั้น จึงนำแบคทีเรียทั้ง 4 ไอโซเลตมาทำการจัดจำแนกชนิดของไอโซเลตที่คัดเลือกได้ต่อไป

Table 2 Antimicrobial susceptibility of selected isolates

Isolates	Fermented foods	Inhibition zones (mm.)				
		Staphylococcus aureus ATCC 25923	*Escherichia coli* ATCC25922	*Lactobacillus casei* TISTR 1463	*Bacillus cereus* ATCC 11778	*Salmonella typhimurium* ATCC 13311
HFMAW-03	Fermented rice (nham)	13.59±0.83	13.67±0.50	24.30±3.13	26.31±1.43	13.94±0.19
HFMG-02	Pickled mustard	15.72±0.82	16.53±2.69	26.14±1.18	31.21±3.32	15.46±1.11
HCM-02-2	Pla-som	14.38±0.31	13.70±0.10	26.84±0.37	26.41±1.13	13.48±0.75
HCM-03-2	Pickled mustard	15.67±0.40	17.55±2.95	28.92±0.39	32.79±2.73	14.81±0.50

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแบคทีเรียชอบเกลือโดยอาศัยลักษณะทางฟีโนไทป์ และการจัดเทียบเคียงชนิดของแบคทีเรียด้วยวิธีการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทป์ที่ยีน 16S rRNA(sequencing)

จากการศึกษาลักษณะทางฟีโนไทป์และการเทียบเคียงชนิดของแบคทีเรีย พบว่า HFMAW-03 ที่แยกได้จากแหนมเห็ดข้าวกล้อง สามารถเจริญในความเข้มข้นเกลือ NaCl 10% (w/v) โคโลนีมีสีครีม ขอบเรียบ ติดสีแกรมบวก รูปร่างกลม (ดังแสดงใน Fig.2a, b) ไม่สร้างเอนไซม์ยูรีเอส ไม่สามารถใช้ซิเตรทเป็นแหล่งคาร์บอนได้ ไม่สามารถรีดิวซ์ไนเตรทเป็นไนไตร์ท หมักน้ำตาลได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ได้แก่ กลูโคส ฟรุกโตส และมอลโทส ในขณะที่ไอโซเลต โดยแบคทีเรียทั้ง 4 ไอโซเลตนี้สามารถเจริญได้ดีในอาหารที่มีเกลือ NaCl ความเข้มข้น 10% (w/v) จึงจัดเป็น

แบคทีเรียชอบเกลือปานกลาง เมื่อนำไปเทียบเคียงชนิดของแบคทีเรียด้วยวิธี 16s rRNA พบว่า HFMAW-03 (แหนมเห็ดข้าวกล้อง) คือ เชื้อ *Staphylococcus cohnii* ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Ouoba et al. (2019) ที่ได้แยกสายพันธุ์ *Staphylococcus cohnii* จาก Bikalga, Ntoba Mbodi และ Soumbala ซึ่งเป็นอาหารหมักของแอฟริกา และเป็นแบคทีเรียที่พบได้มากที่สุดในไส้กรอกหมัก เนื่องจากมีความสามารถในการย่อยโปรตีน ไขมัน และสามารถผลิตสารต้านจุลชีพ ในขณะที่ไอโซเลต HFMG-02 (ผักกาดดอง), HCM-02-2 (ปลาส้ม) และ HCM-03-2 (ผักกาดดอง) มีความใกล้เคียงกับเชื้อ *S. pasteuri*, *S. saprophyticus* และ *S. Saprophyticus* ตามลำดับ เช่นเดียวกับการทดลองของ Aka-Gbeza et al. (2017) ที่ได้คัดแยกแบคทีเรีย *S. pasteuri* จาก Anango baca slurry ซึ่งเป็นอาหารหมักจากข้าวโพดของสาธารณรัฐโกตดิวัวร์ โดยพบว่าเป็นแบคทีเรียที่สร้างแบคเทอริโอซิน และสามารถยับยั้ง *S. aureus* และ *Listeria monocytogenes* ได้ จากการศึกษาของ Ouoba et al. (2019) แบคทีเรียในอาหารหมักที่แยกได้พบ *S. saprophyticus* ประมาณ 1.1% ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่สามารถย่อยสลายโปรตีน ไขมัน และรีดิวซ์ไนไตรต์ ทำให้เกิดสารประกอบ เช่น เปปไทด์ กรดอะมิโน คาร์บอนิล และสารระเหยที่มีประโยชน์ต่อคุณภาพทางโภชนาการ และช่วยให้กลิ่นรสที่ดีในผลิตภัณฑ์อาหารหมักจากเนื้อสัตว์

อย่างไรก็ตาม ไอโซเลตที่คัดแยกได้ในครั้งนี้ควรมีการศึกษาคุณสมบัติการเป็นจุลินทรีย์โพรไบโอติกเพิ่มเติม เช่น ความสามารถในการเกาะติดกับเยื่อมูก หรือเซลล์ผิวเยื่อบุของมนุษย์ หรือเซลล์ไลน์ (Adherence to mucus and/or human epithelial cells and cell line) และฤทธิ์ของเอนไซม์ไฮโดรเลสในการย่อยเกลือน้ำดี (Bile salt hydrolase activity) นอกจากนี้ ไอโซเลตที่แยกได้เป็นสายพันธุ์ที่ยังไม่ได้อยู่ในบัญชีรายชื่อเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นจุลินทรีย์โพรไบติกสำหรับใช้ในอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข จึงต้องมีการศึกษาการประเมินความปลอดภัยของจุลินทรีย์โพรไบโอติกต่อมนุษย์ทั้งแบบ in vitro และ in vivo เช่น การสร้างสารพิษ (Toxin) การดื้อต่อสารปฏิชีวนะ ฤทธิ์ทางฮีโมไลติก และการประเมินผลข้างเคียงระหว่างการศึกษาในมนุษย์ เป็นต้น เพื่อประเมินความปลอดภัยและปฏิกิริยาของร่างกายต่อจุลินทรีย์โพรไบโอติกก่อนนำไปประยุกต์ใช้ในอาหาร

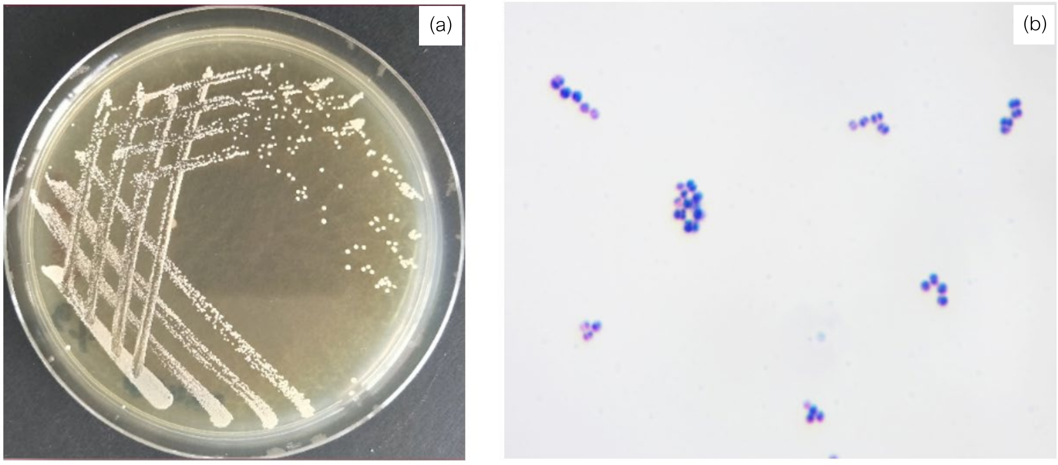


Fig. 2 (a) bacterial colony; and (b) Gram staining of selected isolate HFMAW-03

สรุป

จากการศึกษาแบคทีเรียชอบเกลือที่มีคุณสมบัติโพรไบโอติกที่ได้นั้นสามารถเจริญที่ความเข้มข้นเกลือ NaCl 10 % (w/v) ซึ่งจัดเป็นเชื้อชอบเกลือปานกลาง (moderately halophilic bacteria) และมีความสามารถในการผลิตกรด ทนต่อกรดและเกลือน้ำดี ไวต่อยาปฏิชีวนะ และสามารถยับยั้งเชื้อก่อโรคได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ ดังนั้น จึงควรมี

การศึกษาคุณสมบัติการเป็นจุลินทรีย์โพรไบโอติกเพิ่มเติมก่อนที่จะนำมาใช้เป็นกล้าเชื้อเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารโดยเฉพาะอาหารหมักดองที่มีเกลือเป็นองค์ประกอบต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

สุพรรณี เทพอรุณรัตน์. 2550. อาหารหมัก. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 55: 22–26.

รัชนู เมยดง, เสาวนิต ทองพิมพ์. 2562. การศึกษาคุณสมบัติโพรไบโอติกส์ของ *Lactobacillus plantarum* BL60a ที่แยกจากอาหารหมักเพื่อประยุกต์ใช้ในอาหารเพื่อสุขภาพ. Veridian E-journal. มหาวิทยาลัยศิลปากร. 6: 81–96.

อำพรรณ ชัยกุลเสรีวัฒน์, ชนิตา ชูพรม, อายูรีน มานะ. 2558. การคัดแยกแบคทีเรียชอบเค็มที่ผลิตเอนไซม์โปรติเอสจากปลาร้า. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 10: 1–8.

Aka-Gbeza, S., Konan, A.G., Cho, M., Achi, P., Koffi-nevry, R., Koussemon-Camara, M., Bonfoh, B. 2017. Screening of antimicrobial activity of lactic acid bacteria isolated from anango baca slurry, a spontaneously fermented maize product used in Côte d'Ivoire. Int. J. Biol. Chem. Sci. 11: 2616–2629.

Daba, G.M., Elkhateeb, W.A. 2020. Bacteriocins of lactic acid bacteria as biotechnological tools in food and pharmaceuticals: Current applications and future prospects. Biocatal. Agric. Biotechnol. 28.

Fariq, A., Yasmin, A. 2020. Production, characterization and bioactivities of biosurfactants from newly isolated strictly halophilic bacteria. Process Biochem. 98: 1–10.

Liu, C., Zhang, Z.Z., Dong, K., Yuan, J.P., Guo, X.K. 2009. Antibiotic resistance of probiotic strains of lactic acid bacteria isolated from marketed foods and drugs. Biomed. Environ. Sci. 22: 401–412.

Ouoba, L.I., Vouidibio Mbozo, A.B., Anyogu, A., Obioha, I.P., Lingani-Sawadogo, H., Sutherland, P.J., Jespersen, L., Ghoddusi, B.H. 2019. Environmental heterogeneity of *Staphylococcus* species from alkaline fermented foods and associated toxins and antimicrobial resistance genetic elements. Int. J. Food Microbiol. 311: 1–12.

Rohban, R., Amoozegar, M.A., Ventosa, A. 2009. Screening ans isolation of halophilic bacteria producing extracellar hydrolyses from Howz Soltan Lake, Iran. J Ind Microbiol Biotechnol. 36: 333–340.

Shinde, V.D., Thombre, R.S. 2016. Antibiotic resistance profiling of marine halophilic bacteria and haloarchaea. J. Appl. Pharm. Sci. 6: 132–137.

Swetwiwathana, A., Visessanguan, W. 2015. Potential of bacteriocin-producing lactic acid bacteria for safety improvements of traditional Thai fermented meat and human health. Meat Science 109: 101–105.

Yongsmith, B., Malaphan, W. 2016. Traditional Fermented Foods in Thailand. Traditional Foods 10: 31–59.

Identification of *Lactobacillus* spp. isolated from stool and colon biopsy tissues of Thai healthy elderly using MALDI-TOF mass spectrometry

Kittipoom Saichan[a,b,*], **Surapun Tepaamorndech**[b], **Teerasit Techawiwattanaboon**[b], **Kanitha Patarakul**[b]

[a]Master of Science Program in Medical Microbiology, Interdisciplinary Program in Medical Microbiology, Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

[b]Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: khet25399@gmail.com

Abstract

Probiotics are microorganisms that can colonize and live in the gastrointestinal tract and show beneficial effects on the host's health when consumed in enough amounts. We focused on the genus *Lactobacillus* because it is a well-known probiotic and has often been verified as safe. This study aimed to identify *Lactobacillus* spp.isolated from stool and colon biopsy tissues of Thai healthy elderly at the genus and/or species level before studying their properties. The MALDI-TOF MS results were validated by the 16S rRNA gene sequences. The confidence value for both techniques was mostly 99%. Among the isolates tested in this study, six of seventy-two isolates were misidentified by MALDI BioTyper due to the absence of reference spectra in the database. In addition, only two isolates with similar spectra of proteomics could not be identified at the species level. In summary, MALDI-TOF MS is a fast method to identify *Lactobacillus* accurately at the genus level. Therefore, it can be used for the initial identification of *Lactobacillus*.

Keywords: 16S rRNA gene sequencing, *Lactobacillus* spp., MALDI-TOF MS, Probiotics

Introduction

Probiotics are microorganisms that can colonize and live in the gastrointestinal tract and provide beneficial effects on the host's health when consumed in enough amounts. One of the probiotic actions is to maintain a balance of gut microbiota composition (Bengoa ,et al. 2020). Moreover, *in vitro* and *in vivo* studies found that probiotics contained various activities such as improving the barrier function of intestinal epithelial cells, moderating inflammation, and inhibiting the growth of bacterial pathogens (Kaewchomphunuch ,et al. 2022). Several lactic acid bacteria (LAB), particularly the genus *Lactobacillus*, are well-known probiotics. Probiotics have been isolated from a variety of sources, including healthy infant and adult feces (Khanna ,et al. 2020, Singh ,et al. 2020), and fermented foods (Jeong ,et al. 2021). The beneficial properties of probiotics are strain-specific and may be confined to certain ages, diseases, and races (Oh ,et al. 2018). To identify bacterial isolates at the genus and/or species level, various methods are available ranging from phenotypic tests, biochemical tests, and molecular techniques. Among genotypic methodologies, 16S rRNA gene sequencing is one of the most used methods. However, this method is rather expensive and time-consuming because multiple steps, including DNA extraction, specific target amplification, and DNA sequencing, are required before comparison to the reference sequences in databases. Therefore, new bacterial identification tools are needed to reduce time and cost.

Matrix-assisted laser desorption ionization-time of flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS) is a high throughput reliable technology used to identify and analyze target proteins. MALDI-TOF MS analysis of proteins from whole bacterial cells can be used to identify bacteria at the genus and/or species level. MALDI-TOF MS requires a few steps of sample preparation and rapid data acquisition, so it is faster than other methods such as biochemical tests and 16S rRNA gene sequencing (Nacef ,et al. 2017). Therefore, MALDI-TOF MS is an interesting alternative method for initial identification of bacteria. It has been utilized not only in clinical laboratory but also in other fields of microbiology including identification of probiotics such as *Lactobacillus* (Foschi ,et al. 2017). This study aimed to identify *Lactobacillus* spp. isolated from stool and colon biopsy tissues of Thai healthy elderly using MALDI-TOF MS.

Material and Methods

Bacterial isolation and culture conditions

The samples used in this study were obtained from the sample collection of our previous study (Iadsee ,et al. 2023) approved by the Ethics Committee for Human Research of the Faculty of Medicine, Chulalongkorn University (IRB No.182/62). *Lactobacillus* were isolated from the specimens (stool and colon biopsy tissues) obtained from Thai healthy elderly at King Chulalongkorn Memorial Hospital (n=22) whose colonoscopy results were negative for colon cancer screening. The specimens were stored at -80 °C in 50% (v/v) glycerol solution.

For colon biopsy tissue, the tissue samples in sterile 0.85% sodium chloride (NaCl) were sonicated using an ultrasonic water bath for 2 min at room temperature (RT) to disperse the attached bacterial cells. The bacterial suspension from each sample was cultured in MRS broth (Hi-Media, India) at 37 °C under anaerobic conditions using anaerobic jars with a gas pack (Anaeropack-Anaero, Mitsubishi Gas Chemical Company, Japan) for 24 h. After incubation, the bacterial isolates were stored at -80 °C in 50% (v/v) glycerol solution.

Fecal samples and the bacterial stocks from tissue biopsy samples were serially diluted in sterile 0.85% NaCl solution before culturing on modified MRS agar plates supplemented with 1% (w/v) $CaCO_3$, 0.05% (w/v) L-cysteine hydrochloride, and 50 mg/mL vancomycin (Björneholm ,et al. 2009). The culture was incubated at 37 °C under anaerobic conditions for 48 h. After incubation, bacterial colonies showing creamy white surrounded by a clear zone on the modified MRS agar plate were selected. The selected colonies were purified by re-streaking on the MRS agar plate once and incubated at 37 °C under anaerobic conditions for 48 h. A single colony was tested for Gram staining and catalase test. All Gram-positive rods and catalase-negative isolates were collected and stored at -80 °C in 50% glycerol before use in *Lactobacillus* identification.

Identification of the Lactobacillus species using Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry (MALDI-TOF MS)

The bacterial samples were identified using MALDI-TOF MS as previously described (Jussiaux ,et al. 2021). The bacteria from glycerol stock was cultured on MRS agar and incubated at 37 °C under anaerobic conditions for 48 h. After incubation, the single colony was smeared as a thin film onto a VITEK MS target slide (Biomerieux, Turkey). Subsequently, 1 µL of 70% formic acid was added to the bacterial spot. The slide was dried at room temperature (RT) before adding 1 µL of MALDI matrix (α-cyano-4-hydroxycinnamic acid (CHCA)) and complete drying. The slide was applied to the VITEK MS identification system. The result was analyzed using VITEK MS ID software. *Escherichia coli* ATCC 8739 was used as the quality control, as recommended by the manufacturer.

Identification of the Lactobacillus species using 16S rRNA gene sequencing

Lactobacillus species that could not be identified by MALDI-TOF MS were further identified using 16S rRNA gene sequencing. The single colony was cultured in MRS broth and incubated at 37 °C under anaerobic condition for 24 h. The genomic DNA was extracted using the PureDireX genomic DNA isolation kit (Bio-Helix, Taiwan) according to the manufacturer's instructions. The 16S rRNA gene was amplified using PCR with universal primers for bacterial identification: 27f (5' AGAGTTTGATCCTGGCTCAG 3') and 1492r (5' GGTTACCTTGTTACGACTT 3') (Masumizu ,et al. 2019). The PCR reaction was prepared in a total volume of 25 µL which contained 13.75 µL of DNase-free water, 5 µL of 5X Q5PCR buffer, 0.5 µL of 10 µM dNTP, 0.25 µL of Q5 High-Fidelity DNA Polymerase (NEB), 1.25 µL of forward and reverse primers and 3 µL of bacterial genomics DNA template. The amplification condition consisted of 96 °C for 4 min, followed by 30 cycles of 94 °C for 30 sec, 57 °C for 30 sec, 72 °C for 1 min, and 72 °C for 10 min. The PCR amplicon was visualized using

agarose gel electrophoresis. The PCR products were then excised from the gel and purified using the PureDirecX PCR Clean-up and gel extraction kit (Bio-Helix, Taiwan) following the manufacturer's protocol. The DNA sequencing was performed by Macrogen (Macrogen Inc., Seoul, South Korea). The 16S rRNA gene sequences were analyzed using the Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) against the National Center for Biotechnology Information (NCBI) database.

Results and Discussion

A total of 70 and 2 bacterial isolates were obtained from stool and colon biopsy tissue samples, respectively. All isolates showed creamy white colonies surrounded by a clear zone on the modified MRS agar, suggesting lactic acid bacteria including *Lactobacillus*, (Fig. 1 A and C) and were visualized as Gram-positive rod under light microscope (Fig. 1 B and D). Colonies isolated from both sample types showed different sizes of clear zone. Moreover, distinct microscopic morphologies after Gram staining were observed. All isolates were further identified using MALDI-TOF/MS.

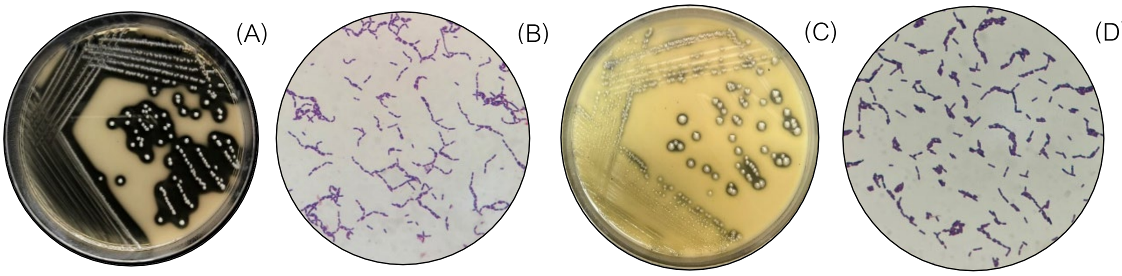


Fig. 1 Representatives of colony morphologies and Gram staining of bacteria isolated from stool (A and B) and colon biopsy tissue samples (C and D), respectively. Suspected *Lactobacillus* in both sample types showed creamy white colonies surrounded with a clear zone on the modified MRS agar and Gram-positive rod under light microscopy

The MALDI-TOF MS used in this study was the VITEK MS identification system and the raw MS profiles of *Lactobacillus* species were demonstrated in Fig. 2. The MALDI-TOF MS was able to classify 66 out of 72 isolates (91.7 %), in which most identified bacteria belonged to genus *Lactobacillus* with an approximately 99.9 % confidence value. The isolated and identified bacteria included 36 isolates of *Ligilactobacillus salivarius*, followed by 8 isolates of *Limosilactobacillus fermentum*, 3 isolates of *Lactobacillus casei/paracasei/rhamnosus*, 4 isolates of *Lactobacillus pentosus/plantarum/paraplantarum*, and 15 isolates of other LAB (Fig. 3). However, 2 isolates (*L. casei/paracasei/rhamnosus* and *L. pentosus/plantarum/paraplantarum*) could not be classified at the species level and 6 isolates could not be identified by MALDI BioTyper. All unclassified isolates were further identified by 16S rRNA gene sequencing and the results demonstrated that the 2 unidentified

species were *L. paracasei* and *L. plantarum*, while the 6 unknown bacteria were *Lactobacillus animalis* (4 isolates) and *Lactobacillus saerimneri* (2 isolates).

Based on the sample type, the number of *Lactobacillus* isolates from biopsy samples, two isolates of *L. fermentum*, was fewer than that of isolates from feces. It is possible that strictly anaerobic bacteria on the mucosal tissues might die after exposure to oxygen during the sampling and isolation process. Before colonoscopy, volunteers went through the process of bowel preparation that might result in a few bacteria remaining on the bowel mucosa. In addition, the small size (about 1 mm in diameter) of colon biopsy tissues could harbor only small number of bacteria. In this study, we found two isolates from the biopsy samples, which are expected to have increased oxygen resistance and adhesion properties (Zoetendal ,et al. 2002). However, these properties need to be further evaluated.

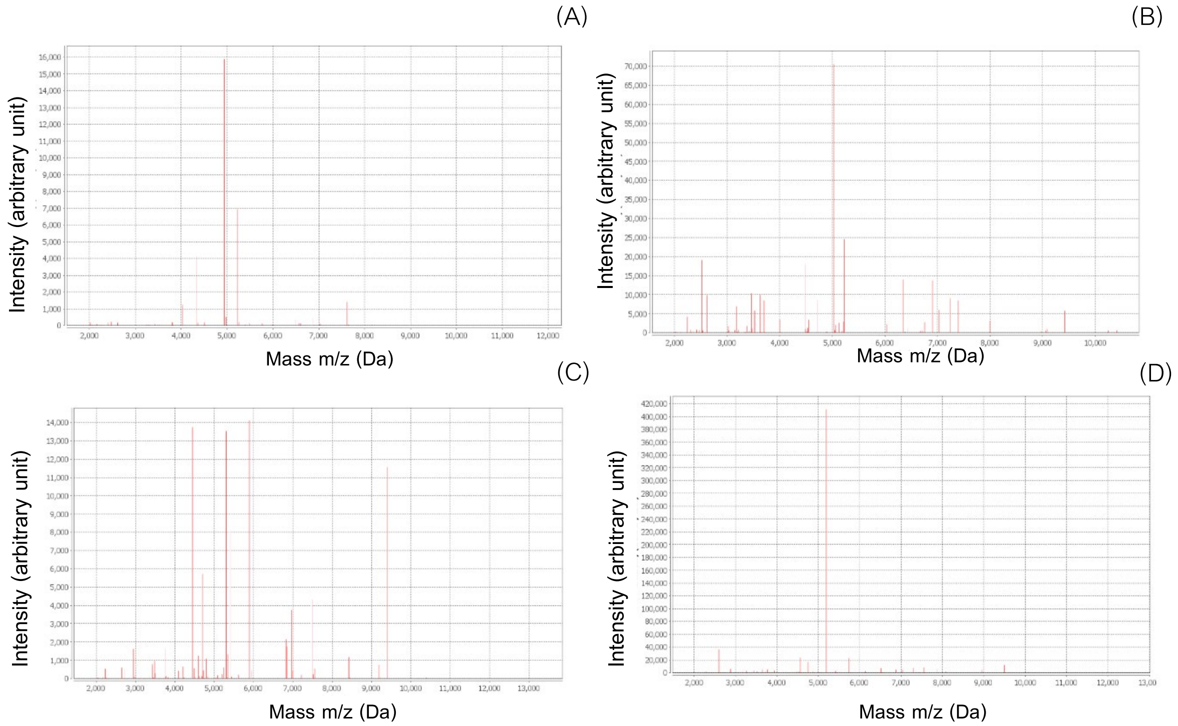


Fig. 2 RAW MS spectra of the *Lactobacillus* spp. obtained by MALDI-TOF MS analysis. The relative intensity of the ions (arbitrary units) and their mass-to-charge ratio (*m/z,* Da) are shown on the *y* and *x-axis*, respectively. Mass spectra of (A) *L. salivarius*; (B) *L. fermentum*; (C) *L. casei/paracasei/rhamnosus*; *and* (D) *L. pentosus/plantarum/paraplantarum*

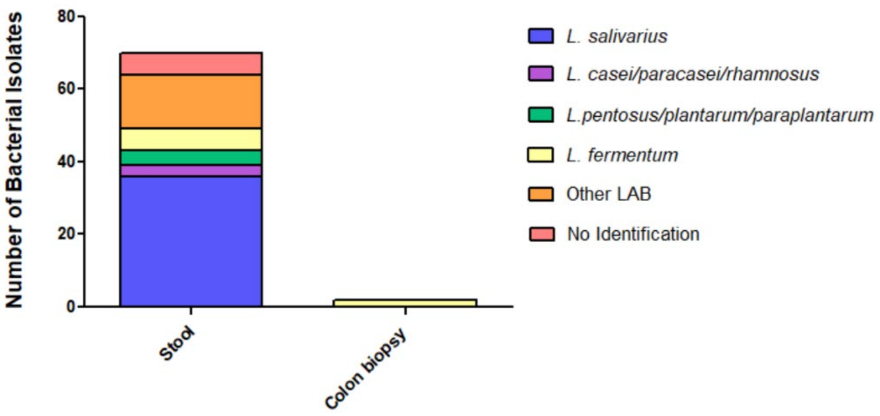


Fig. 3 The number of bacteria identified by MALDI-TOF MS. *L. salivarius* 36 isolates (50%), *L. fermentum* 8 isolates (11%), *L. casei/paracasei/rhamnosus* 3 isolates (4%), *L. pentosus/plantarum/paraplantarum* 4 isolates (6%), other LAB 15 isolates (21%), and 6 unidentified isolates (8%)

Conclusion

In this study, most *Lactobacillus* spp. isolated from stool and colon biopsy tissue samples obtained from healthy elderly were identified by MALDI-TOF MS. The predominant *Lactobacillus* species in stool and biopsy samples were *L. salivarius* (36 out of 70 isolates) and *L. fermentum* (8 isolates), respectively. However, the MALDI-TOF MS was limited resulting in unclassified *Lactobacillus* species of two isolates and unknown bacteria of 6 isolates. These isolates were subsequently identified by 16S rRNA gene sequencing. Therefore, MALDI-TOF MS could be used for initial identification of *Lactobacillus* spp. *Lactobacillus* spp. isolated in this study will be further investigated for probiotic properties in terms of anti-inflammatory and anti-oxidative stress activities.

Acknowledgments

I would like to thank the Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, and staff at the Department of Microbiology, King Chulalongkorn Memorial Hospital for the technical support for MALDI-TOF and MALDI BioTyper analyses.

Reference

Bengoa, A.A., Dardis, C., Gagliarini, N., Garrote, G.L., Abraham, A.G. (2020). Exopolysaccharides from *Lactobacillus paracasei* Isolated from Kefir as potential Bioactive compounds for microbiota modulation. Front Microbiol 11: 583254. doi.org/10.3389/fmicb.2020.583254

Björneholm, S., Eklöw, A. Saarela, M. Mättö, J. (2009). Enumeration and Identification of *Lactobacillus paracasei* subsp. paracasei F19. Microbial Ecology in Health and Disease 14(1): 7–13 doi.org/10.1080/089106002760003288

Foschi, C., Laghi, L., Parolin, C., Giordani, B., Compri, M., Cevenini, R., Marangoni, A., Vitali, B. (2017). Novel

approaches for the taxonomic and metabolic characterization of lactobacilli: Integration of 16S rRNA gene sequencing with MALDI-TOF MS and 1H-NMR. PLoS One 12(2): e0172483 doi.org/10.1371/journal.pone.0172483

Iadsee, N., Chuaypen, N., Techawiwattanaboon, T., Jinato, T,. Patcharatrakul, T., Malakorn, S.P., Praditpornsilpa, K. (2023). Identification of a novel gut microbiota signature associated with colorectal cancer in Thai population.

Jeong, C.H., Sohn, H., Hwang, H., Lee, H.J., Kim, T.W., Kim, D.S., Kim, C.S., Han, S.G. and Hong, S.W. (2021). Comparison of the Probiotic Potential between *Lactiplantibacillus plantarum* Isolated from Kimchi and Standard Probiotic Strains Isolated from Different Sources. Foods 10(9): 2125. doi.org/10.3390/foods10092125

Jussiaux, F., Miot-Sertier, C., Nguyen-Lopez, D., Badet, C., Samot, J. (2021). Reliability of MALDI-TOF mass spectrometry to identify oral isolates of *Streptococcus salivarius* and *Lactobacillus spp.* Arch. Oral. Biol. 121: 104983 doi.org/10.1016/j.archoralbio.2020.104983

Kaewchomphunuch, T., Charoenpichitnunt, T., Thongbaiyai, V., Ngamwongsatit, N., Kaeoket, K. (2022). Cell-free culture supernatants of *Lactobacillus spp.* and *Pediococcus spp.* inhibit growth of pathogenic *Escherichia coli* isolated from pigs in Thailand. BMC Vet Res 18(1): 60. doi.org/10.1186/s12917-022-03140-8

Khanna, S., Bishnoi, M., Kondepudi, K.K., Shukla, G. (2020). Isolation, characterization and anti-inflammatory mechanism of probiotics in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages. World J. Microbiol. Biotechnol. 36(5): 74. doi.org/10.1007/s11274-020-02852-z

Masumizu, Y., Zhou, B., Kober, A., Kitazawa, H. (2019). Isolation and Immunocharacterization of *Lactobacillus salivarius* from the Intestine of wakame-fed pigs to develop novel "Immunosynbiotics". Microorganisms 7(6). doi.org/10.3390/microorganisms7060167

Nacef, M., Chevalier, M., Chollet, S., Drider, D., Flahaut, C. (2017). MALDI-TOF mass spectrometry for the identification of lactic acid bacteria isolated from a French cheese: The Maroilles. Int. J. Food Microbiol. 247: 2–8. doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.07.005.

Oh, N.S., Joung, J.Y., Lee J.Y., Kim, Y. (2018). Probiotic and anti-inflammatory potential of *Lactobacillus rhamnosus* 4B15 and Lactobacillus gasseri 4M13 isolated from infant feces. PLoS One 13(2): e0192021. doi.org/10.1371/journal.pone.0192021.

Singh, S., Bhatia, R., Khare, P., Kondepudi, K.K. (2020). Anti-inflammatory bifidobacterium strains prevent dextran sodium sulfate induced colitis and associated gut microbial dysbiosis in mice. Sci. Rep. 10(1): 18597. doi.org/10.1038/s41598-020-75702-5

Zoetendal, E.G., von Wright, A., Vilpponen-Salmela, T., Ben-Amor, K., Akkermans, A.D., de Vos, W.M. (2002). Mucosa-associated bacteria in the human gastrointestinal tract are uniformly distributed along the colon and differ from the community recovered from feces. Appl. Environ. Microbiol. 68(7): 3401–3407 doi.org/10.1128/AEM.68.7.3401-3407.2002

การสะสมอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้ายและการตรึงด้วยพอลิเอทิลลีนอิมมีนผสมกรดพอลิอะคริลิก

Deposition of silver nanoparticles on cotton fabric and immobilization by polyethylenimine/polyacrylic acid blend

ศิริพรรณ นาคพันธ์[a], **หาญชนะ เกตมาลา**[b], **ณัฐธิดา รักกะเปา**[a,c,*], **สุวธิดา จีนเดิม**[a], **สุธิดา หมาดโต๊ะซ๊ะ**[a,c], **ส่าหรี บุญประสพ**[d]

Siriphan Nakaphan[a], Harnchana Gatemala[b], Natthida Rakapao [a,c,*], Suwathida Jeenderm[a], Sutida Marthosa[a,c] Saree boonprasop[d]

[a]สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี 84000

[b]ฝ่ายวิจัยเทคโนโลยีพลังงานใหม่ สถาบันนวัตกรรม ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) พระนครศรีอยุธยา 13170

[c]ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา 90110

[d]ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี 84000

[a]Department of Applied Chemistry, Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, 84000 Thailand

[b]New Energy Technology Research Department, PTT Innovation Institute, PTT Public Company Limited, Phranakorn Sri Ayutthaya, 13170 Thailand

[c]Center of Excellence in Membrane Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla, 90110 Thailand

[d]Science Laboratory and Equipment center, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, 84000 Thailand

*Corresponding author. E-mail address: natthida.r@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง polyethylenimine (PEI) และ polyacrylic acid (PAA) เป็นสารตรึง (immobilizer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะของอนุภาคนาโนโลหะเงิน (AgNPs) บนผ้าฝ้าย โดยพบว่าการใช้ PEI ผสม PAA เป็นสารตรึงนั้นช่วยให้ AgNPs ยึดติดอยู่บนผ้าฝ้ายอย่างเสถียร โดยไม่พบการหลุดของ AgNPs ภายหลังการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง จึงปลอดภัยต่อผู้บริโภคกว่าการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายด้วยวิธีดั้งเดิม และเมื่อศึกษาการใช้ PEI ผสม PAA เป็นสารตรึงอย่างละเอียดจึงพบว่าปริมาณ PAA, PEI และ NH_4OH ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารตรึง ต่างมีผลต่อความเสถียรของ AgNPs และปริมาณ AgNPs ที่สะสมอยู่บนผ้าฝ้าย รวมถึงความเหมาะสมของการใช้ของผสมดังกล่าวในการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายด้วย

คำสำคัญ: กรดโพลีอะคริลิก, โพลิเอทิลีนนิมีน, สารตรึง, อนุภาคนาโนโลหะเงิน, แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

Abstract

In this research, the effect of using polymer blends between polyethylenimine (PEI) and polyacrylic acid (PAA) as immobilizers was investigated on enhancing the stability of silver nanoparticles (AgNPs) deposited on cotton fabric. It was found that the use of PAA/PEI blend as an immobilizer improved the stability of AgNPs-deposited cotton fabric without detecting AgNPs detachment after ultrasonic stimulation. Thus, it is safer for consumers than the conventional deposition method of AgNPs on cotton fabric. When studying the use of PAA/PEI blend as an immobilizer in detail, it was found that the quantity of PAA, PEI, and NH_4OH affected the stability of AgNPs, the amount of AgNPs deposited on cotton fabric, and the suitability of using the PAA/PEI/NH_4OH mixtures for the deposition of AgNPs on cotton fabric.

Keywords: Ammonium hydroxide, Immobilizer, Polyacrylic acid, Polyethyleneamine, Silver nanoparticles

คำนำ

ผ้าฝ้ายถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอทางการแพทย์ เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำ สารคัดหลั่ง และคราบเหงื่อไคลได้ดีเยี่ยม ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผ้าฝ้าย ความแข็งแรงเชิงกลที่ลดลง และเกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ จึงอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน (Hebeish et al., 2011) ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการคิดค้นเพื่อนำอนุภาคนาโนโลหะเงิน (Silver nanoparticles; AgNPs) มาทำการสะสมลงบนผ้าฝ้ายเพื่อเพิ่มฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (Ahmad, 2021) โดยมีวิธีในการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายหลากหลายวิธี ได้แก่ การสะสมโดยตรง (Cheng et al., 2013), การสังเคราะห์ในแหล่งกำเนิด (Lee et al., 2007) และการระเหยด้วยความร้อน (Smetana et al., 2005) เป็นต้น ซึ่งกลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของ AgNPs เริ่มจากการปลดปล่อย Ag^+ จากพื้นผิวของ AgNPs อย่างช้า ๆ จากนั้น Ag^+ จะแทรกซึมเข้าไปในผนังเซลล์แบคทีเรีย เชื้อจึงตายลงในที่สุด (Dakal et al., 2016) ทั้งนี้พบว่าแม้การใช้ผ้าที่สะสม AgNPs จะมีประโยชน์ แต่ก็อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้งานได้หากมี AgNPs หลุดลอดเข้าสู่ร่างกาย โดยจะไปสะสมในเนื้อเยื่อและอวัยวะของมนุษย์ และก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น เซลล์ตายและสร้างความเสียหายต่อ DNA (Dakal et al., 2016) ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงวิธีการสะสม AgNPs ให้ยึดติดบนผ้าฝ้ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะใช้วิธีเคลือบด้วยพอลิเมอร์บางชนิด เช่น polyvinylpyrrolidone (PVP), polyethyleneglycol (PEG), polyethylenimine (PEI), polyacrylic acid (PAA) ภายหลังการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายแล้ว (Iravani et al., 2013)

โดย Li และคณะ (2020) ได้ปรับปรุงวิธีการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายให้สะดวกขึ้นโดยใช้โอลิโกเมอร์ของ PAA ซึ่งเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มความคงตัวในการสังเคราะห์ AgNPs ซึ่งพบว่า PAA นั้นช่วยตรึงให้ AgNPs ติดอยู่บนผ้าได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มี PAA แต่การตรึง AgNPs บนผ้าฝ้ายด้วยวิธีดังกล่าวก็ยังไม่เสถียรและยังพบการหลุดของ AgNPs นอกจากนั้นยังมีการใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง ß-cyclodextrin และ PAA เป็นเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มความคงตัวในการสังเคราะห์ AgNPs ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวนั้นช่วยตรึงทำให้ AgNPs ติดอยู่บนผ้าฝ้ายได้ดีและเสถียรขึ้น (Hebeish et al., 2011) จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่านอกจาก PAA จะเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มความคงตัวในการสังเคราะห์ AgNPs แล้ว เมื่อนำ AgNPs ที่ผสม PAA ไปสะสมบนผ้าฝ้ายพบว่า PAA ไม่ทำให้คุณสมบัติเดิมของผ้าฝ้ายเปลี่ยนไป และยังมีบทบาทเป็นสารช่วยตรึง AgNPs ให้ยึดติดอยู่บนผ้าฝ้ายอย่างเสถียรขึ้น จึงมีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ยาวนานขึ้น แต่ข้อจำกัดสำคัญของการใช้ PAA เพียงอย่างเดียวเป็นสารตรึง AgNPs บนผ้าฝ้ายคือสารละลาย PAA ในน้ำนั้นมีความหนืดสูงจึงทำให้ AgNPs เกิดการรวมตัวกัน และยังพบว่าประสิทธิภาพในการตรึง AgNPs บนผ้านั้นยังไม่ดีนัก

Wu และคณะ (2016) ได้ทดลองใช้ PEI มาปรับปรุงพื้นผิวของผ้าฝ้ายก่อนนำไปทำการสะสมด้วย AgNPs และเคลือบทับด้วย fluorinated-decyl polyhedral oligomeric silsesquioxane (F-POSS) ทำให้ได้ผ้าฝ้ายที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความคงทนต่อการซัก โดยพบว่า PEI นั้นทำให้ AgNPs ติดตรึงอยู่บนผ้าฝ้ายอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ผู้วิจัยพบว่าไม่สามารถผสม PEI เข้ากับ AgNPs ได้โดยตรงเพราะจะทำให้ AgNPs ไม่เสถียรและเกิดการละลายกลับ ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดสำคัญในการใช้ PEI เป็นสารตรึง AgNPs บนผ้า เพราะต้องมีขั้นตอนในการย้อมที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาวิธีการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายให้สะดวก รวดเร็ว และสามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว จึงมีศักยภาพในการขยายกำลังการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรม และได้ผ้าฝ้ายที่ยึดด้วย AgNPs อย่างเสถียรจึงไม่หลุดขณะใช้งาน โดยทดลองนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PAA และ PEI ซึ่งต่างก็เป็นสารตรึงที่มีศักยภาพ มาผสมโดยตรงกับ AgNPs และทำการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายโดยการจุ่ม ซึ่ง Li และคณะ (2021) รายงานว่าสัดส่วนระหว่าง PAA และ PEI ตลอดจน pH นั้นต่างก็มีผลต่อความเข้ากันได้และการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพื่อหาสัดส่วนของ PAA และ PEI ตลอดจน pH ที่เหมาะสมสำหรับการใช้พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเป็นสารตรึงสำหรับการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้าย

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะเงิน

ทำการสังเคราะห์ AgNPs จากสารละลาย $AgNO_3$ เข้มข้น 0.232 มิลลิโมล/ลิตร โดยใช้สารละลาย PVP ในน้ำความเข้มข้น 6.3 มิลลิโมล/ลิตร เป็นตัวทำละลาย จากนั้นเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) ความเข้มข้น 68.7 มิลลิโมล/ลิตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นให้ความเย็นแก่สารละลาย $NaBH_4$ เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงทำการกวนผสมกับสารละลาย $AgNO_3$ และตั้งทิ้งไว้ 48 h เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์

ศึกษาการใช้สารตรึงเพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในการยึดติดของอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้าย

การเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างอนุภาคนาโนโลหะเงินและสารตรึง

หลอดทดลองที่ 1 นำสารละลาย AgNPs ความเข้มข้น 100 ppm มาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

หลอดทดลองที่ 2 นำสารละลาย AgNPs ความเข้มข้น 100 ppm ผสมกับ PEI ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ปริมาณ 1.0 มิลลิลิตร

หลอดทดลองที่ 3 นำสารละลาย AgNPs ความเข้มข้น 100 ppm ผสมกับ PAA ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาณ 1.0 กรัม

หลอดทดลองที่ 4 นำ AgNPs ความเข้มข้น 100 ppm ผสมกับ PAA ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาณ 1.0 กรัม และเติม PEI ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร 1.0 มิลลิลิตร แล้วปรับ pH เท่ากับ 11 ด้วย NH_4OH ความเข้มข้น 25 %v/v

โดยทุกตัวอย่างจะปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร โดยควบคุมให้ทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นสุดท้ายของ AgNPs เท่ากับ 70 ppm เท่ากัน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาผลของการแปรปริมาณ PAA

นำ AgNPs ความเข้มข้น 100 ppm ผสมกับ PAA ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาณ 0.3, 0.5, 0.7 หรือ 1.0 กรัม จากนั้นเติม PEI ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ปริมาณ 1 มิลลิลิตร เท่ากันทุกตัวอย่าง และปรับ pH เท่ากับ 11 ด้วย NH_4OH ความเข้มข้น 25 %v/v จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยควบคุมให้ทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นของ AgNPs เท่ากับ 70 ppm เท่ากัน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาผลของการแปรปริมาณ PEI

นำ AgNPs ความเข้มข้น 100 ppm ผสมกับ PAA ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาณ 1.0 กรัม เท่ากันทุกตัวอย่าง จากนั้นเติม PEI ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ปริมาณ 0.3, 0.5, 0.7 หรือ 1.0 มิลลิลิตร และปรับ pH เท่ากับ 11 ด้วย NH_4OH ความเข้มข้น 25 %v/v จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยควบคุมให้ทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นของ AgNPs เท่ากับ 70 ppm เท่ากัน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาผลของการแปรปริมาณ NH_4OH

นำ AgNPs ความเข้มข้น 100 ppm ผสมกับ PAA ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาณ 1.0 กรัม แล้วเติม PEI ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ปริมาณ 1.0 มิลลิลิตร เท่ากันทุกตัวอย่าง และปรับ pH ด้วย NH_4OH เข้มข้น 25%v/v ปริมาณ 0.5, 1.0 หรือ 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยควบคุมให้ทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นของ AgNPs เท่ากับ 70 ppm เท่ากัน

การสะสมอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้าย

เตรียมผ้าฝ้ายขนาด 3.5 × 3.5 ตารางเซนติเมตร แช่ในสารละลาย AgNPs เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 15 นาที

ศึกษาประสิทธิภาพในการยึดติดของอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้าย

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านการสะสม AgNPs มาทำการแช่ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นจึงกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์การหลุดของ AgNPs โดยวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) และนำตัวอย่างผ้าทั้งก่อนและหลังผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไปวัดสีด้วยเครื่อง Digital Colorimeter

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างอนุภาคนาโนโลหะเงินและสารตรึงชนิดต่าง ๆ คือ PAA, PEI และพอลิเมอร์ผสมของ PAA/PEI แสดงดัง Fig. 1 พบว่าการผสม PEI กับ AgNPs โดยตรงนั้นทำให้สีของของผสมจางลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับระบบ AgNPs บริสุทธิ์ เนื่องจาก PEI ทำให้ Ag^0 เกิดการออกซิไดซ์กลับเป็น Ag^+ และการผสม PAA กับ AgNPs โดยตรงนั้นพบว่าเกิดการแยกเฟสและตกตะกอนของ AgNPs และของผสมมีความหนืดสูง ดังนั้นทั้ง PEI และ PAA จึงไม่เหมาะสมที่จะผสมโดยตรงกับ AgNPs ขณะที่การผสม AgNPs เข้ากับพอลิเมอร์ผสม PAA/PEI นั้นพบว่าได้ของผสมเนื้อเดียวที่มีลักษณะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นสารตรึงในการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายแบบขั้นตอนเดียวโดยไม่พบการออกซิไดซ์กลับของ AgNPs อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PEI และ PAA เป็นสารตรึงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของ AgNPs บนผ้าฝ้ายอย่างละเอียด โดยศึกษาผลของการแปรปริมาณ PAA, PEI และ NH_4OH ต่อประสิทธิภาพในการตรึง AgNPs บนผ้าฝ้าย ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผ้าฝ้ายที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ โดยที่ AgNPs ยึดติดอยู่บนผ้าฝ้ายอย่างเสถียรและไม่พบการหลุดของ AgNPs ระหว่างการใช้งาน จึงปลอดภัยต่อผู้บริโภคกว่าการสะสม AgNPs บนผ้าด้วยวิธีดั้งเดิม

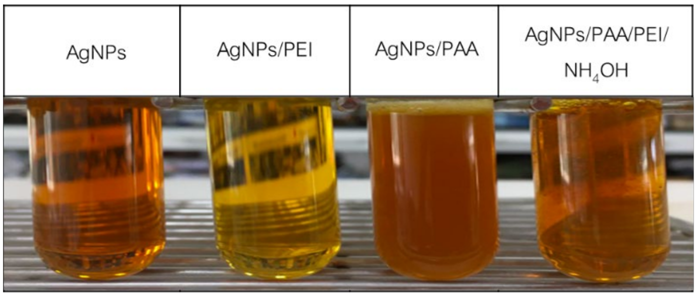


Fig. 1 Pure AgNPs and AgNPs-incorporated mixtures; AgNPs/PEI, AgNPs/PAA, and AgNPs/PAA/PEI/NH_4OH

ผลของปริมาณ PAA ต่อประสิทธิภาพในการยึดติดและความเสถียรของอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้า

จากการศึกษาผลของการแปรปริมาณ PAA เท่ากับ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 กรัม ต่อลักษณะทางกายภาพและความหนืดของของผสม AgNPs/PAA/PEI/NH_4OH โดยพบว่าทุกตัวอย่างมีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียว โดยไม่พบการแยกเฟสและการตกตะกอนของ AgNPs และพบว่าสีของของผสมจะเข้มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ PAA ที่เพิ่มขึ้น แสดงดัง Fig. 2A และยังพบว่าความหนืดของของผสมนั้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PAA โดยของผสมที่มี PAA 0.3 กรัม นั้นมีความหนืด 1.27 เซนติพอยซ์ และเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวเป็น 2.46 เซนติพอยซ์ เมื่อปริมาณ PAA เพิ่มขึ้นเป็น 1.0 กรัม เมื่อนำของผสมดังกล่าวไปย้อมผ้าฝ้ายก็พบว่าอาจมีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค AgNPs บนผ้า ดังเห็นได้จากสีของผ้าที่ย้อมด้วย AgNPs เพียงอย่างเดียวนั้นมีสีโทนน้ำตาลแดงซึ่งแสดงถึงการรวมตัวกันของอนุภาค AgNPs และกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่ใช้ของผสม AgNPs/PAA/PEI/NH_4OH ในการย้อมผ้าที่ได้ตัวอย่างสีเหลืองสดใส ซึ่งสอดคล้องกับ AgNPs ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 8–22 นาโนเมตร (Jin et al., 2001) แสดงดัง Fig. 3 และยังพบว่าปริมาณของ PAA ในของผสมนั้นมีผลต่อปริมาณ AgNPs ที่สะสมอยู่บนผ้าอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าผ้ามีสีเหลืองเข้มขึ้นตามปริมาณของ PAA ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดสีของผ้าตัวอย่าง แสดงดัง Fig. 4 โดยพบว่าค่า L* ซึ่งสัมพันธ์กับความสว่างนั้นมีค่าลดลงและค่า a* ซึ่งสัมพันธ์กับสีโทนแดง-เขียวนั้นก็มีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงตัวอย่างผ้ามีสีแดงขึ้น ขณะที่ค่า b* ซึ่งสัมพันธ์กับสีโทนน้ำเงิน-เหลืองนั้นกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงตัวอย่างผ้ามีสีเหลืองขึ้น ตามปริมาณ PAA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการวัดสี

ดังกล่าวสามารถสะท้อนถึงปริมาณ AgNPs ที่สะสมอยู่บนผ้าในปริมาณที่มากขึ้นตามปริมาณของ PAA และเมื่อนำตัวอย่างผ้าที่ย้อมโดยใช้ของผสมที่มีปริมาณ PAA แตกต่างกันไปกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงก็พบว่ามีความเสถียรมาก โดยไม่พบการหลุดอย่างมีนัยสำคัญของ AgNPs ในทุกตัวอย่าง ซึ่งยืนยันได้ทั้งจากสีของผ้าภายหลังการกระตุ้น ผลการวัดสี และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายภายหลังการการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง แสดงดัง Fig. 5A ซึ่งการไม่ปรากฏของพีคการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ 400 นาโนเมตร อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ AgNPs ที่ต่ำกว่าขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือ ซึ่งยืนยันได้ว่า AgNPs ยึดติดบนผ้าฝ้ายอย่าเสถียรโดยไม่พบการหลุดอย่างมีนัยสำคัญทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือเนื่องมาจากความเข้มข้นของ AgNPs ที่หลุดออกมาอาจต่ำกว่าขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือวัด ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ของผสม PAA/PEI/NH_4OH เป็นสารตรึง AgNPs บนผ้าฝ้าย จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณ PAA นั้นมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อทั้งความเสถียรของ AgNPs และปริมาณ AgNPs ที่สะสมอยู่บนผ้าฝ้าย แต่หากใช้ปริมาณของ PAA มากเกินไปก็อาจทำให้ความหนืดของของผสมนั้นสูงเกินไปจนยากต่อการนำไปย้อมผ้าได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง

(A) (B) (C)

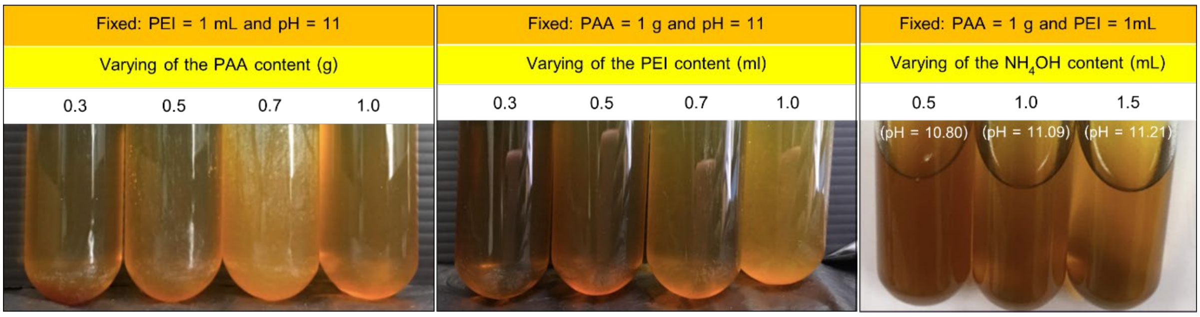


Fig. 2 AgNPs-contained mixtures (AgNPs/PAA/PEI/NH_4OH) with different contents of PAA (A), PEI (B) and NH_4OH (C). The concentration of AgNPs was fixed at 70 ppm for all mixtures.

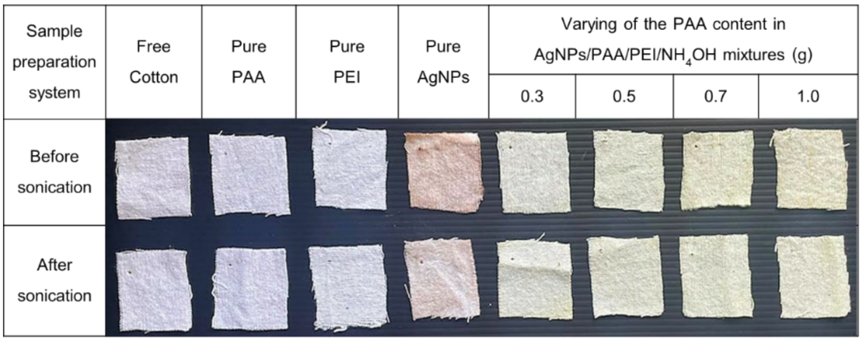


Fig. 3 The effect of varying the PAA content on a stability of AgNPs-deposited cotton fabrics prepared using the mixture of PAA/PEI/NH_4OH as an immobilizer. The pictures were taken before and after ultrasonic stimulation

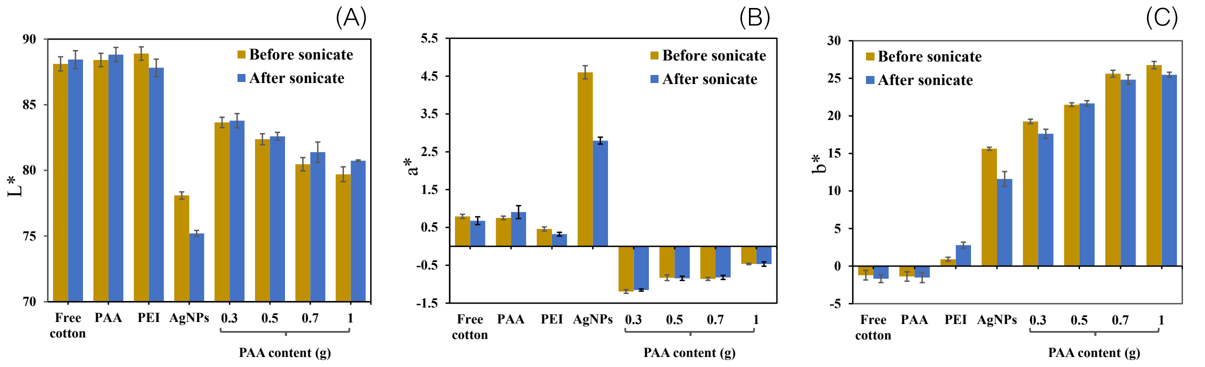


Fig. 4 The effect of varying the PAA content on a stability of AgNPs-deposited cotton fabrics prepared using the mixture of PAA/PEI/NH_4OH as an immobilizer. The color coordinates L* (A), a* (B), and b* (C) of cotton fabrics before and after ultrasonic stimulation

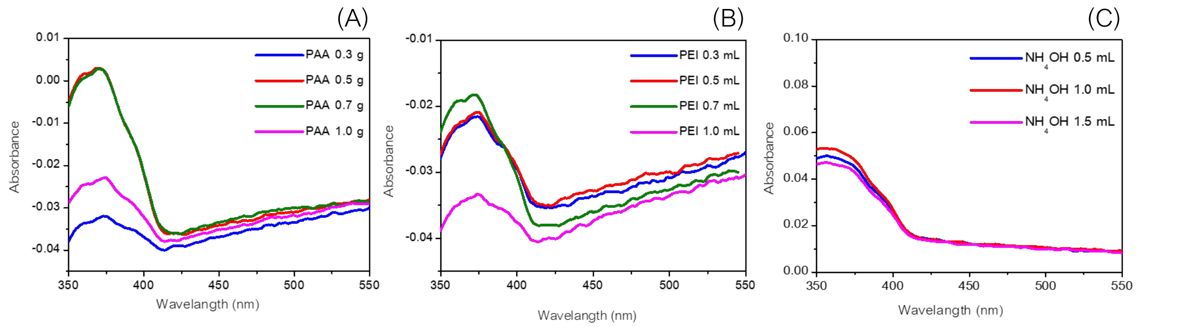


Fig. 5 UV-vis absorption spectra of the soaked-solutions of AgNPs-deposited cotton fabrics prepared using a mixture of PAA/PEI/NH_4OH as immobilizer after ultrasonic stimulation. The influence of varying (A) PAA; (B) PEI; and (C) NH_4OH content on the deposition stability was studied

ผลของปริมาณ PEI ต่อประสิทธิภาพในการยึดติดและความเสถียรของอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้าย

จากการศึกษาผลของการแปรปริมาณ PEI เท่ากับ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิลิตร ต่อลักษณะทางกายภาพและความหนืดของของผสม AgNPs/PAA/PEI/NH_4OH ซึ่งแสดงดัง Fig. 2B พบว่าทุกตัวอย่างมีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียวโดยไม่พบการแยกเฟสและการตกตะกอนของ AgNPs และพบว่าสีของของผสมจางลงอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณ PEI ที่เพิ่มขึ้น แสดงดัง Fig. 7 ทั้งนี้เนื่องจาก PEI มีบทบาทเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้ AgNPs เกิดการละลายกลายเป็น Ag^+ ดังนั้นของผสมจึงมีสีเหลืองจางลงตามปริมาณ AgNPs ที่ลดลงเมื่อปริมาณ PEI เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับ Fig. 6 พบค่า L* ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความสว่างลดลง ค่า a* ของตัวอย่าผ้ามีสีแดงอ่อนลง และ ค่า b* ค่าสีเหลืองลดลงเช่นกัน ตามปริมาณ PEI ที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงการเกิดรวมตัวกัน AgNPs ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้สารตรึงมีสีแดงอ่อนลงซึ่งบอกถึงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค AgNPs เดี่ยว ๆ บนผ้าที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อนำตัวอย่างผ้าที่ย้อมโดยใช้ปริมาณ PEI แตกต่างกันไปกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่ามีความเสถียรมากโดยไม่พบการหลุดของ AgNPs ในทุกตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งยืนยันได้จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายภายหลังการการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง แสดง Fig.5B อาจเป็นผลมาจากขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือเนื่องมาจากความเข้มข้นของ AgNPs ที่หลุดออกมาอาจต่ำกว่าขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือวัด และผลการวัดสี จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความเสถียรของ AgNPs นั้นแปรผกผันกับปริมาณ PEI ดังนั้นจึงควรใช้ PEI ปริมาณน้อยที่สุดซึ่งยังสามารถตรึง AgNPs ให้อยู่บนผ้าได้อย่างเสถียร เพื่อลดการเกิดออกซิเดชั่นและละลายกลับของ AgNPs

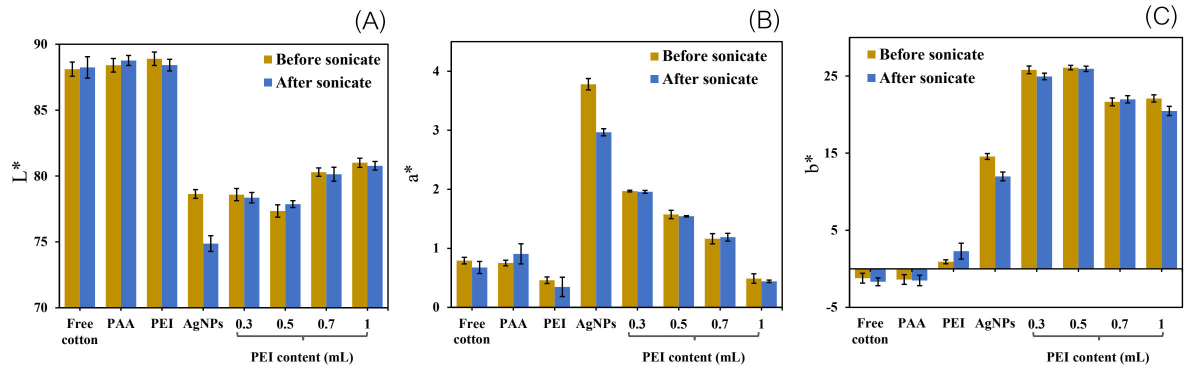


Fig.6 The effect of varying the PEI content on a stability of AgNPs-deposited cotton fabrics prepared using the mixture of PAA/PEI/NH_4OH as an immobilizer. The color coordinates L* (A), a* (B), and b* (C) of cotton fabrics before and after ultrasonic stimulation

Sample preparation system	Free Cotton	Pure PAA	Pure PEI	Pure AgNPs	Varying of the PEI content in AgNPs/PAA/PEI/NH_4OH mixtures (mL)			
					0.3	0.5	0.7	1.0
Before sonication								
After sonication								

Fig. 7 The effect of varying the PEI content on a stability of AgNPs-deposited cotton fabrics prepared using the mixture of PAA/PEI/NH_4OH as an immobilizer. The pictures were taken before and after ultrasonic stimulation

ผลของปริมาณ NH_4OH ต่อประสิทธิภาพในการยึดติดและความเสถียรของอนุภาคนาโนโลหะเงินบนผ้าฝ้าย

จากการศึกษาผลของการแปรปริมาณ NH_4OH เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 มิลลิลิตร ต่อลักษณะทางกายภาพของผสม AgNPs/PAA/PEI/NH_4OH ซึ่งแสดงดัง Fig.2C พบว่าทุกตัวอย่างมีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียวโดยไม่พบการแยกเฟสและการตกตะกอนของ AgNPs ที่ชัดเจน โดยพบว่าค่า pH ของของผสมนั้นแปรผันตามปริมาณ NH_4OH โดยมีค่าเท่ากับ 10.08, 11.09 และ 11.21 ตามลำดับ และพบว่าสีของของผสมมีแนวโน้มจางลงเล็กน้อยตามปริมาณ NH_4OH ที่เพิ่มขึ้น เมื่อทดลองนำของผสมที่มีปริมาณ NH_4OH แตกต่างกันไปย้อมผ้า ก็พบว่าสีเหลืองของผ้ามีแนวโน้มจางลงเล็กน้อยตามปริมาณ NH_4OH และ pH ที่เพิ่มขึ้น แสดงดัง Fig.8 และยังพบว่าปริมาณของ NH_4OH ในของผสมนั้นมีผลต่อปริมาณ AgNPs ที่สะสมอยู่บนผ้าอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าผ้ามีสีเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดสีของผ้าตัวอย่าง แสดงดัง Fig.9 โดยพบค่า L* มีค่าความสว่างลดลง และค่า a* ซึ่งสัมพันธ์กับสีโทนแดง-เขียวนั้นก็มีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงตัวอย่างผ้ามีสีแดงเข้มขึ้น ขณะที่ค่า b* ซึ่งสัมพันธ์กับสีโทนน้ำเงิน-เหลืองนั้นกลับมีค่าคงที่ ซึ่งหมายถึงตัวอย่างผ้ามีสีเหลืองคงที่เมื่อปริมาณ NH_4OH เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสีแดงเข้มเนื่องจาก NH_4OH นั้นมีบทบาทเป็นตัวออกซิไดซ์แบบอ่อน ๆ จึงทำให้เกิดการละลายกลับของ AgNPs เป็น Ag^+ ทำให้ปริมาณ AgNPs ลดลง แต่หากเติม NH_4OH ปริมาณน้อยซึ่งจะทำให้ค่า pH ต่ำเกินไป ก็จะส่งผลทำให้ของผสมเกิดการแยกเฟสซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปย้อมผ้า และเมื่อนำตัวอย่างผ้าที่ย้อมโดยใช้ปริมาณ NH_4OH แตกต่างกันไปกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ก็พบว่ามีความเสถียรมากโดยไม่พบการหลุดของ AgNPs ในทุกตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญซึ่งการไม่ปรากฏของพีคการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่ 400 นาโนเมตร อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ AgNPs ที่ต่ำกว่าขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือ ซึ่งยืนยันได้ว่า AgNPs ยึดติดบนผ้าฝ้ายอย่า

เสถียรโดยไม่พบการหลุดอย่างมีนัยสำคัญทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือเนื่องมาจากความเข้มข้นของ AgNPs ที่หลุดออกมาอาจต่ำกว่าขีดจำกัดการวัดของเครื่องมือวัด แสดงดัง Fig.5C และผลการวัดสี จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความเสถียรของ AgNPs นั้นแปรผกผันกับปริมาณ NH_4OH ดังนั้นจึงควรใช้ NH_4OH ปริมาณน้อยที่สุดซึ่งยังไม่พบการแยกเฟสของของผสมและการตกตะกอนของ AgNPs เพื่อลดการเกิดออกซิเดชั่นและละลายกลับของ AgNPs

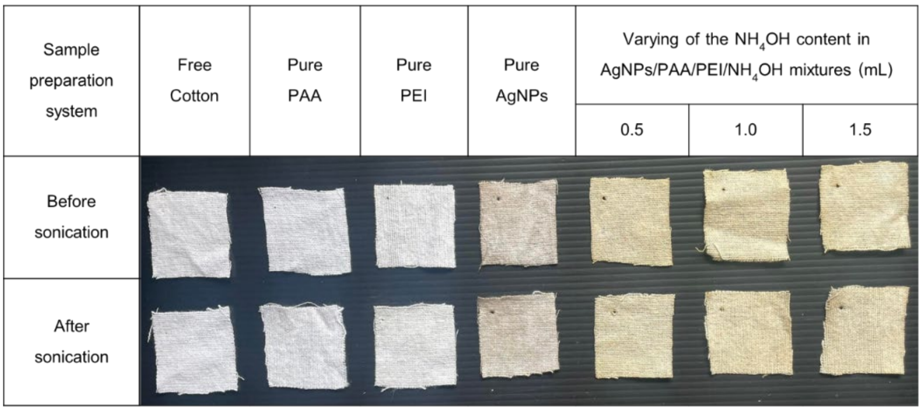


Fig. 8 The effect of varying the NH_4OH content on a stability of AgNPs-deposited cotton fabrics prepared using the mixture of PAA/PEI/NH_4OH as an immobilizer. The pictures were taken before and after ultrasonic stimulation

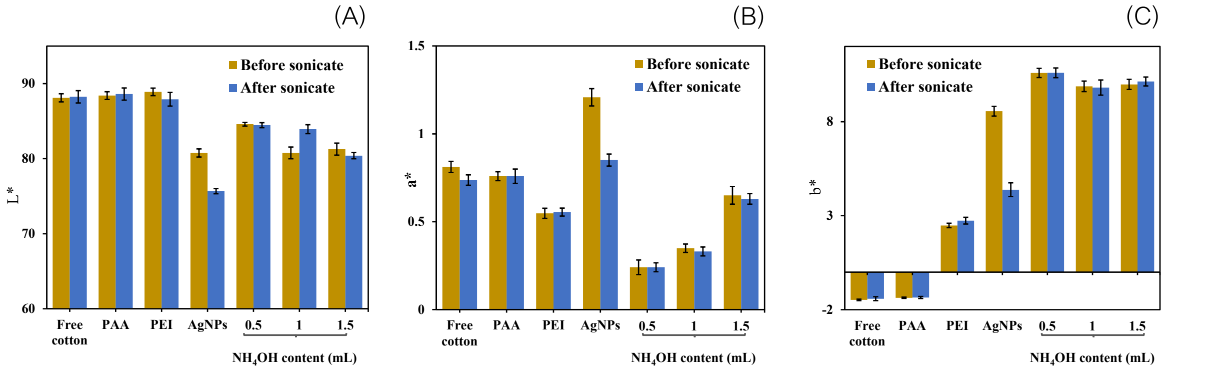


Fig. 9 The effect of varying the NH_4OH content on a stability of AgNPs-deposited cotton fabrics prepared using the mixture of PAA/PEI/NH_4OH as an immobilizer. The color coordinates L* (A), a* (B), and b* (C) of cotton fabrics before and after ultrasonic stimulation

สรุป

การใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PEI และ PAA เป็นสารตรึงนั้นช่วยให้ AgNPs ยึดติดอยู่บนผ้าฝ้ายอย่างเสถียร โดยไม่พบการหลุดของ AgNPs อย่างมีนัยสำคัญ ภายหลังการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง จึงปลอดภัยต่อผู้บริโภคกว่าการสะสม AgNPs บนผ้าฝ้ายด้วยวิธีดั้งเดิม โดยพบว่าทั้งความเสถียรของ AgNPs และปริมาณ AgNPs ที่สะสมอยู่บนผ้าฝ้ายนั้นต่างแปรผันตรงกับปริมาณ PAA ในสารตรึง แต่หากปริมาณของ PAA มากเกินไปก็อาจทำให้ความหนืดสูงเกินไปจนยากต่อการนำไปย้อมผ้าได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง ขณะที่ความเสถียรของ AgNPs นั้นกลับแปรผกผันกับปริมาณ PEI ดังนั้นจึงควรใช้ PEI ปริมาณน้อยที่สุดซึ่งยังสามารถตรึง AgNPs ให้อยู่บนผ้าได้อย่างเสถียร เพื่อลดการเกิดออกซิเดชั่นและละลายกลับของ AgNPs และยังพบอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญคือปริมาณ NH_4OH โดยพบว่าหาก pH ต่ำเกินไปจะทำให้ของผสม AgNPs/PAA/PEI เกิดการแยกเฟสและตกตะกอน โดยพบว่าความเสถียรของ AgNPs นั้นแปรผกผันกับปริมาณ NH_4OH ดังนั้นจึงควรใช้ NH_4OH ปริมาณน้อยที่สุดซึ่งยังไม่พบการแยกเฟสของของผสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ SIT6201045S และ SCI6305091b และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยประกอบวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2564 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

เอกสารอ้างอิง

Ahmad, H. (2021). Celluloses as support materials for antibacterial agents: A review. *Cellulose*, *28*(5), 2715–2761. https://doi.org/10.1007/s10570-021-03703-2

Cheng, F., Betts, J.W., Kelly, S.M., Schaller, J., Heinze, T. (2013). Synthesis and antibacterial effects of aqueous colloidal solutions of silver nanoparticles using aminocellulose as a combined reducing and capping reagent. Green Chemistry 15(4): 989. doi.org/10.1039/c3gc36831a

Dakal, T.C., Kumar, A., Majumdar, R.S., Yadav, V. (2016). Mechanistic Basis of Antimicrobial Actions of Silver Nanoparticles. Frontiers in Microbiology 7. doi.org/10.3389/fmicb.2016.01831

Hebeish, A., Abdel-Mohdy, F.A., Fouda, M.M.G., Elsaid, Z., Essam, S., Tammam, G.H., Drees, E.A. (2011). Green synthesis of easy care and antimicrobial cotton fabrics. Carbohydrate Polymers 86(4): 1684–1691. doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.086

Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S.V., Zolfaghari, B. (n.d.). Synthesis of silver nanoparticles: Chemical, physical and biological methods. 23.

Jin, R., Cao, Y., Mirkin, C.A., Kelly, K.L., Schatz, G.C., Zheng, J.G. (2001). Photoinduced conversion of silver nanospheres to nanoprisms. Science 294(5548): 1901–1903. doi.org/10.1126/science.1066541

Lee, H. Y., Park, H. K., Lee, Y. M., Kim, K., & Park, S. B. (2007). A practical procedure for producing silver nanocoated fabric and its antibacterial evaluation for biomedical applications. Chemical Communications 28: 2959. doi.org/10.1039/b703034g

Smetana, A.B., Klabunde, K.J., Sorensen, C.M. (2005). Synthesis of spherical silver nanoparticles by digestive ripening, stabilization with various agents, and their 3-D and 2-D superlattice formation. Journal of Colloid and Interface Science 284(2): 521–526. doi.org/10.1016/j.jcis.2004.10.038

ฤทธิ์ต้านทางชีวภาพของเคอร์คิวมินและเคอร์คิวมินอะนาล็อกต่อเชื้อ *Phytophthora palmivora* ที่ก่อโรคในทุเรียน

Biocidal activity of curcumin and curcumin analogue against *Phytophthora palmivora* caused disease in durian

<u>กิติยา เอกเชวง</u>[a,*], วชิราภรณ์ อาชวาคม[b], วราลักษณ์ ไชยชมภู[b], มยุรา ทองช่วง[b]

<u>Kitiya Ekchaweng</u>[a,*], Vachiraporn Ajavakom[b], Waraluck Chaichompoo[b], Mayura Thongchuang[b]

[a]สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

[b]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ 10240

[a]Division of Health and Applied Sciences, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla, 90110, Thailand

[b]Department of Chemistry, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kitiya.e@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการแยกเชื้อ *Phytophthora palmivora* จากต้นทุเรียนที่ติดโรครากเน่าและโคนเน่า ทำการสกัดสารเคอร์คิวมินจากขมิ้นชันและทำให้บริสุทธิ์ และสังเคราะห์สารเตตระไฮโดรเคอร์คิวมินด้วยปฏิกิริยาไฮโดรเจเนชันของสารเคอร์คิวมิน จากนั้นจึงทดสอบฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora* โดยผสมสารตัวอย่างในอาหาร potato dextrose agar (PDA) ที่ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม โดยใช้สารเมทาแลกซิลที่ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม และสาร 1% dimethyl sulfoxide (DMSO) เป็นชุดควบคุมผลบวกและชุดควบคุมผลลบตามลำดับ แล้ววางก้อนเชื้อเส้นใย *P. palmivora* โดยวิธี poisoned food technique ผลการทดสอบพบว่าสารเคอร์คิวมินและสารเตตระไฮโดรเคอร์คิวมินที่ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อ *P. palmivora* เท่ากับ 69.75% และ 80.86% ตามลำดับ

คำสำคัญ: เคอร์คิวมิน, เคอร์คิวมินอะนาล็อก, ทุเรียน

Abstract

In this work, *Phytophthora palmivora* was isolated from durian tree showing root and stem rot. Curcumin was extracted and purified from turmeric, while tetrahydrocurcumin (THC) was synthesized by hydrogenation reaction of curcumin. The biocidal activities of curcumin and THC against the mycelial growth of *P. palmivora* were determined. The samples were mixed with potato dextrose agar (PDA) at 250 ppm. The PDA amended with metalaxyl at 250 ppm and 1% dimethyl sulfoxide (DMSO) served as positive and negative controls, respectively. The mycelium plugs were inoculated by poisoned food technique. The results showed that curcumin and THC at 250 ppm expressed inhibitory effects on the mycelial growth of *P. palmivora* 69.75% and 80.86%, respectively.

Keywords: Curcumin, Curcumin analogue, Durian

คำนำ

ทุเรียน (*Durio zibethinus*) จัดเป็นผลไม้ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็น“ราชาของผลไม้” (วันดี, 2541; Heaton, 2006) และจัดเป็นสินค้าเกษตรเศรษฐกิจส่งออกสำคัญของประเทศไทย ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกทุเรียนมากที่สุดในโลก ในการเพาะปลูกทุเรียนเกษตรกรมักพบปัญหาเรื่องโรคและแมลงศัตรูพืชในทุกระยะของการเจริญเติบโตของพืช ปัญหาที่สร้างความเสียหายกับทุเรียนมากที่สุดโรคหนึ่ง คือ โรครากเน่า โคนเน่า และผลเน่า สาเหตุเกิดจากเชื้อ *Phytophthora palmivora* ซึ่งจัดเป็นเชื้อในดิวิชั่น Eumycota คลาส Oomycetes อาศัยในดินและในเนื้อเยื่อพืชได้เป็นเวลานาน พบแพร่กระจายอยู่ในแหล่งปลูกทุเรียนทุกภูมิภาคของประเทศไทย เนื่องจากเชื้อชนิดนี้อาศัยในดินและในเนื้อเยื่อพืชได้เป็นเวลานาน ปรับตัวให้เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมได้ดี มีการสร้างซูโอสปอร์ที่สามารถว่ายน้ำได้จำนวนมาก จึงแพร่ระบาดได้อย่างรวดเร็วและรุนแรงในฤดูฝน โดยเคลื่อนที่เข้าทางรากพืช เข้าทำลายต้นทุเรียนได้ทุกส่วน ทุกสายพันธุ์และทุกระยะการเจริญเติบโตของพืช เป็นสาเหตุให้ต้นทุเรียนยืนต้นตายทุกปี ส่งผลให้ผลผลิตลดลง วิธีการป้องกันและกำจัดโรคของเกษตรกรที่นิยมใช้ คือ การใช้สารเคมีประเภท etridiazole, fosetyl-Al, phosphonic, และ metalaxyl (รัติยา, 2536; Ferrin and Kobashima, 1991) แม้ว่าสารเคมีจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อสูงแต่หากใช้สารเคมีติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน มักพบปัญหาเรื่องการดื้อยาของเชื้อ โดยมีการรายงานพบการดื้อยา metalaxyl ต่อเชื้อ *P. palmivora* ในประเทศไทยมากขึ้น (Kongtragoul et al., 2021) จึงทำให้เกษตรกรต้องเพิ่มปริมาณการใช้สารเคมี หรือใช้สารเคมีที่มีความรุนแรงมากขึ้น สารเคมีบางชนิดมีราคาสูงเนื่องจากนำเข้าจากต่างประเทศส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้น สารเคมีตกค้างหลงเหลืออยู่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ผลิต ผู้บริโภค และสิ่งแวดล้อม การหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมาตรฐานสินค้าทางการเกษตรให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค มีการรายงานถึงประสิทธิภาพของสารสกัดหยาบจากขมิ้นชันด้วยเอทานอลสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora* ได้ 100% ที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ 15,000 พีพีเอ็ม (วาสินี และคณะ, 2560) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาหาชนิดสารสำคัญจากขมิ้นชัน โดยทำการสกัดและทำบริสุทธิ์สารเคอร์คิวมินอยด์ซึ่งเป็นสารสำคัญในขมิ้นชัน และสังเคราะห์อนุพันธ์เคอร์คิวมิน เพื่อตรวจสอบฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora*

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

คลอรอกซ์, โซเดียมไฮโปรคลอไรด์, ไดคลอโรมีเทน, ไดเมทิลซัลฟอกไซด์, ทริปแพนบลู, เมทานอล, เมทาแลกซิล, แลกโตกลี เซอรอล, เอทิลอะซิเตต, เอทธานอล, แอมพิซิลลิน, เฮกเซน

การเตรียมสารเคอร์คิวมินอยด์

นำสารสกัดส่วนหัวจากสมุนไพรขมิ้นชัน มาทำการแยกด้วยคอลัมน์โครมาโทรกราฟี โดยใช้ตัวดูดซับเป็นซิลิกาเจล ใช้ตัวชะ (eluent) เริ่มจาก เฮกเซน-ไดคลอโรมีเทน, ไดคลอโรมีเทน, ไดคลอโรมีเทน-เมทานอล โดยเพิ่มการละลายด้วยตัวทำละลายที่มีขั้วมากขึ้น ตรวจสอบส่วนที่ออกมาจากคอลัมน์ (eluates) ด้วยโครมาโทกราฟีแผ่นบาง (thin layer chromatography, TLC) รวมกลุ่มสารที่ออกมาที่มีจุดของสาร (spot) บน TLC คล้ายคลึงกัน ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารเคอร์คิวมินอยด์ที่ได้โดยเทคนิค Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy ด้วยเครื่อง Bruker AVANCE 400 spectrometer ที่ให้ค่า chemical shift (δ_H และ δ_C) ในหน่วยพีพีเอ็ม (ppm, ส่วนต่อล้านส่วน)

การเตรียมสารประกอบเตตระไฮโดรเคอร์คิวมิน (Tetrahydrocurcumin, THC)

การทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) กับสารประกอบเคอร์คิวมิน นำสารประกอบเคอร์คิวมินความเข้มข้น 2.71 มิลลิโมล ปริมาณ 1,000 มิลลิกรัม ละลายด้วยเอทานอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมตัวเร่งปฏิกิริยา palladium บนวัสดุรองรับ charcoal Pd-C ปริมาณ 200 มิลลิกรัม จากนั้นจึงทำการไล่แก๊สออก (degassing) โดยให้ของผสมนี้ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 4 h นำของผสมมากรองผ่านซีไลต์ (Celite) และระเหยตัวทำละลายออก นำสารที่ได้มาทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการคอลัมน์โครมาโตกราฟี ด้วยการใช้ตัวชะเป็น 35% เอทิลอะซิเตต/เฮกเซน ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของเคอร์คิวมินอะนาล็อกที่สังเคราะห์และทำบริสุทธิ์ได้โดยเทคนิค Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopyด้วยเครื่อง Bruker AVANCE 400 spectrometer ที่ให้ค่า chemical shift (δ_H และ δ_C) ในหน่วยพีพีเอ็ม

การเก็บตัวอย่างโรคและคัดแยกเชื้อ P. palmivora ที่ก่อโรคในทุเรียน

เก็บตัวอย่างใบและผลทุเรียนจากต้นทุเรียนที่เป็นโรคจากแปลงทุเรียนในจังหวัดสงขลา แยกเชื้อ *P. palmivora* ให้บริสุทธิ์ โดยวิธี tissue transplanting โดยวิธีการดัดแปลงจากวิธีของ Tuite (Tuite, 1969) ตัดชิ้นส่วนที่เกิดโรคโดยใช้มีดผ่าตัดที่ผ่านการฆ่าเชื้อให้มีขนาด 5 × 5 มิลลิเมตร แช่ในโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 นาน 4 นาที จากนั้นนำไปล้างในน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ 2 ครั้ง ใช้ปากคีบชิ้นส่วนที่ทำการฟอกฆ่าเชื้อแล้ววางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar (PDA) บ่มที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นใช้เข็มเขี่ย (needle) เขี่ยเส้นใยเชื้อวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ V8 selective medium agar ที่ผสมสาร antibiotics (ampicillin 200 มิลลิกรัม และrifamycin 10 มิลลิกรัม) บ่มเพลทที่อุณหภูมิ 25 °C ในที่มืดเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นจึงทำการแยกเชื้อ *P. palmivora* ให้บริสุทธิ์โดยวิธี hypha tip isolation โดยใช้ cork border ตัดวุ้นบริเวณปลายเส้นใยที่มีการเจริญของเชื้อ และใช้เข็ม (needle) เขี่ยวุ้นที่มีเส้นใยวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ selective V8 agar บ่มที่อุณหภูมิ 25 °C ในที่มืดเป็น 7 วัน จากนั้นจึงนำเส้นใยเชื้อบริสุทธิ์นำไปเลี้ยงบนอาหาร potato dextrose agar (PDA) และ V8 agar บ่มที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 7 วัน ตรวจสอบลักษณะของโคโลนีเส้นใยบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 2 ชนิด และตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ mycelium และ sporangium โดยนำชิ้นวุ้นมาย้อมเส้นใยด้วย 0.05% trypan blue ในสารละลาย lactoglycerol ตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิด compound light microscopy จำแนกโดยคู่มือ (Stamps and Waterhouse, 1990)

การทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อ P. palmivora โดยวิธีเด็ดใบ (detached leaf bioassay)

ทำการปลูกเชื้อเพื่อทำการทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อ *P. palmivora* ที่แยกและทำบริสุทธิ์ได้โดยการคัดเลือกใบทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองระยะเพสลาด นำใบมาล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างฆ่าเชื้อที่บริเวณผิวใบโดยการแช่ใบในน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อที่ผสมสารโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1% เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นล้างใบด้วยน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อ 2 ครั้ง แล้วซับใบให้แห้ง ใช้เข็มเขี่ยที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วมาทำแผลบนกลางใบทั้งสองด้าน ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร จากนั้นปลูกเชื้อโดยวิธี artificial inoculation technique โดยนำ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ตัดปลายเส้นใยของเชื้อ *P. palmivora* ที่เลี้ยงในอาหาร PDA agar อายุ 7 วัน วางชิ้นวุ้นคว่ำลงบนบริเวณใบที่ทำแผล และใช้ชิ้นวุ้นอาหาร PDA agar วางบนบริเวณใบที่ทำแผลให้เป็นชุดควบคุมผลลบ จากนั้นจึงนำใบทุเรียนวางในเพลทที่ผ่านการฆ่าเชื้อ และใช้ก้อนสำลีชุบน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ววางในเพลทเพื่อให้ความชื้น บ่มเพลทไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 3 วัน บันทึกขนาดและลักษณะแผลที่เกิดขึ้นบนใบทุเรียน

การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเส้นใยของเชื้อ P. palmivora โดยวิธี Poisoned food technique

ทำการทดสอบฤทธิ์ของสารเคอร์คิวมินอยด์ และเคอร์คิวมินอะนาล็อกต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora* โดยแบ่งออกเป็น 3 กรรมวิธี ๆ ละ 3 ซ้ำ คือ 1) 1% (v/v) DMSO 2) สารทดสอบ 250 พีพีเอ็ม 3) metalaxyl 250 พีพีเอ็ม โดยนำเชื้อ *P. palmivora* อายุ 7 วัน มาทดสอบด้วยวิธี poisoned food technique (Pundir and Jain, 2010) นำสารทดสอบแต่ละชนิดละลายใน 1% (v/v) DMSO ผ่านการกำจัดเชื้อด้วยการกรองผ่านกระดาษกรอง 0.22 ไมครอน มาผสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA จนได้ระดับความเข้มข้นตามที่กำหนด จากนั้นเทอาหารเลี้ยงเชื้อลงในจานเพาะเชื้อปริมาตร 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้จนอาหารแข็ง นำเชื้อ *P. palmivora* ที่เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA อายุ 7 วัน ใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อ ตัดบริเวณขอบนอกของเส้นใย แล้วย้ายไปวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่ผสมสารทดสอบที่เตรียมไว้ นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 °C จนเส้นใยของเชื้อ *P. palmivora* ในชุดควบคุมผลลบ (negative control) เจริญเต็มจานเลี้ยงเชื้อ จึงวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อที่เจริญบนอาหาร เปรียบเทียบกับชุดควบคุมผลลบเป็นเชื้อ *P. palmivora* ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผสม 1% (v/v) DMSO และชุดควบคุมผลบวกเป็นเชื้อ *P. palmivora* ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผสม metalaxyl ที่ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม บันทึกผลการทดลอง และคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเชื้อดัง Equation 1:

$$P = \frac{(C-T)}{C} \times 100 \quad (1)$$

โดย P คือ เปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเส้นใยของเชื้อ *P. palmivora*

C คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีเชื้อ *P. palmivora* บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุมผลลบ (มิลลิเมตร)

T คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีเชื้อ *P. palmivora* บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อชุดทดลอง (มิลลิเมตร)

ผลและวิจารณ์การทดลอง

จากการสกัดและทำบริสุทธิ์สารจากขมิ้นชัน ได้สารเคอร์คิวมินอยด์ที่บริสุทธิ์ 3 ชนิด คือ 1). เคอร์คิวมิน (Curcumin, Cur) 68%, 2). ดีเมทอกซีเคอร์คิวมิน (Demethoxycurcumin, Dmc) 17% และ 3).บิสดีเมทอกซีเคอร์คิวมิน (Bisdemethoxycurcumin, Bdmc) 3% ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 1 และจากการสังเคราะห์สารเคอร์คิวมินอะนาล็อก ด้วยการนำเคอร์คิวมินมาทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเตตระไฮโดรเคอร์คิวมิน (Tetrahydrocurcumin, THC) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ปริมาณ 607 มิลลิกรัม คิดเป็น 60% แสดงดัง Fig. 2

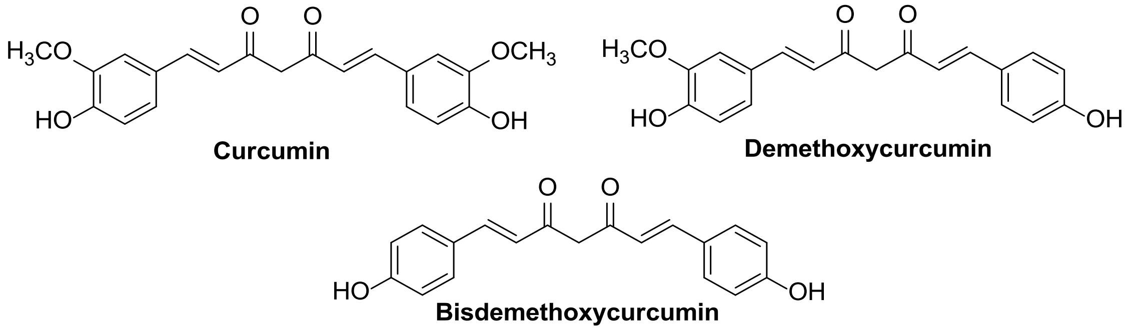


Fig. 1 Chemical structure of curcuminoids extracted and purified from turmeric extract

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์สารเคอร์คิวมินอยด์โดยเทคนิค NMR spectroscopy ดังนี้

^{1}H NMR (400MHz, $CDCl_3$) δ 7.57 (2H, d, *J* = 15.8 Hz, Ar-C*H*=CH), 7.10 (2H, d, *J* = 8.3 Hz, ArH), 7.03 (2H, s, ArH), 6.91 (2H, d, *J* = 8.0 Hz, ArH), 5.86 (2H, s, COCH_2CO), 3.92 (6H, s, OCH_3).

^{13}C NMR (100MHz, $CDCl_3$) δ 183.3 (C=O), 147.8 ($C_{Ar}OCH_3$), 146.8 ($C_{Ar}OH$), 140.5 (CH_{Ar}), 127.7 (C_{Ar}), 122.9 (CH_{Ar}), 121.8 (CH_{Ar}), 114.8 (Ar-$CH_=$CH), 109.6 (Ar-$CH_=$*CH*), 101.2 (CO*C*H_2CO), 55.9 (OCH_3).

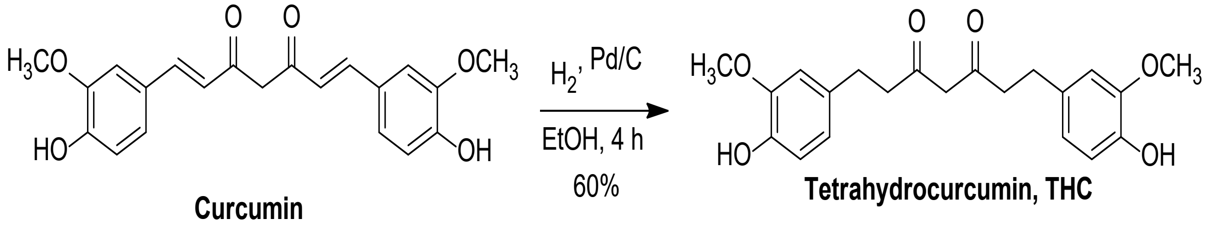


Fig. 2 Chemical synthesis reaction of tetrahydrocurcumin (THC)

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์สารประกอบเตตระไฮโดรเคอร์คิวมิน โดยเทคนิค NMR spectroscopy ดังนี้

^{1}H NMR (400MHz, $CDCl_3$+ CD_3OD) δ 6.80 (2H, d, *J* = 7.6 Hz, ArH), 6.66 (4H, s, ArH), 5.5 (2H, s, 2•ArOH), 5.4 (1H, s, COCHCO), 3.84 (6H, s, 2•OCH_3), 2.83 (4H, t, *J* = 7.6 Hz, $PhCH_2CH_2CO$), 2.53 (4H, t, *J* = 7.6 Hz, $PhCH_2CH_2CO$).

^{13}C NMR (100MHz, $CDCl_3$+ CD_3OD) δ 193.2 (2•$CHCOCH_2$), 143.4 (2•$C_{Ar}OCH_3$), 135.7 (2•$C_{Ar}OH$), 132.5 (2•C_{Ar}), 120.8 (2•CH_{Ar}), 114.3 (2•CH_{Ar}), 110.9 (2•CH_{Ar}), 99.8 (COCHCO), 55.8 (2•OCH_3), 40.3 (2•CH_2CH_2CO), 31.3 (2•$PhCH_2CH_2$).

ESMS (-ve): m/z (% rel. intensity) 371.4 $[M-H]^+$ (100).

เชื้อ *Phytophthora* sp. ที่แยกได้จากตัวอย่างใบและผลทุเรียนที่แสดงอาการผลเน่า ในแปลงทุเรียน อ.สะเดา จังหวัดสงขลา แสดงดัง Fig. 3 พบว่าเมื่อทำการเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่อุณหภูมิ 25 °C นาน 7–10 วัน มีลักษณะของโคโลนีกลม มีเส้นใย (mycelium) สีขาว และเมื่อเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ V8 selective medium agar ที่อุณหภูมิ 25 °C นาน 7 วัน พบว่ามีการสร้างอวัยวะสืบพันธุ์ คือ sporangium และ chlamydospore โดย sporangium มีรูปร่างแบบ elongate elliptical ขนาดประมาณ 20 ไมโครเมตร จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาสามารถระบุได้ว่าเชื้อ *P. palmivora* ที่แยกได้จาก ต้นทุเรียนที่แสดงอาการโรครากเน่า โคนเน่า และผลเน่า คือเชื้อ *P. palmivora* แสดงดัง Fig. 4

Fig. 3 Natural symptoms of (A) leaf blight and (B) fruit rot samples caused by *P. palmivora*

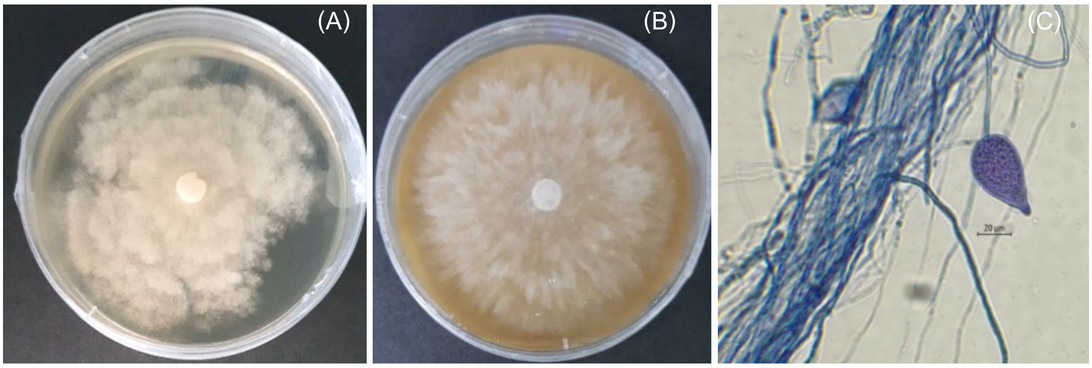


Fig. 4 Mycelial growth of *P. palmivora* on culture media agar plates: (A) PDA agar (B) V8 juice agar and (C) *P. palmivora* sporangium visualized under microscope compound light microscopy (scale bar = 20 μm)

ผลการทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อ *P. palmivora* ที่ทำบริสุทธิ์ได้ ในใบทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองระยะเพสลาดโดยวิธีเด็ดใบ (detached leaf bioassay) พบว่าหลังจากปลูกเชื้อระยะเวลา 1 วัน ปรากฏแผลช้ำเน่าสีน้ำตาลบริเวณตำแหน่งรอยแผลบนใบทุเรียน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และหลังจากวันที่ 3 พบว่าแผลมีขนาดใหญ่และลุกลามไปตามเส้นใบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 25 มิลลิเมตร แสดงดัง Fig. 5

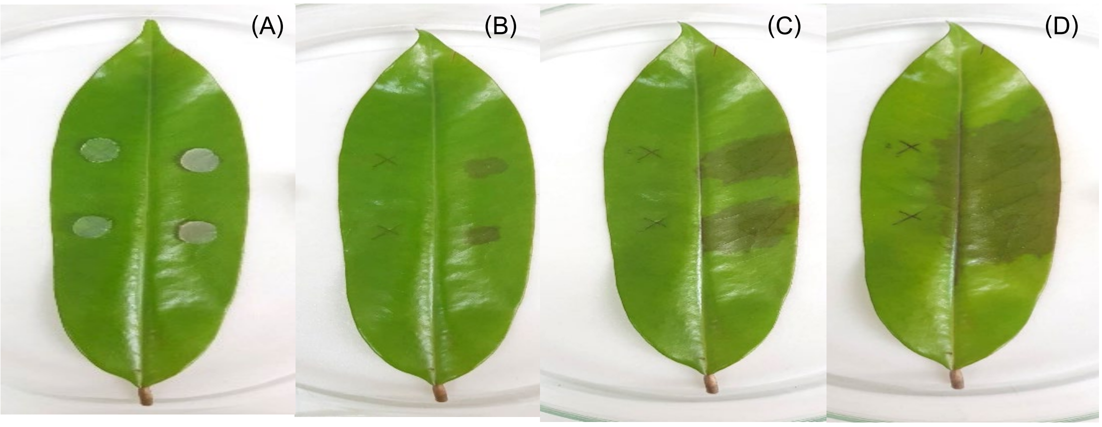


Fig. 5 Pathogenicity test of *P. palmivora* on the detached Monthong durian leaf for 3 days after inoculation. The growth of necrotic lesion diameter was observed for 3 days of incubation: (A) at 0-day post inoculation (dpi) (B) at 1-dpi (C) at 2-dpi (D) at 3-dpi, respectively

จากการทดสอบประสิทธิภาพของพบสารเคอร์คิวมิน และสารเตตระไฮโดรเคอร์คิวมินต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora* ที่ระดับความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม พบว่า สารเคอร์คิวมิน และสารเตตระไฮโดรเคอร์คิวมินมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora* เท่ากับ 69.75% และ 80.86% ตามลำดับ ในขณะที่สารเมทาแลกซิลที่ระดับความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *P. palmivora* ได้ 100% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม แสดงดัง Fig. 6 ผลการทดลองนี้สอดคล้อง

กับผลการทดลองของ วาสินี และคณะ (2560) ที่ได้รายงานถึงประสิทธิภาพของสารสกัดหยาบขมิ้นชันด้วยเอทานอลที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora* ได้ 100% ที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ 15,000 พีพีเอ็ม

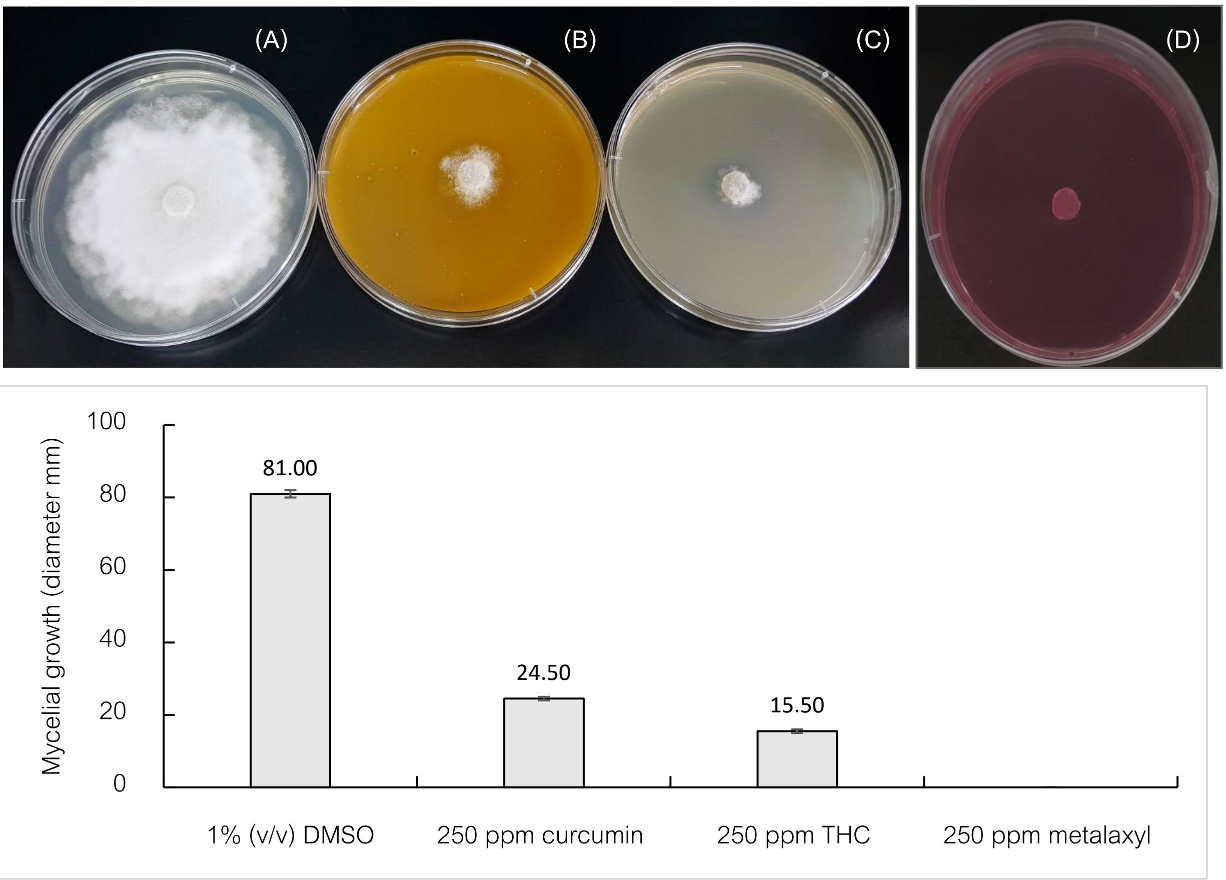


Fig. 6 *In vitro* antioomycete activities of curcumin and THC against *P. palmivora* on a solid medium. Upper panel: Growth of *P. palmivora* 11days after inoculation onto (A) PDA agar amended with 1% (v/v) DMSO (negative control); (B) 250 ppm curcumin; (C) 250 ppm THC; (D) 250 ppm metalaxyl (positive control), respectively. Lower panel: Average diameter (±SD) of mycelia after 11 days of growth on each treatment. Each diameter represents a mean value of three replicate plates

สรุป

จากการทดลองพบว่าสารเคอร์คิวมินซึ่งเป็นสารสำคัญในขมิ้นชันและสารเตตระไฮโดรเคอร์คิวมินซึ่งเป็นสารเคอร์คิวมินอะนาล็อกที่ระดับความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. palmivora* เท่ากับ 69.75% และ 80.86% ตามลำดับ ในขณะที่สารเมทาแลกซิลที่ระดับความเข้มข้น 250 พีพีเอ็มมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *P. palmivora* ได้ 100% ผลการวิจัยนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญในการระบุชนิดของสารสำคัญในขมิ้นชัน รวมถึงชนิดของสารเคอร์คิวมินอะนาล็อกที่มีฤทธิ์ที่ดีในการยับยั้งเชื้อ *P. palmivora* ข้อมูลที่ได้ในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญในการพัฒนาสารป้องกัน หรือกำจัดเชื้อก่อโรคในคลาส Oomycetes จากสารสำคัญในสมุนไพรไทย เพื่อเพิ่มทางเลือกให้แก่เกษตรกรในการลดปัญหาการพึ่งพาสารเคมีนำเข้าจากต่างประเทศ และลดอันตรายจากพิษของสารเคมีต่อเกษตกร ผู้บริโภค และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับขมิ้นชันซึ่งเป็นสมุนไพรไทยอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินกองทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2565 (Faculty of Science Research Fund) สัญญาเลขที่ SCIDEV64003

เอกสารอ้างอิง

รัติยา พงศ์พิสุทธา. 2536. โรคผลเน่าของทุเรียนที่เกิดจากเชื้อรา *Phytophthora palmivora* (Butl.) Butl. และการควบคุม. เคหการเกษตร 17(5): 31–38.

วันดี กฤษณพันธ์. 2541. สมุนไพรน่ารู้, พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

วาสินี ธรรมสถิต, สุจิตรา สุคนธมัต, ดุษณี ธนะบริพัฒน 2560. การคัดเลือกสมุนไพรที่มีฤทธิ์ควบคุมเชื้อรา *Phytophthora sp.* ที่แยกจากทุเรียนในจังหวัดจันทบุรี และจังหวัดชุมพร. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 26(2): 1–14.

Ferrin, D.M., Kabashima, J.N. 1991. Invitro insensitivity to metalaxyl of isolates, of *Phytophthora citricola* and *P. parasitica* from ornamental host in southern California. Plant Dis. 75: 1041–1044.

Heaton, D.D. 2006. A consumers guide on world fruit. BookSurge Publishing. pp. 54–56.

Kongtragoul, P., Ishikawa, K., Ishii, H. 2021. Metalaxyl resistance of *Phytophthora palmivora* causing durian diseases in Thailand. Horticulturae 7(10): 375.

Pundir, R.K., Jain, P. 2010. Antifungal activity of twenty-two ethanolic plant extracts against food associated fungi. J. Pharma. Res. 3(1): 506–510.

Stamps, D.J., Waterhouse, G.M. 1990. Revised tabular key to the species of *Phytophthora* (2nd ed.). CAB International Mycological Institute, Cabi, CABI.

Tuite, J. 1969. Plant pathological methods: Fungi and bacteria. Burgess Publishing Company. University of Minnesota Press.

Arm and trunk skeletal muscle percentages negatively correlated to body fat in metabolic syndrome subjects

Linn Minn Oo[a], Sirinapa Thangsiri[a], Chaowanee Chupeerach[a,*], Nattira On-nom[a], Attasak Jaree[b], Uthaiwan Suttisansanee[a]

[a]Food and Nutrition Academic Research Cluster, Institute of Nutrition, Mahidol University, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170, Thailand

[b]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. Email address: chaowanee.chu@mahidol.ac.th

Abstract

Metabolic syndrome (MS) is a disorder characterized by a cluster of metabolic abnormalities such as insulin resistance, hyperglycemia, dyslipidemia, central obesity and hypertension. Lower skeletal muscle mass is reported to be associated with increased risk of life-style related metabolic diseases due to marked insulin resistance and central obesity. This study investigated skeletal muscle percentage as a biomarker in 15 MS subjects compared to 10 subjects without MS (control) according to IDF criteria of MS Anthropometric assessments (Body weight and height, body fat, visceral fat and skeletal muscle mass percentage) were done to total of 25 participants by the body composition monitor. The metabolic characteristics of participants were compared using the Mann-Whitney U test and the spearman's rho test was used for correlation analysis. The results showed that MS subject had a lower level of muscle mass than control and skeletal muscle had negatively correlated with body fat. The feasibility of decreased arm and trunk skeletal muscle percentages as a marker or predictor of increased body fat in MS could be observed by multiple linear regression analysis. Further studies using larger sample size should generate more accurate results.

Keywords: Biological marker, Cardiovascular disease, Gender influence

Introduction

Metabolic syndrome (MS) is a pathophysiological condition consisting of visceral obesity, hyperglycemia, hypertension, and dyslipidemia, leading to the major risk for development of cardiovascular disease (CVD), type 2 diabetes mellitus (2DM) and lifestyle disturbances (Grundy et al., 2004). Metabolic disturbances such as visceral adiposity and insulin resistance (IR) are most common etiologic factors for developing MS (Despres et al., 2006). Early detection of MS and lifestyle modification can reduce medical cost and promote better quality of life in addition to CVD associated morbidity and mortality (Grundy, 2006).

Recently, several studies have suggested that the loss of skeletal muscle mass could contribute to metabolic disease because skeletal muscle had the role as an endocrine organ. Muscle-derived secretory proteins, referred to as myokines, can interact between skeletal muscle mass and other organs that related to human metabolism such as the liver, adipose tissue, and the heart and blood system (Kim et al., 2018). They also found the skeletal muscle mass related to body weight was negatively associated with high waist circumference (Park BS, 2013). In the epidemiological studies have found that in older adults, muscle mass was predicted as associated with lower all-cause mortality (Spahillari et al., 2016). In cross-sectional data have also reported that adults in the lowest quartile for muscle mass increased cardiovascular risk (Kim Y et al., 2015). Mechanisms of skeletal muscle that related to sarcopenia and affect MS including, insulin resistance (Nomura K, 2020). Therefore, herein, we focus on the relationships between skeletal muscle mass and metabolic diseases, especially in MS.

Materials and Methods

Subjects and Study Design

This case-control study compared the skeletal muscle percentage in 25 subjects. 15 subjects met the MS criteria while 10 subjects had no previous history of MS. Subjects in both groups were matched by age and sex (11 female, 14 male). The MS criteria were used according to the International Diabetes Federation, 2006 (IDF) as follows. Central obesity (waist circumference; men ≥ 90 cm, women ≥ 80 cm) plus any two of the following criteria: elevated blood pressure (≥ 130/85 mm Hg), elevated fasting glucose (≥ 100 mg/dl), elevated triglyceride (≥150 mg/dl), reduced high-density lipoprotein cholesterol (HDL in men < 40 mg/dl and women <50 mg/dl). Subjects who received drugs for treatment of these criteria were considered as belonging to the MS group. The exclusion criteria for study subjects were having hair cosmetics at least three months before the sample collection, pregnancy, having any type of scalp and skin diseases, having abnormality in nutrient digestion, absorptions, chronic inflammatory diseases, MS complications, any serious diseases such as cardiovascular disease, liver disease, renal disease, cancer, rheumatoid arthritis, or any viral infectious diseases.

Anthropometric assessment and body compositions

All subjects were assessed by means of anthropometric measurements. Body weight, percentage of body fat and visceral fat and skeletal muscle mass percentage of each individual dressed in light clothing were measured using an Omron body composition monitor (HBF375, Omron Health Care, Tokyo, Japan). Height was measured to the nearest 0.1 cm using a stadiometer (Stanley-Mabo Ltd., France); body mass index (BMI; kg/m^2) was calculated as weight divided by the square of the height.

Biochemical assessment

Blood chemistry data (fasting plasma glucose and lipid profiles) were retrieved from the routine yearly medical check-up project at the Institute of Nutrition, Mahidol University. Fasting blood samples were collected intravenously by a registered medical technologist, while blood glucose and lipid profiles were measured at the Faculty of Medical Technology, Mahidol University.

Statistical analysis

The mean and standard deviation of characteristic in the MS and control groups of participants were compared using the Mann-Whitney U test. The spearman 's rho test was use for correlation analysis. Linear multiple variable regression with enter technique was used for the prediction model. To determine significant differences between values, $p < 0.05$ was used. All statistical analyses were performed by SPSS version 18 (Statistical Package for the Social Sciences, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Ethical approval

The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by Mahidol University Central Institute Review Board (COA no. MU-CIRB 2020/048.0141.

Results and Discussion

The metabolic characteristics of the study subjects

In this study, 25 subjects included 15 with MS and 10 without (control group), with characteristics reported in Table 1. Anthropometric assessment (weight, BMI and waist circumference), blood pressure, biochemical assessment (fasting glucose and lipid profiles) and body composition (body and visceral fats) were analyzed for MS factors. Ages were similar in the MS and control groups, with significantly higher levels of MS criteria including weight, BMI, waist circumference, systolic and diastolic blood pressures, fasting plasma glucose and triglyceride observed in MS subjects. Obesity markers as body fat and visceral fat were also higher in MS subjects but HDL and low-density lipoprotein (LDL) levels were insignificantly different between the two groups, indicating non-associated factors for MS criteria.

Table 1 The Metabolic characteristics of the study subjects

Characteristics	Without MS (n = 10)	MS (n = 15)	p-value
Age (years)	39±7	39±10	0.967[ns]
Sex			
Weigh (kg)	68.4±11.7	89.8±13.9	<0.001**
BMI (kg/m^2)	25.2±5.6	32.1±5	0.004*
Waist circumference (cm)	86.8±11.9	103.1±11.9	0.005*
Systolic blood pressure (mmHg)	118±14	140±19	0.002*
Diastolic blood pressure (mmHg)	82±9	93.±14	0.008*
Fasting plasma glucose (mg/dl)	91.6±7.5	114.7±20.0	<0.001**
Triglyceride (mg/dl)	95.8±48.2	164.8±66.3	0.003*
HDL (mg/dl)	53.7±12.0	47.2±11.8	0.145[ns]
LDL (mg/dl)	108.43±28.6	114.20±34.9	0.624[ns]
Body fat (%)	28.7±9.3	35.4±5.2	0.021*
Visceral fat (%)	9.2±6.7	17.2±7.3	0.004*

All data are shown as mean ± standard deviation (SD). The Mann-Whitney test was used with statistical significance at p-value < 0.05. [ns] no significance was seen at p-value <0.05. * Significance was seen at p-value <0.05. ** Significance was seen at p-value <0.001. BMI: body mass index; HDL: high-density lipoprotein; LDL: low-density lipoprotein.

Association between skeletal muscle percentages and Metabolic Syndrome (MS)

Low skeletal muscle mass that could be related to protein synthesis were recently reported as risk factors for MS. Therefore, this study observed skeletal muscle percentage using the bioelectric impedance analysis (BIA) method (HBF375, Omron Health Care, Tokyo, Japan), calculated as the percentage of skeletal muscle mass and weight ratio (Table 2). Skeletal muscle mass percentages were compared for whole body, trunk, arm and leg. Male subjects had significantly higher skeletal muscle mass percentages than females, both with MS and in the control group. Both genders with MS exhibited lower values in all skeletal muscle mass parameters than the control group but the values were not statistically different. However, significantly lower whole body and trunk muscle mass levels in males with MS were observed than in the control group, while insignificant differences in all muscle masses were detected between the groups of female subjects.

Table 2 Skeletal muscle percentage of the study subjects with metabolic syndrome (MS) and the control group (without MS)

Skeletal Muscle Percentage	Male*			Female		
	Control (*n* = 7)	MS (*n* = 7)	*p*-value	Control (*n* = 3)	MS (*n* = 8)	*p*-value
Whole Body	32.5±2.7	28.3±2.3	0.017	23.81±2.3	23.3±2.0	0.959
Trunk	26.1±3.5	19.8±3.0	0.007	17.5±3.0	16.13±2.0	0.505
Arm	36.9±5.0	33.9±1.8	0.053	22.9±5.5	19.2±4.3	0.195
Leg	49.2±3.8	45.8±2.2	0.073	37.4±1.8	36.3±3.6	0.798

All data are shown as mean ± standard deviation (SD). The Mann-Whitney test was used with statistical significance at p-value < 0.05. * Significant difference was observed between MS and control groups in males' subjects.

The correlation of skeletal muscle percentage and visceral and body fat in subjects

Because a small number of gender, the association between body fat and skeletal muscle in subject groups was analyzed without separated gender. The results of the correlation of visceral fat and skeletal muscle percentage in the study subjects are shown in (Table 3) as there was significantly negative association between each area of skeletal muscles (whole body, trunk, arm and leg) and body fat. However, no significant correlation of visceral fat and skeletal muscles were observed in both without or with MS subjects. This can be due to nature of higher skeletal muscle mass composition in male subjects compared to female and visceral and body fat mass were also associated with loss of skeletal muscle and vice versa.

Table 3 The correlation of body fat, visceral fat, and skeletal muscle percentage in the study subjects.

Skeletal Muscle Percentage	body fat		visceral fat	
	Control (*n* = 10)	MS (*n* = 15)	Control (*n* = 10)	MS (*n* = 15)
Whole Body	-.951*	-.895*	-.352	-.039
Trunk	-.987*	-.970*	-.453	-.-271
Arm	-.988*	-.920*	-.468	-.048
Leg	-.861*	.739*	-.141	.224

Spearman 's rho test was used with statistical significance at *p*-value < 0.05. *Significant was observed at *p*-value < 0.05. A multiple regression was run to predict body fat from each part of skeletal muscle mass percentage with age, and related anthropometric variables including, BMI and waist circumference in MS groups (Table 4). In MS group, these variables statistically significantly predicted body fat, F = 176.56, $p <$ .0005, R^2 = 0.989. Body fat could be decreased with increased of trunk and arm skeletal mass levels. In without MS group, no significant was observed between the prediction of all skeletal mass percentage to body fat (data did not showed).

Table 4 The multiple regression of body fat prediction by skeletal muscle percentage the MS subjects.

Model (MS group)	Unstandardized		Standardized Coefficients	t	*p*-value
	B	SE	B		
Age (years)	.001	.022	.003	.068	.948
BMI (kg/m^2)	-.034	.059	-.033	-.578	.581
WC (cm)	.059	.025	.135	2.356	.051
Skeletal muscle percentage					
Whole Body	.365	.311	.231	1.174	.279
Trunk	-1.414	.248	-.835	-5.710	.001*
Arm	-.312	.097	-.497	-3.224	.015*
Leg	.053	.058	.058	.909	.394
Constant	52.231	3.815		13.691	.000*

Dependent variable: body fat, BMI; body mass index (kg/m^2), WC; waist circumference. Significant was observed at *p*-value < 0.05.

In the present study, MS comprises a group of metabolic disorders including central obesity, hyperglycemia, insulin resistance, dyslipidemia and hypertension that increase the risk of cardiovascular diseases. Male subjects had significantly higher skeletal muscle mass percentages than females, both with MS and in the control group. Both genders with MS exhibited lower values in all skeletal muscle mass parameters than the control group but the values were not statistically different.

In body protein synthesis, skeletal muscle is regarded as a muscle storage organ. Skeletal muscle mass is related to other organs such as the liver, adipose tissue, bone and the cardiovascular system. Muscle loss could be a risk factor for MS (Kim et al., 2015, Kim, 2020, Nomura, 2020). The relationship between decreased muscle mass and MS was evaluated in our study. MS subjects possessed lower muscle mass than the control group in both genders. Skeletal muscle mass loss can induce insulin resistance and increase lipolysis, consequently releasing free fatty acids from adipose tissue, inhibiting growth hormone/insulin growth factor-1 and resulting in decreased muscle regeneration (Kim et al., 2018).

Some study reported that the intervention of muscle mass in older adulthood may be useful for reducing the risk of MS and improving cardiovascular system (Nomura, 2020). In the present study, skeletal muscle percentage negatively related to body fat. This could be similar to previous study that reported the high ratio of fat to muscle increase the risk of 2DM and MS (Wang, 2019; Tanaka, 2020).

This study demonstrated the skeletal muscle percentage to indicate abnormal metabolic changes such as MS. After multiple regression analysis, skeletal muscle mass percentage including; trunk and arm parts could predict for body fat level only in MS with including age, BMI and waist circumference in the analysis. Feasibility of skeletal muscle mass level on MS pathology could be observed in this study. MS pathology such as insulin resistance, hypertension and dyslipidemia impact amino acid metabolism in the liver, which in turn

affects protein synthesis and consequently reduces skeletal muscle percentage contents. Plasma amino acids have previously been used as biological markers for metabolic disorders (Wang et al., 2015; Siomkajlo 2017) which skeletal muscle mass contents could relate in amino acid metabolism by the protein synthesis part. Then they could be possible to assessed as indicators of metabolic diseases. This report could be used as a pilot study to guide and plan a more completed future research. With several concerning points including small sample size of female control group, statistical significance, physical activity data, the results obtained here should be re-examined for further evaluations.

In summary, the feasibility of skeletal muscle percentage on MS risk could be reported in this preliminary exploration. This study demonstrated that skeletal muscle mass could be related to a potential biological marker or predictor for metabolic disorder. For the concerning points, the analysis of small sample size in female control group by non-parametric test could be less efficient as compared to parametric test. Additionally, biochemical parameters including kidney or liver functions as inflammatory markers could also be associated with skeletal muscle percentage and MS pathology.

Conflict of Interest

The author declares that there are no conflicts of interest.

Reference

Després, J.-P.; Lemieux, I. 2006. Abdominal obesity and metabolic syndrome. Nature 444(7121): 881–887. doi.org/10.1038/nature05488

Grundy, S.M., Brewer Jr, H.B., Cleeman, J.I., Smith Jr, S.C.; Lenfant, C. 2004. Definition of metabolic syndrome: Report of the National Heart, Lung, and Blood Institute/American Heart Association conference on scientific issues related to definition. Circulation 109(3): 433–438.

Grundy, S.M. 2006. Metabolic syndrome: Connecting and reconciling cardiovascular and diabetes worlds. J. Am. Coll. Cardiol. 47(6): 1093–1100.

Kim, G.; Lee, S.E.; Jun, J.E.; Lee, Y.B.; Ahn, J.; Bae, J.C.; Jin, S.M.; Hur, K.Y.; Jee, J.H.; Lee, M.K., Kim, J.H. 2018. Increase in relative skeletal muscle mass over time and its inverse association with metabolic syndrome development: A 7-year retrospective cohort study. Cardiovasc. Diabetol. 17: 23. doi/org/10.1186/s12933-018-0659-2

Kim, G., Kim, J.H. 2020. Impact of skeletal muscle mass on metabolic health. Endocrinol. Metab. (Seoul) 35: 1–6. doi/org/10.3803/EnM.2020.35.1.1

Kim, Y., Han, B.D., Han, K., Shin, K.E., Lee, H., Kim, T.R., Cho, K.H., Kim, D.H., Kim, Y.H., Kim, H., Nam, G.E. 2015. Optimal cutoffs for low skeletal muscle mass related to cardiovascular risk in adults: The Korea National Health and Nutrition Examination Survey 2009–2010. Endocrine 50: 424–433. doi.org/10.1007/s12020-015-0577-y

Nomura, K., Eto, M., Ogawa, S., Kojima, T., Iijima, K., Nakamura, T., Araki, A., Ouchi, Y., Akishita, M. 2020. Association between low muscle mass and metabolic syndrome in elderly Japanese women. PLoS One 15(12): e0243242. doi/org/10.1371/journal.pone.0243242

Park B.S., Yoon J.S. 2013. Relative skeletal muscle mass is associated with development of metabolic syndrome. Diabetes Metab. J. 37: 458–464.

Spahillari, A., Mukamal, K.J., DeFilippi, C., Kizer, J.R., Gottdiener, J.S., Djousse, L., Lyles, M.F., Bartz, T.M., Murthy, V.L., Shah, R.V. 2016. The association of lean and fat mass with all-cause mortality in older adults: The Cardiovascular Health Study. Nutr. Metab. Cardiovasc. Dis. 26: 1039–1047. doi.org/10.1016/j.numecd.2016.06.011

Siomkajlo, M., Rybka, J., Mierzchala-Pasierb, M., Gamian, A., Stankiewicz-Olczyk, J., Bolanowski, M., Daroszewski, J. 2017. Specific plasma amino acid disturbances associated with metabolic syndrome. Endocrine 58: 553-562. doi.org/10.1007/s12020-017-1460-9

Tanaka, M., Okada, H., Hashimoto, Y., Kumagai, M., Nishimura, H, Oda, Y., Fukui, M. 2020. Relationship between metabolic syndrome and trunk muscle quality as well as quantity evaluated by computed tomography. Clin Nutr. Jun;39(6):1818-1825. doi.org/10.1016/j.clnu.2019.07.021

Wang Q, Zheng D, Liu J, Fang L, Li Q, 2019. Skeletal muscle mass to visceral fat area ratio is an important determinant associated with type 2 diabetes and metabolic syndrome. Diabetes Metab Syndr Obes. 12: 1399–1407. doi.org/10.2147/DMSO.S211529

Weng, L., Quinlivan, E., Gong, Y., Beitelshees, A.L., Shahin, M.H., Turner, S.T., Chapman, A.B., Gums, J.G.; Johnson, J.A., Frye, R.F., Garrett, T.J., Cooper-DeHoff, R.M. 2015. Association of branched and aromatic amino acids levels with metabolic syndrome and impaired fasting glucose in hypertensive patients. Metab. Syndr. Relat. Disord. 13. 195–202. doi.org/10.1089/met.2014.0132

สาขาวิศวกรรมศาสตร์
และสถาปัตยกรรมศาสตร์
(Subject: Engineering and Architecture)

ภาคโปสเตอร์
(Poster Presentation)

การศึกษาการหลอมยูเทคติกโซลเดอร์พรีฟอร์มตะกั่วดีบุกปราศจากฟลักซ์โดยใช้กรดฟอร์มิกปิดผนึกเลเซอร์ไดโอดแพคเกจ

Study of fluxless reflow SnPb eutectic preform solder using formic acid to seal laser diode package

กัญจน์ กาญจนะพังคะ[a], ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ[b]

Kun Kanjanapungka[a], Ratchatee Techapiesancharoenkij[b]

[a]สาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯฯ 10900

[a]Engineering Program in Industrial Production Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kun.ka@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการใช้ยูเทคติกโซลเดอร์พรีฟอร์ม ตะกั่วดีบุก Sn63%/Pb37% โดยการให้ความร้อนแบบอินดักชั่น ในการหลอมปิดผนึกชิ้นงาน เป็นการหลอมแบบปราศจากฟลักซ์ โดยใช้กรดฟอร์มิกเพื่อเป็นการทำปฏิกิริยาในกำจัดชั้นออกไซด์พบผิวของโซลเดอร์พรีฟอร์ม โดยให้อุณหภูมิสูงสุดในการหลอมที่ 270 °C และ 280 °C หลังจากการหลอมทำการตรวจสอบการรั่วไหลด้วยเครื่องการตรวจสอบการรั่วไหลแบบฮีเลียม ตามมาตรฐาน MIL-STD-883 Method 1014.9 และทำการตัดขวาง ชิ้นงานในส่วนที่หลอมปิดผนึกด้วยโซลเดอร์เพื่อตรวจสอบการเชื่อมประสานของพื้นผิวและเนื้อโซลเดอร์ นอกจากนี้ได้นำชิ้นงานที่ถูกปิดผนึกมาทดสอบด้วยการให้อุณหภูมิแบบวัฏจักร โดยการให้อุณหภูมิที่ -55 °C และ 85 °C ทั้งหมด 1000 รอบ หลังจากการทดสอบ พบว่ามีชิ้นงานหลอมด้วยอุณหภูมิ 270 °C มีชิ้นงานผ่านการทดสอบทั้งหมด 10 ชิ้นงานจากทั้งหมด 12 ชิ้นงาน และชิ้นงานหลอมด้วยอุณหภูมิ 280 °C มีชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบทั้งหมด 8 ชิ้นงานจากทั้งหมด 12 ชิ้นงาน

คำสำคัญ: กรดฟอร์มิก, การทดสอบทางอุณหภูมิ, การหลอมปราศจากฟลักซ์, ยูเทคติกโซลเดอร์

Abstract

This research investigates the use of eutectic solder preforms Sn63%/Pb37% by induction heating using fluxless formic acid to reduce metallic oxide on solder preform surface. The peak temperature was set at 270 °C and 280 °C. After reflow process sample will test sealed area by Helium leak detector machine follow MIL-STD-883 Method 1014.9 and the cross section was performed to check the bonding of the surface and solder. In addition, the sealed samples were tested by cyclic temperature testing. At -55 °C and 85 °C for a total of 1000 cycles, it was found that samples with reflow at 270 °C failed the leak test 2 samples from total 12 samples and with reflow at 280°C failed the leak test 4 samples from total 12 samples

Keywords: Eutectic solder, Fluxless reflow, Formic acid, Temperature cycling

คำนำ

กระบวนการทางโซลเดอร์ (Soldering process) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์และ ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ โดยในขั้นตอนของกระบวนการประกอบ กระบวนการโซเดอร์ริ่ง ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนทางกล หรือชิ้นส่วนทางวงจรไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วกระบวนการโซลเดอร์ริ่งมักจะใช้ฟลักซ์ (Flux) ร่วมกับกระบวนการหลอมโซลเดอร์เพื่อช่วยในการกำจัดชั้นออกไซด์ (Oxide) ออกจากพื้นผิวของชิ้นงานและพื้นผิวของโซลเดอร์ และช่วยเพิ่มคุณสมบัติการไหลของโซลเดอร์ (Wettability) แต่การใช้ฟลักซ์ในกระบวนการหลอมโซลเดอร์ ต้องมีการกำจัดฟลักซ์ออกหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ หากไม่สามารถกำจัดฟลักซ์ออกจากชิ้นงานได้หมด จะส่งผลให้อายุการ ใช้งาน(Reliability) ของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากฟลักซ์มีสมบัติการกัดกร่อน (Bi et al., 2021)

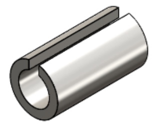
สำหรับกระบวนการประกอบของชิ้นส่วนออปโตอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ไม่สามารถใช้ฟลักซ์ในกระบวนการหลอมโซลเดอร์ได้ เนื่องจากไอระเหยและการกระเด็นของฟลักซ์มีความเสี่ยงที่จะไปปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิป (chip) หรือชิ้นส่วนวงจรไฟฟ้าขนาดเล็กในภายในแพคเกจ ส่งผลให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานลดลง (Wei and Lee, 1999)

จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยชิ้นนี้ มีความสนใจที่จะทำการศึกษาการหลอมโซลเดอร์โดยปราศจากฟลักซ์ ในการประกอบชิ้นส่วนเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) โดยใช้โซลเดอร์พรีฟอร์ม(solder preform) ชนิดยูเทคติคโซลเดอร์โซลเดอร์ ตะกั่ว ดีบุก (PbSn) โดยมีอัตราส่วน 37.0 เปอเซนต์ตะกั่ว 63.0 เปอเซนต์ดีบุก ในการหลอมปิดผนึกบริเวณท่อของชิ้นงาน โดยทำการหลอมภายใต้สภาวะไอระเหยของกรดฟอร์มิก ซึ่งเป็นตัวช่วยในการทำลายชั้นออกไซด์ (Oxide) ของโซลเดอร์แทนการใช้ฟลักซ์ และทำการทดสอบความแข็งแรงของโซลเดอร์ปิดผนึกด้วยกระบวนการทางกลโดยใช้กระบวนการการให้อุณหภูมิแบบวัฏจักร (Temperature cycling) และการตรวจสอบการรั่วไหลด้วยเครื่องตรวจจับการรั่วไหลแบบฮีเลียม (Helium leak detector)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. โซลเดอร์พรีฟอร์ม (Solder preform) Fig. 1A ส่วนประกอบทางเคมีดัง Table 1
2. แพคเกจ (Package) Fig.1B

(A)



(B)

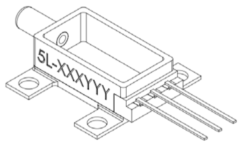


Fig. 1 (A) Solder preform; (B) Package

Table 1 Chemical composition of solder preform

Chemical composition of solder preform	Percent (%)
Tin (Sn)	63.0
Lead (Pb)	37.0

3. เครื่องให้ความร้อนประเภทอินดักชั่น (Induction heating machine) Fig. 2

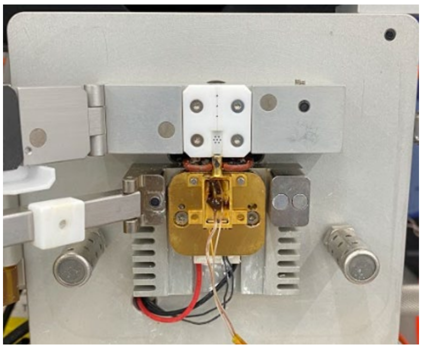


Fig. 2 Induction heater

4. เครื่องตรวจจับการรั่วไหลแบบฮีเลียม (Helium leak detector) ยี่ห้อ INFICON รุ่น UL1000FAB Helium Leak Detector

การทดลองนี้ต้องการศึกษาการหลอมปิดผนึกโดยใช้โซลเดอร์พรีฟอร์ม ตะกั่ว ดีบุก (PbSn) ในการหลอมปิดผนึกแพคเกจของชิ้นงานเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) ในบริเวณท่อทางออกของสายไฟเบอร์ออปติก (Fiber optic) โดยใช้การให้ความร้อนแบบอินดักชั่นเพื่อทำการหลอมโซลเดอร์พรีฟอร์ม และหลอมภายใต้สภาวะไอระเหยของกรดฟอร์มิก เพื่อเป็นการกำจัดชั้นออกไซด์ออกจากผิวของโซลเดอร์พรีฟอร์ม แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ Fig. 3

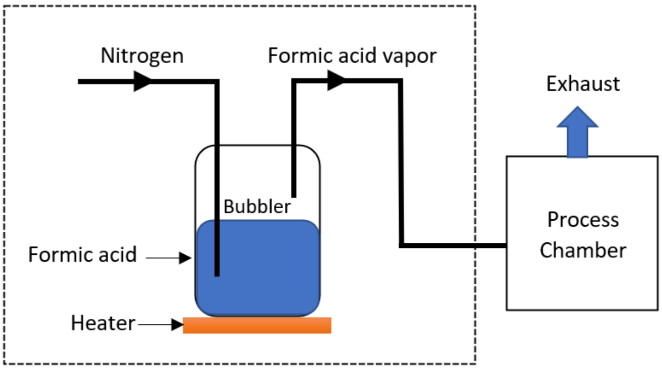


Fig. 3 Schematic view of Formic acid bubbler

กรดฟอร์มิกจะทำปฏิกิริยากับชั้นออกไซด์บนผิวของโซลเดอร์เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 150 °C และจะสลายตัวไปกลายเป็นไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C จึงไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนหรือสารตกค้างภายในชิ้นงาน สมการด้านล่างแสดงถึงปฏิกิริยาระหว่างกรอกฟอร์มิกและออกไซด์ของโซลเดอร์ (Wei and Lee, 1999)

ที่อุณหภูมิ > 150˚C

$$MeO + 2HCOOH = Me(COOH)_2 + H_2O$$

ที่อุณหภูมิ > 200˚C

$$Me(COOH)_2 = Me + 2CO_2 + H_2$$

$$H_2 + MeO = Me + H_2O$$

โดย Me คือ โลหะ

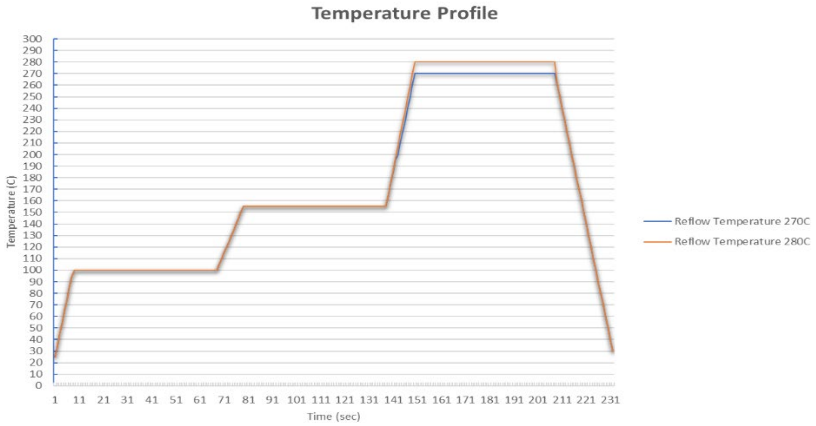


Fig. 4 Reflow profile of soldering process

การให้อุณหภูมิแบ่งเป็น 4 ช่วง Fig. 4 โดยช่วงที่ 1 เป็นการอุ่นชิ้นงานและเปิดแก๊สไนโตรเจนเข้ามาใน Process chamber เพื่อให้สภาวะใน Process chamber ปราศจากออกซิเจน ช่วงที่ 2 เป็นการจ่ายไอระเหยของกรดฟอร์มิกเข้ามาใน Process chamber เพื่อเป็นการกำจัดออกไซด์บนผิวของโซลเดอร์พรีฟอร์ม โดยในช่วงนี้มีการให้ความร้อนที่ 155 °C ช่วงที่ 3 เป็นการให้อุณหภูมิเพื่อทำการหลอมโซลเดอร์พรีฟอร์มหลังจากการกำจัดชั้นออกไซด์ออกจากผิวโซลเดอร์ในช่วงที่ 3 และช่วงที่ 4 เป็นการเย็นตัวของโซลเดอร์ โดยการศึกษานี้ทำการทดลองหลอมโซลเดอร์ของอุณหภูมิในช่วงที่ 3 คือ 270 °C 12 ชิ้นงาน และ 280 °C 12 ชิ้นงาน

การทดสอบ

การทดสอบการรั่วไหล (Leak test)

การทดสอบการรั่วไหลเป็นการทดสอบความสามารถของการหลอมปิดผนึกซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของกระบวนการ โดยการทดสอบการรั่วไหลนี้จะอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบการรั่วไหล MIL-STD-883 Method 1014.9 เป็นการทดสอบการรั่วไหลแบบละเอียดโดยค่าการรั่วไหลตามมาตรฐาน 10^{-8} atm cc/sec คือใช้เครื่องตรวจสอบการรั่วไหลแบบแก๊สฮีเลียม(Chang et al., 2010)

ทำการทดสอบการรั่วไหลหลังจากชิ้นงานทั้งสองกลุ่มผ่านการหลอมปิดผนึก โดยนำชิ้นงานทุกชิ้นมาทำการทดสอบการรั่วไหล โดยตรวจสอบในบริเวณที่ทำการหลอมปิดผนึกด้วยโซลเดอร์ แสดงใน Fig. 5 และ Fig. 6

Fig. 5 และ Fig. 6 แสดงถึงพื้นผิวของโซลเดอร์หลังจากผ่านกระบวนการหลอม และภาพตัดขวางของชิ้นงานเพื่อดูลักษณะของโซลเดอร์ภายใน จากภาพตัดขวางพบว่าชิ้นงานจากการหลอมทั้งสองอุณหภูมิมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยโซลเดอร์สามารถหลอมประสานกับผนังท่อ (Tube wall) และ ปลอกของสายไฟเบอร์ (Fiber ferrule) ได้อย่างครอบคลุม

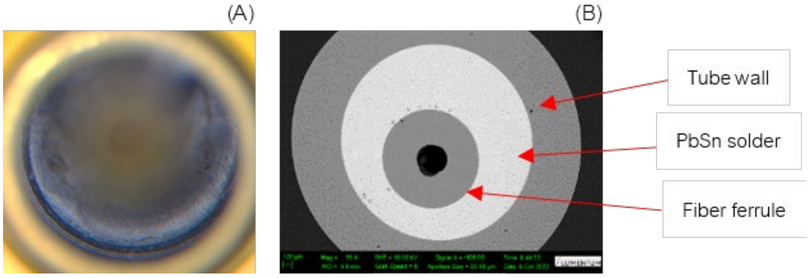


Fig. 5 (A) Solder surface; (B) Cross section of 270 °C

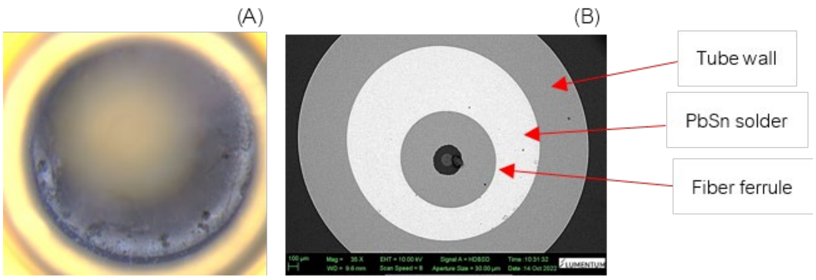


Fig. 6 (A) Solder surface; (B) Cross section of 280 °C

การทดสอบด้วยกระบวนการทางอุณหภูมิ

การทดสอบทางอุณหภูมิเพื่อเป็นการทดสอบอายุการใช้งานและความน่าเชื่อถือของชิ้นงานโดยเป็นการลดระยะเวลาในการทดสอบโดยที่ไม่ต้องนำชิ้นงานไปใช้งานจริง

การทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร (Temperature cycling) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนที่เชื่อมประสานโดยโซลเดอร์ของชิ้นงานสามารถต้านทานการทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างสุดขั้ว ได้มากน้อยเพียงใด โดยจะมีการให้อุณหภูมิที่ร้อนและเย็นสลับกันไปเป็นรอบ เพื่อทำให้เกิดการหดและขยายตัวของชิ้นงานและทำให้เกิดความเครียดและความล้า (Fatigue) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Yang et al., 2010)

โดยในการทดลองนี้ทำการทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร (Temperature cycling) เพื่อศึกษาความทนทานของการหลอมปิดผนึกด้วยกระบวนการทางโซลเดอร์ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-883 Method 1010 โดยกำหนดอุณหภูมิการทดสอบแสดงใน Table 2 โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature ramp rate) 10 °C ต่อนาที

Table 2 Temperature cycling test condition

Step	Dwell time (minute)	Temperature (°C)
Cold	20	-55
Hot	20	85

และทำการทดสอบอุณหภูมิแบบวัฏจักรทั้งหมด 1,000 รอบ โดยทำการตรวจสอบการรั่วไหลด้วยเครื่องตรวจจับการรั่วไหลแบบฮีเลียม ตามมาตรฐาน MIL-STD-883 Method 1014.9 ทุกการทดสอบทางอุณหภูมิ 100 รอบ

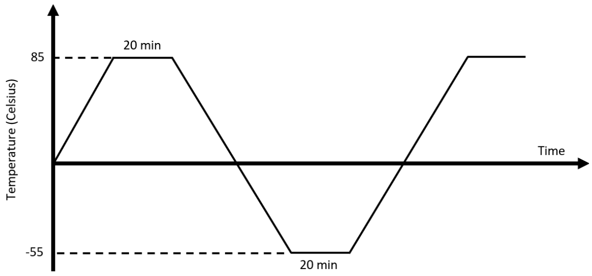


Fig. 7 Temperature profile of temperature cycling test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การตรวจสอบการรั่วไหลของชิ้นงานทั้งสองกลุ่ม โดยการตรวจสอบการรั่วไหลแบบฮีเลียม ผลการตรวจสอบพบว่า ชิ้นงานจากการหลอมด้วยอุณหภูมิ 270 °C และ 280 °C กลุ่มละ 12 ชิ้นงาน สามารถผ่านการทดสอบการรั่วไหลด้วยเครื่องตรวจสอบการรั่วไหลแบบฮีเลียมทุกชิ้นงาน

ผลการทดสอบการรั่วไหลหลังจากการทดสอบอุณหภูมิแบบวัฏจักร ของชิ้นงานที่ถูกหลอมปิดผนึกด้วยโซลเดอร์ตะกั่วดีบุก (PbSn) โดยทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิการหลอมโซลเดอร์ที่ต่างกัน 270 °C และ 280 °C กลุ่มละ12 ชิ้นงาน ทำการทดสอบการรั่วไหลด้วยเครื่องตรวจสอบการรั่วไหลแบบฮีเลียม (Helium leak detector) หลังจากการทดสอบอุณหภูมิแบบวัฏจักรทุกๆ 100 รอบ พบว่าชิ้นงานกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิการหลอมที่ 270 °C มี 2 ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบการรั่วไหลหลังจากการทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร 900 รอบ กลุ่มที่ใช้อุณหภูมิการหลอมที่ 280 °C มี 1 ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบการรั่วไหลหลังจากการทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร 700 รอบ 1 ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบหลังจากการทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร 800 รอบ 2 ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบหลังจากการทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร 1000 รอบ

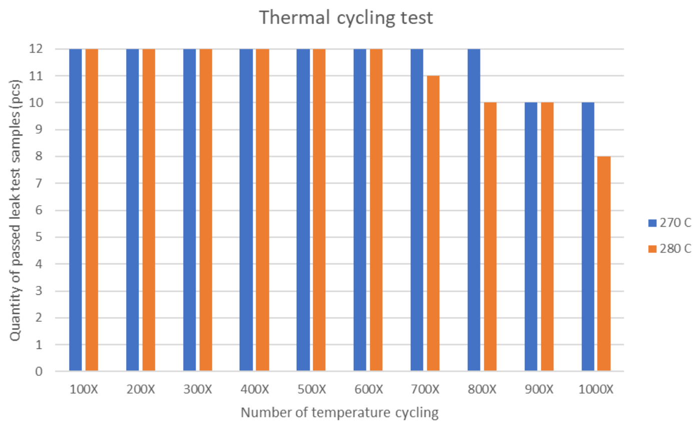


Fig. 8 Temperature cycling test and leak check data

จากผลการทดสอบอุณหภูมิแบบวัฏจักร นำชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบการรั่วไหลมาทำการตัดขวาง (Cross section) เพื่อตรวจสอบลักษณะของรอยรั่วที่เกิดขึ้น โดย Fig. 9 แสดงถึงภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ทำการหลอมโซลเดอร์ที่อุณหภูมิ 270 °C และ Fig. 10 แสดงถึงภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ทำการหลอมโซลเดอร์ที่อุณหภูมิ 280 °C จะเห็นได้ว่าลักษณะรอยแตกของชิ้นงานทั้งสองชิ้น มีลักษณะคล้ายกัน โดยมีการแตก (Crack) จากในเนื้อของโซลเดอร์ใกล้กับรอบนอกของท่อและเป็นรอยยาวขนานไปกับผนัง ซึ่งมีลักษณะรอยแตกที่คล้ายกับการศึกษาของ (Wang et al., 2011) ซึ่งระบุว่าตัวแปรหนึ่งที่สำคัญที่อาจส่งผลให้เกิดรอยแตกได้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุที่แตกต่างกันเมื่ออยู่ภายใต้การทดสอบทางอุณหภูมิ

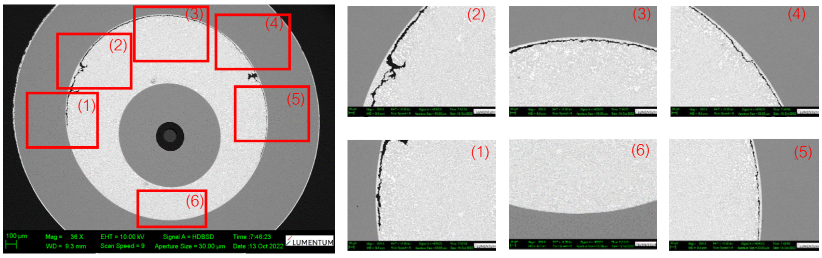


Fig. 9 Cross section from 270 °C reflow temperature

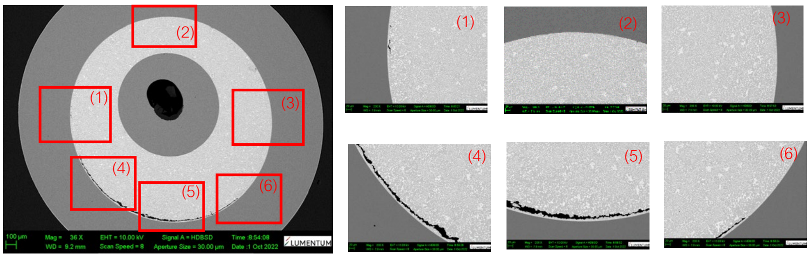


Fig. 10 Cross section from 280 °C reflow temperature

สรุป

1. การหลอมโซลเดอร์ตะกั่วดีบุก (PbSn) โดยใช้กรดฟอร์มิกเป็นตัวช่วยในการทำปฏิกิริยากับชั้นออกไซด์ และให้อุณหภูมิการหลอมที่ 270 °C และ 280 °C ชิ้นงานทั้งสองกลุ่มสามารถผ่านการทดสอบการรั่วไหลหลังจากการหลอมปิดผนึกโดยมีค่าอัตราการรั่วไหลที่ 10^{-9} atm cc/sec โดยค่ามาตรฐานคือต้องน้อยกว่า 10^{-8}atm cc/sec

2. ชิ้นงานกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิในการหลอม 270 °C พบชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบการรั่วไหล 2 ชิ้นงานหลังจากการทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร 900 รอบ และกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิในการหลอม 280 °C พบชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบการรั่วไหลหลังจากการทดสอบทางอุณหภูมิแบบวัฏจักร 700 รอบ 1 ชิ้นงาน 800 รอบ 1 ชิ้นงาน และ 1000 รอบ 2 ชิ้นงาน

3. การพบรอยแตกจากการทดสอบทางอุณหภมิ เกิดจากความล้าอันเนื่องมาจากความเครียดสะสมระหว่างผนังท่อและบริเวณเนื้อของโซลเดอร์ ที่ได้รับจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัท Lumentum international Thailand ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ และ วัตถุดิบในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Bi, Y., He, S., Li, W., Yang, D., Nishikawa, H. 2021. Wettability improvement of solder in fluxless soldering under formic acid atmosphere. 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology.

Chang, J.S., Lin, J.Y., Ho, S.C., Lee, Y.J. 2010. Wafer level glass frit bonding for MEMS hermetic packaging. 2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference.

Wang, W., Osterman, M., Das, D., Pecht, M. 2011. Solder joint reliability of SnAgCu solder refinished components under temperature cycling test. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 1: 798–808. doi.org/10.1109/TCPMT.2010.2095273

Wei, L., Lee, Y.C. 1999. Study of fluxless soldering using formic acid vapor. IEEE Transactions on Advanced Packaging 22: 592–601. doi.org/10.1109/6040.803451

Yang, J., Huang, J.C., Li, K.C., Ku, J.L., Lee, A. 2010. Reliability assessment for the PoP lead free solder joint through temperature cycling test. 2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference.

การวิเคราะห์ความสบายในการโดยสารของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติระหว่างรถไฟฟ้าสายเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิกับรถไฟฟ้าสายสีทอง

Ride comfort comparison between the automated people mover systems of Suvarnabhumi Airport and the BMA gold line

สมมิศร์ คงศ์มัยลิก*, **วิชัย ศิวะโกศิษฐ**

Sommith Kongmaialik*, Wichai Siwakosit

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sommith.k@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเร็วและความเร่งของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover : APM) ซึ่งเป็นรูปแบบรถไฟฟ้าไร้คนขับที่เหมาะสมในการให้บริการเพื่อทำการวิเคราะห์ความสบายในการโดยสาร (Riding Comfort) ในแต่ละเส้นทางเดินรถสำหรับผู้โดยสารที่ต้องเดินทางระหว่างอาคารของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเพื่อนำมาเปรียบเทียบระดับดวามสบายการโดยสารกับระบบขนส่งมวลชนเขตเมืองโครงการรถไฟฟ้าสายสีทอง ซึ่งเป็นรถไฟฟ้าแบบล้อยางประเภทเดียวกันที่วิ่งบนทางคอนกรีต เป็นเส้นทางเชื่อมต่อการคมนาคมทางรถ เรือ และระบบรางในพื้นที่ฝั่งธนบุรี โดยการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือน เพื่อหาความเร็วและอัตราเร่ง ที่ส่งผลต่อความสบายของรถไฟฟ้า APM ที่เหมาะสมในการให้บริการในแต่ละเส้นทาง โดยใช้การประเมินตามมาตรฐาน ISO 2631 และการคำนวณค่าคุณภาพของการโดยสาร Wertungszahl (W_z) จากการประเมินค่าคุณภาพของการโดยสารของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติทั้ง 2 สาย ในแนวดิ่งมีค่าอยู่ที่ 3.0–3.5 และรถไฟฟ้าสายเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีค่าสูงกว่าที่ 15% แสดงให้เห็นว่ารถไฟฟ้าสายสีทองนั้นมีความสะดวกสบายในการโดยสารมากกว่า

คำสำคัญ: ค่าคุณภาพของการโดยสาร, ความสบายในการโดยสาร, รถไฟฟ้าไร้คนขับ

Abstract

The research study in the project will consider the speed and acceleration of Automated People Mover (APM) that is suitable in service to analyze the Riding Comfort on each route for passengers traveling between Suvarnabhumi Airport building. To compare the passenger comfort level with the urban public transport project of the Gold Line is an automated people mover line, part of Bangkok's rapid transit system. The same type that runs on elevated concrete tracks. By Contrastive Analysis of vibration value to find speed and acceleration that APM's affects comfort. Using standard assessment ISO 2631 and Calculation of the quality of the ride Wertungszahl (W_z). From the evaluation of 2 APM lines, the quality of the ride value in vertical is around 3.0 – 3.5 and Suvarnabhumi Airport line has more value than BMA Gold line about 15 % that means BMA Gold line has more comfortable for transportation.

Keywords: Automated people mover (APM), Riding Comfort, Wertungszahl (W_z)

คำนำ

ปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนทางราง (Mass Transportation) จากเขตเมืองที่เชื่อมต่อระหว่างท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีเพียงสายรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ (Airport Rail Link : ARL) เท่านั้น ซึ่งยังไม่มีระบบขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารภายในท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เพื่อให้ผู้มาใช้บริการสนามบินเกิดความสะดวกสบายและมีการเดินทางที่รวดเร็วยิ่งขึ้น

ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover : APM) คือ ระบบบริการรับส่งผู้โดยสารภายในสนามบินระหว่างอาคารผู้โดยสารหลัก (North Main Terminal Building : NMTB) กับอาคารเทียบเครื่องบินรองหลังที่ 1 (Satellite 1 building : SAT-1) (Limited, 2022) โดยใช้รถไฟฟ้ายี่ห้อ SIEMENS รุ่น AIRVAL (SAS, 2017) เป็นยานพาหนะซึ่งมีรูปแบบการทำงานเป็นระบบอัตโนมัติไร้คนขับ โดยใช้การควบคุมด้วยระบบควบคุมการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control : ATC) และระบบอาณัติสัญญาณ (Communication Base Train Control : CBTC) (Haupenthal, 2017) ได้ถูกนำมาให้บริการในอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งมีความถี่ในการวิ่งให้บริการสูง รถไฟฟ้า APM จะใช้ล้อยางวิ่งบนพื้นคอนกรีตเพื่อลดเสียงดังขณะรถวิ่งและการสั่นสะเทือนที่สร้างความรำคาญต่อผู้โดยสาร รถไฟฟ้า APM เป็นระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่สามารถให้บริการผู้โดยสารได้โดยไม่ใช้คนขับ ซึ่งมีระบบหลักที่ประกอบกันเป็นรถไฟฟ้า APM ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้า (Rolling Stock) ที่ทำหน้าที่เป็นยานพาหนะในการบรรทุกผู้โดยสารและระบบควบคุมการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control : ATC) ที่ทำหน้าที่ควบคุมตัวรถไฟฟ้าให้วิ่งไปยังเส้นทางเดินรถได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ความสะดวกสบายของผู้โดยสาร จึงจำเป็นที่จะต้องนำข้อมูลระบบการบริการรถไฟฟ้า APM และเกณฑ์สำหรับความสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) ตามมาตรฐาน ISO2631 (ISO2631-1, 1997) ซึ่งตั้งแต่อดีตที่ผ่านมาได้มีการวิเคราะห์ความสบายในการโดยสาร โดยมุ่งนั้นไปที่รถไฟ รถไฟฟ้า (Kanawat, 2020) และรถไฟความเร็วสูง (Chi Liu, 2019) ที่ใช้การขับเคลื่อนด้วยล้อและรางเหล็ก แต่งานวิจัยฉบับนี้จะวิเคราะห์สะดวกสบายของรถไฟฟ้า APM ซึ่งขับเคลื่อนด้วยล้อยางและนำผลที่ได้มาปรับปรุงในการให้บริการและความสะดวกสบายในการโดยสาร

อุปกรณ์และวิธีการ

ความสะดวกสบายในการโดยสาร

ตลอดระยะเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมานั้น นักวิจัยได้มีความพยายามที่จะกำหนด มาตรฐานทางเทคนิคและเกณฑ์การประเมินต่างๆ เพื่อหาปริมาณของความสบายสำหรับผู้โดยสารบนรถไฟมาตั้งแต่ปี 1980 โดยหลังจากนั้นได้นำไปสู่ข้อเสนอสำหรับมาตรฐาน ISO CEN และ UIC ตามลำดับ (Andersson et al., 2014) เดิมความสบายในการโดยสารจะถูกตรวจสอบในช่วงความถี่ 5–20 Hz นั่นคือในช่วงที่ มนุษย์ไม่ได้ยิน อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน ISO และ CEN ได้แนะนำให้พิจารณาการสั่นสะเทือนสูง ไปถึง 80 Hz และช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 0.5 Hz ด้วยเช่นกันสำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดอาการเมารถของผู้โดยสาร ความสะดวกสบายของผู้โดยสารในการเดินทางด้วยรถไฟมีหลายปัจจัย ประการแรกที่สำคัญคือ การขึ้น-ลงต้องสะดวก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากผู้โดยสารมีกระเป๋าสัมภาระหรือเป็นผู้โดยสารสูงอายุหรือพิการและสิ่งสำคัญอื่นๆ ที่ประกอบด้วย ความสบายของที่นั่ง พื้นที่ส่วนตัว อุณหภูมิ การระบายอากาศ และการปรับอากาศ รวมถึงแสงสว่าง

ปัจจัยอีกประการที่สำคัญของความสบายในการโดยสารคือ เสียงรบกวนที่มีผลมาจาก โครงสร้างของตัวรถและเสียงแวดล้อมต่างๆ ที่ผ่านเข้ามาภายในรถ โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 20–30 Hz ซึ่งการสั่นสะเทือนมักจะสัมผัสได้ทั้งความรู้สึกและได้ยิน ปัจจัยสุดท้ายคือการเคลื่อนไหวและการสั่นสะเทือนของรถไฟที่มีความสำคัญเช่นกัน ต่อความสบายของ

ผู้โดยสาร โดยอาจจะเกิดขึ้นแบบชั่วคราวหรือเป็นประจำ ซึ่งโดยมากในการเดินทางด้วยรถไฟการสั่นสะเทือนมักจะเกิดเป็นประจำมากกว่าชั่วคราว

ดังนั้นความสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) หมายถึง ความสบายของผู้โดยสารกับ การเดินทางด้วยยานพาหนะ ซึ่งสัมพันธ์กับการนั่งรถไฟอย่างราบรื่น โดยไม่มีสิ่งรบกวนการพักผ่อน ของผู้โดยสารหรือรบกวนกิจกรรมต่างๆ ของผู้โดยสารในระหว่างการเดินทาง ซึ่งมีความเชื่อมโยง โดยสามารถจะแสดงได้โดยใช้สิ่งที่เรียกว่า ดัชนีในการโดยสาร (Ride Index) ซึ่ง Ride Index (RI) ก็ ขึ้นอยู่กับ Wertungszahl (W_z) ทั้ง 2 เกณฑ์เป็นเกณฑ์อย่าง เดียวกัน ซึ่งมาจากนักวิจัยเยอรมันชื่อ Sperling et al ในปี ค.ศ. 1940 และ 1950 เกณฑ์เหล่านี้มีผลต่อการประเมินความสบายในการขับขี่ของรถไฟ โดย W_z และ RI ถูกประเมินจากการ เร่งความเร็วซึ่งวัดบนพื้นของยานพาหนะ ซึ่งจะประเมินในช่วงเวลาที่กำหนด หรือแต่ละช่วงทางวิ่ง ในทางเทคนิคและทางคณิตศาสตร์ W_z เป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square) ค่าของการเร่งความเร็วในมาตราส่วนลอการิทึมสามารถแสดงให้เห็นเกณฑ์ระดับต่างๆของการสั่นสะเทือนประเมินโดย W_z

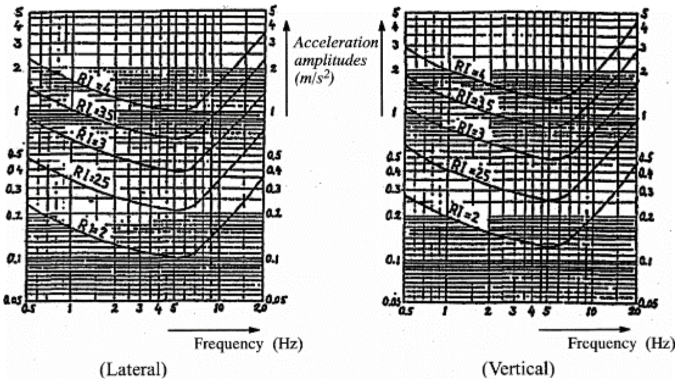


Fig. 1 W_z (RI) For a comfort in passenger vehicles and locomotives, as function of acceleration amplitudes of stationary harmonic vibration (Andersson et al., 2014)

เกณฑ์ตาม ISO 2631

ISO 2631 (ISO2631-1, 1997) เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนทางกลและการประเมินผลต่อการสั่นสู่ร่างกาย เช่น การสั่นสะเทือนที่ส่งไปยังร่างกายโดยรวมผ่านพื้นผิวที่รองรับ ซึ่งเป็นวิธีการเชิงปริมาณของการสั่นสะเทือนที่สัมพันธ์กับของความสบายของผู้โดยสาร สำหรับช่วงความถี่ที่พิจารณาคือ 0.5-80 Hz เพื่อความสบาย และ 0.1–0.5 Hz สำหรับอาการเมารถ ในส่วนนี้ ความสบายจะเกี่ยวข้องกับมาตรฐาน ISO 2631

ตามมาตรฐาน ISO 2631 การสั่นสะเทือนที่ส่งไปยังร่างกายจะต้องวัดบนพื้นผิวระหว่างร่างกายและพื้นผิวสัมผัสนั้น ซึ่งคุณภาพในการโดยสารหมายถึงการโดยสารยานพาหนะที่ไม่มี ความสั่นสะเทือนหรือแรงที่มากระทำต่อผู้โดยสารในระหว่างเคลื่อนที่มากจนเกินไป โดยสามารถ แสดงค่าคุณภาพในการโดยสารได้จากค่าเวอร์ตุงซาล (Wertungszahl) W_z ซึ่งคำนวณได้จากค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของความเร่งในห้องโดยสารที่มีการปรับตาม ค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ (Frequency Weighted) a^{wrms} ตาม Equation 1 และ Equation 2

$$W_z=4.42\left(a^{wrms}\right)^{0.3} \tag{1}$$

$$a^{wrms}=\left[\frac{1}{T}\int_0^T\left[a^w(t)\right]^2dt\right]^{0.5} \tag{2}$$

โดย T คือ คาบเวลาที่ใช้คำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง และ $a^w(t)$ คือ ความเร่งในห้องโดยสารที่มีการปรับตามค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ตาม Fig. 1 โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 2631 ซึ่งมีการถ่วงน้ำหนักความเร่งในแนวดิ่ง (Vertical) ของตัวรถเป็น W_k และมีการถ่วงน้ำหนักความเร่ง ในแนวตามยาว (Longitudinal) และแนวขวาง (Lateral) ของตัวรถเป็น W_d ค่า W_z ที่เป็นปกติของ รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 2.8 โดยมีเกณฑ์ความสั่นสะเทือนในการโดยสาร และ คุณภาพในการโดยสารเทียบกับค่าเวอร์ตุงซาลแสดงดัง Table 1

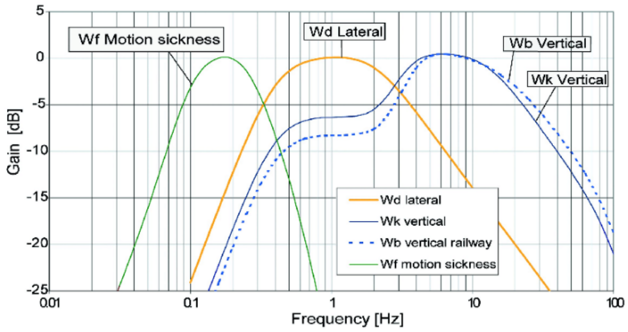


Fig. 1 Frequency weighting of vertical (W_k), longitudinal, and lateral (W_d), accelerations according to ISO 2631 (ISO2631-1, 1997)

กราฟความเร่งในแนวแกนที่แสดงใน Fig. 2 เป็นการปรับตามค่าถ่วงน้ำหนัก ความถี่ตามมาตรฐาน ISO 2631 มาตรฐานนี้ให้แนวทางสำหรับการประเมินความสบายโดยเฉลี่ยใช้สาหรับการคำนวณค่าเฉลี่ยความถี่ถ่วงน้ำหนัก ที่กำหนดให้กับจุดข้อมูล เพื่อกำหนดเกณฑ์ความสำคัญให้กับจุดข้อมูลการสั่นสะเทือนและคุณภาพของการโดยสารของรถไฟฟ้า

Table 1 Level of vibrations and ride comfort according to W_z (Andersson et al., 2014)

W_z	Vibration Level	Ride Quality
1	Just noticeable	Very good
2	Clearly noticeable	Good
2.5	Pronounced but not unpleasant	-
3	Strong but tolerable	Tolerable
3.5	Very strong and unpleasant	-
4	Extremely strong and unpleasant	Not tolerable
5	-	Dangerous

W_d : weighting curve สำหรับการเร่งความเร็วด้านข้างและตามยาวเพื่อความสบาย

W_k : weighting curve สำหรับการเร่งความเร็วในแนวตั้ง เพื่อความสบาย

W_f : weighting curve สำหรับการเร่งตามแนวตั้ง เพื่อประเมินอาการเมารถ

การวัดค่าความเร่งของรถไฟฟ้า

อุปกรณ์วัดค่าความเร่งที่ใช้ในการทดลองและเก็บข้อมูลเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสมาร์ตโฟนที่มี อุปกรณ์วัดความเร่ง ยี่ห้อ XIAOMI REDMI รุ่น NOTE 11 สามารถติดตั้งแอปพลิเคชัน AccDataRec ที่ใช้วัดค่าความเร่งได้ทั้งตามแนวยาว (Lateral) ตามแนวขวาง (Longitudinal) และตามแนวตั้งของรถไฟฟ้า (Vertical) ซึ่งสามารถบันทึกค่าทุกๆ 0.002 วินาที หรือ 500 Hz โดยนำโทรศัพท์ที่มีการติดตั้งแอปพลิเคชันไปติดตั้งที่บริเวณพื้นรถบริเวณด้านหน้า ตรงกลางและด้านหลังของตัวรถ เพื่อวัดค่าในช่วงที่มีผู้โดยสารน้อย จากนั้นใช้โปรแกรม Matlab สำหรับประยุกต์การบันทึกข้อมูลจากตัววัดความเร่ง ในช่วงตลอดเส้นทางของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในอุโมงค์ใต้ดินของสนามบินสุวรรณภูมิจากอาคารหลัก (NMTB) ไปยังอาคารเทียบเครื่องบินหลังรอง (SAT-1) โดยแบ่งเป็นเส้นทางวิ่งที่ 1 (Line1) เส้นทางวิ่งที่ 2 (Line2) เส้นทางวิ่งที่ 3 (Line3) และเส้นทางวิ่งที่ 4 (Line4) เพื่อเปรียบเทียบกับรถไฟฟ้าสายสีทองที่วิ่งบนทางยกระดับทั้งหมด 4 ช่วง ได้แก่ ขาไปช่วงระหว่างสถานีตากสิน (G1) ถึงสถานีเจริญนคร (G2) ช่วงระหว่างสถานีเจริญนคร (G2) ถึงสถานีคลองสาน (G3) ขากลับช่วงระหว่างสถานีคลองสาน (G3) ถึงสถานีเจริญนคร (G2) และช่วงระหว่างสถานีเจริญนคร (G2) ถึงสถานีตากสิน (G1)

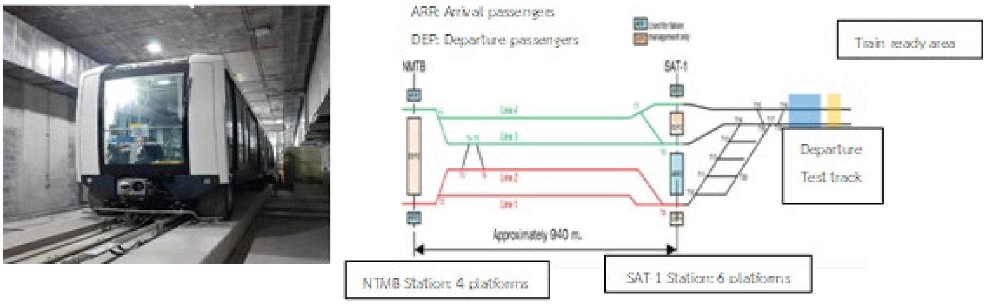


Fig. 3 The Automated People Mover (APM) system is the main transport system to serve passengers between the North Main Terminal Building (NMTB) and the Satellite Terminal (SAT-1) as a part of Suvarnabhumi Airport (Limited, 2022)

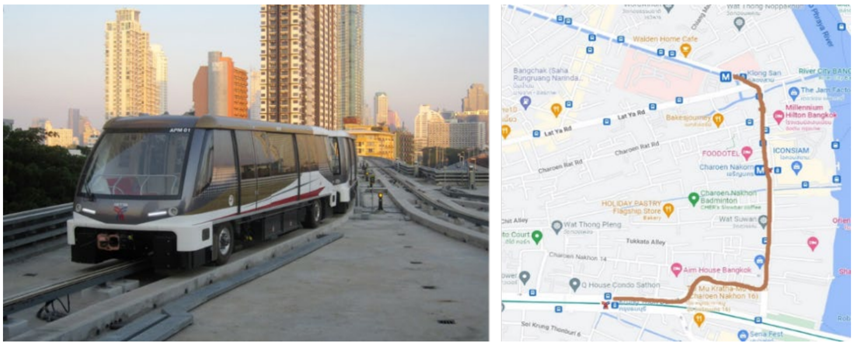


Fig. 4 The APM of Gold line is the transport system to serve passenger from Krung Thon Buri station to Klong San station (Wikipedia, 2022)

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการนำอุปกรณ์วัดความเร่งไปติดตั้งบนพื้นบริเวณด้านหน้าของตู้โดยสารตำแหน่งที่ตรงกับโบกี้ของรถทั้งโครงการรถไฟฟ้าสายเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและโครงการรถไฟฟ้าสายสีทอง ทำให้ได้ ค่าความเร่ง

ของโครงการรถไฟฟ้าเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิระหว่างอาคารผู้โดยสารหลักกับอาคารเทียบเครื่องบินรองหลังที่ 1 ตามแนวขวาง แนวยาว และแนวดิ่ง ตาม Fig. 5 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 0.5279 m/s^2 0.0942 m/s^2 และ 9.8615 m/s^2 ตามลำดับ และค่าความเร่งของโครงการรถไฟฟ้าสายสีทองตามแนวขวาง แนวยาว และแนวดิ่ง ตาม Fig. 6 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 0.1264 m/s^2 0.1165 m/s^2 และ 9.7925 m/s^2 ตามลำดับ

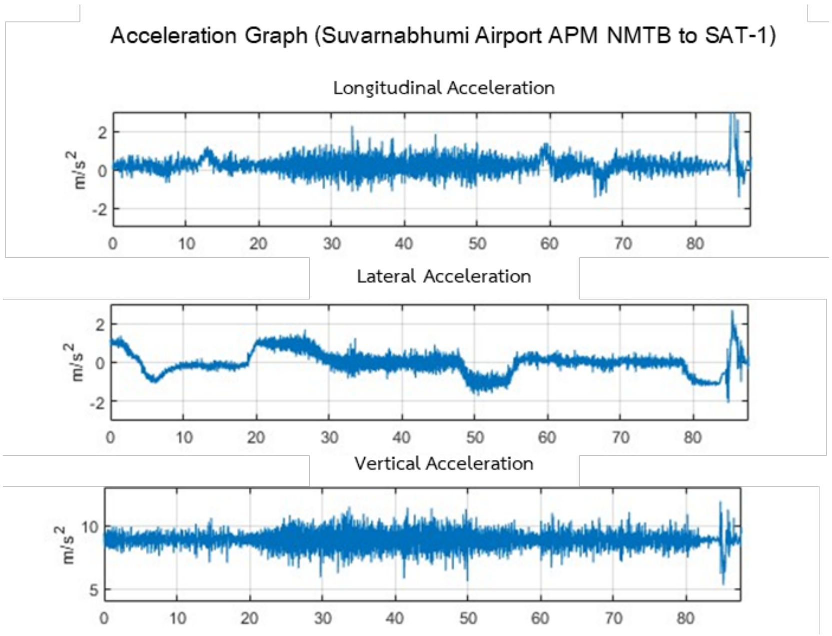


Fig. 5 Acceleration Graph shows acceleration value that measured by an accelerometer of Suvarnabhumi Airport APM Line 1 between NMTB and SAT-1

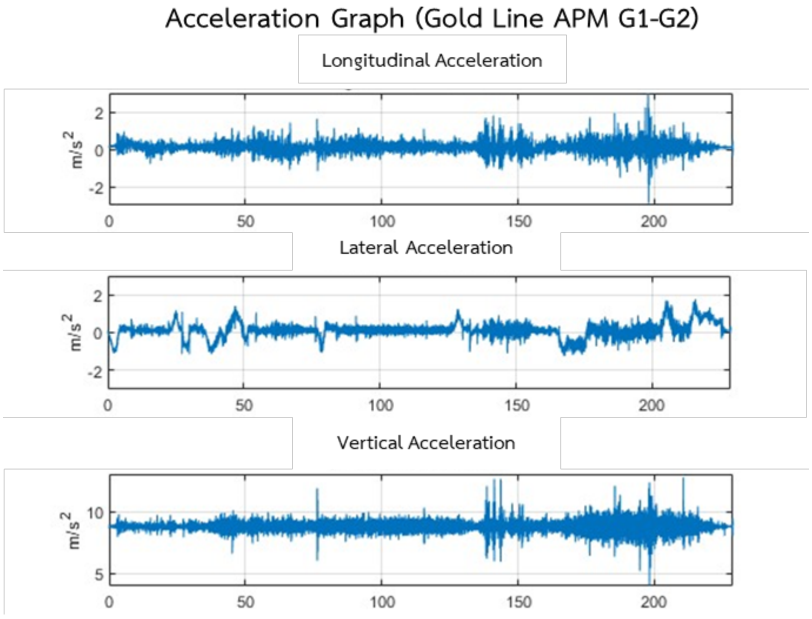


Fig. 6 Acceleration Graph shows acceleration value that measured by an accelerometer of The Gold Line APM between Saphan Taksin Station (G1) and Charoen Nakhon station (G2)

การประเมินและเปรียบเทียบคุณภาพ

ค่าความเร่งตามแนวยาว (Longitudinal) แนวขวาง (Lateral) และตามแนวตั้งของรถไฟฟ้า (Vertical) ซึ่งนำมาประมวลผลค่าความเร่งและค่าความสั่นสะเทือน W_z ตาม Equation 2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB™ ทำให้ได้ผลลัพธ์ตาม Figs. 7, 8 และ 9 ดังนี้ค่า W_z ของโครงการรถไฟฟ้าเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิระหว่างอาคารผู้โดยสารหลักกับอาคารเทียบเครื่องบินรองหลังที่ 1 ตามแนวขวาง แนวยาว และแนวดิ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 2.3918, 3.0569 และ 3.5747 ตามลำดับ และค่า W_z ของโครงการรถไฟฟ้าสายสีทองตามแนวขวาง แนวยาว และแนวดิ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.0226 2.7164 และ 3.0954 ตามลำดับ ทำให้เห็นว่ามีคุณภาพในการขับขี่โดยเฉลี่ยอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (Tolerable) ตาม Table 1 โดยค่า W_z สูงสุดในแนวดิ่งของรถไฟฟ้าเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิระหว่างอาคารผู้โดยสารหลักกับอาคารเทียบเครื่องบินรองหลักที่ 1 มีค่ามากกว่ารถไฟฟ้าสายสีทองที่ 15% จึงสามารถกล่าวได้ว่ารถไฟฟ้าสายสีทองมีความสบายในการโดยสารมากกว่า ซึ่งอาจมีผลมาจากเส้นทางการเดินรถและความเร็วที่ใช้ในการเดินรถ เนื่องจากรถ Siemens รุ่น AIRVAL มีการใช้ความเร็วทั้งทางตรงและทางโค้งสูงกว่ารถ Bombardier รุ่น Innovia 300 และลักษณะทางวิ่งของรถไฟฟ้าภายในท่าอากาศยานสุวรรณภูมิบริเวณทางโค้งมีลักษณะที่แคบจึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้มากกว่า

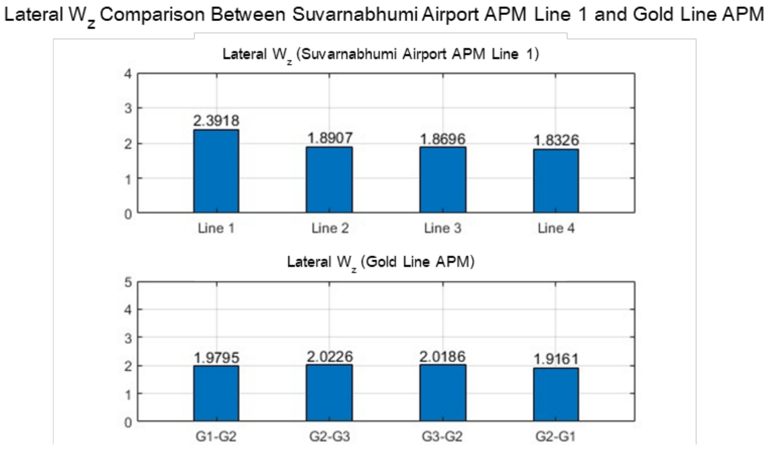


Fig. 7 Graph shows Lateral W_Z Comparison between Suvarnabhumi Airport APM Line 1 and Gold Line APM

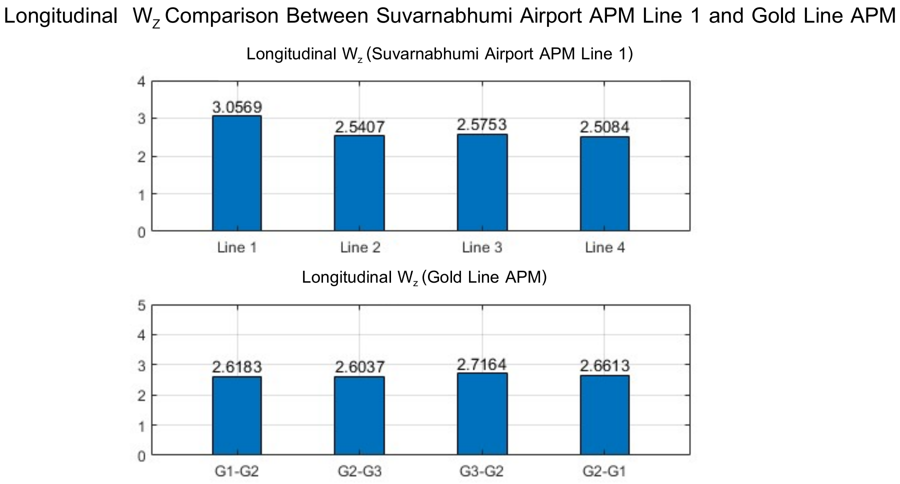


Fig. 8 Graph shows Longitudinal W_Z Comparison between Suvarnabhumi Airport APM Line 1 and Gold Line APM

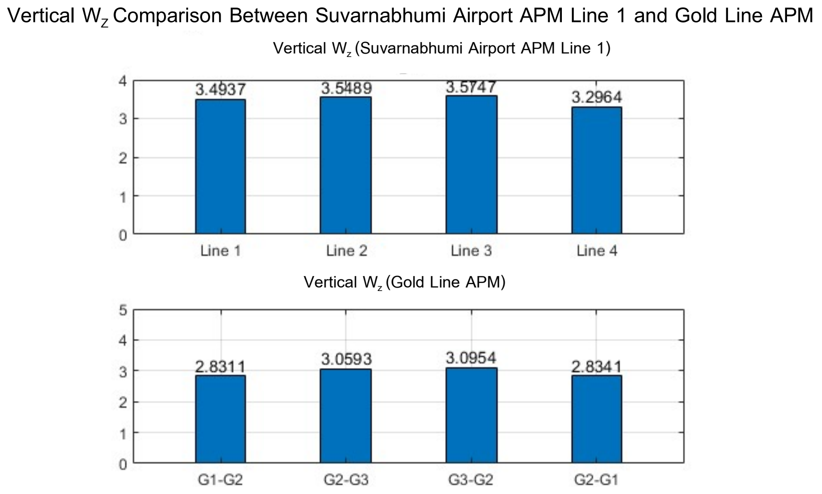


Fig. 9 Graph shows Vertical W_Z Comparison between Suvarnabhumi Airport APM Line 1 and Gold Line APM

สรุป

จากการศึกษาความสะดวกสบายในการโดยสารของรถไฟฟ้าเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิระหว่างอาคารผู้โดยสารหลักกับอาคารเทียบเครื่องบินรองหลักที่ 1 และรถไฟฟ้าสายสีทอง พบว่าเมื่อนำค่าความเร่งที่วัดได้จากอุปกรณ์มาคำนวณค่า W_z โดยรถไฟฟ้าเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีค่า W_z สูงกว่ารถไฟฟ้าสายสีทองทั้งแนวยาว แนวขวาง และแนวดิ่ง ดังนั้นรถไฟฟ้าสายสีทองจึงมีความสะดวกสบายในการโดยสารมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบค่า W_z ในแนวดิ่งจะพบว่ารถไฟฟ้าสายสีทองมีความสะดวกสบายในการโดยสารมากกว่า 15 % ซึ่งในอนาคตอาจนำไปสู่การปรับรูปแบบในการเดินรถของรถไฟฟ้าเชื่อมอาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานสุวรรณภูมิให้มีความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น เช่น การลดความเร็ว การเพิ่มจำนวนรถเพื่อเพิ่มเที่ยวรถให้มีความถี่มากขึ้น เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและหัวหน้าภาควิชาสาขาวิศวกรรมเครื่องกลภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในขณะศึกษาและ บริษัท การท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) และ บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่อำนวยความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูลของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (APM) ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ และระบบขนส่งมวลชนรถไฟฟ้าสายสีทอง ท้ายนี้ขอขอบคุณผู้อุปการะคุณที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและเป็นแรงผลักดันมาตลอด

เอกสารอ้างอิง

Andersson, E., Berg, M., Stichel, S. 2014. Rail Vehicle Dynamics. KTH. Sweden.

Haupenthal, E. 2017. Siemens builds fully automated people mover at Bangkok Airport. Siemens AG. https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-builds-fully-automated-people-mover-bangkok-airport

Jaisaard, K., Santipach, W., Siwakosit, W. 2020. A comparative study of ride quality between EMU-A1 and EMU-B1 trains of BTS on Sukhumvit Line from N8 to E14 Stations. Kasetsat University, Bangkok.

Liu C., Thompson, D., Griffin, M.J., Entezami, M. 2019. Effect of train speed and track geometry on the ride comfort in high-speed railways based on ISO 2631-1. Journal of Rail and Rapid Transit 234: 765–778. doi.org/10.1177/0954409719868050

ISO2631-1. 1997. Mechanical Vibration and Shock, Vol. 1.

Limited, A.O.T.P.C. 2022. Suvarnabhumi Airport Development Project Phase 2 (โครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ระยะที่ 2). https://ocms.airportthai.co.th/

SAS, S.M. 2017. The latest generation of fully automated people mover. Automated people mover – VAL. siemens mobility SAS. https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/val-systems.html

การศึกษาความแตกต่างของแรงดันและปริมาณท่อที่ใช้ในการออกแบบระบบจ่ายน้ำประปา รูปแบบระบบท่อประธานกับรูปแบบระบบวงจรรวมโดยใช้โปรแกรมออกแบบโอเพ่นโฟลวส์ วอเตอร์เจมส์

Study of differentiation of pressure and number of pipe for water supply in main pipe system and ring loop pipe system by OpenFlows WaterGEMS program

ปกชวัช โมกขมรรคกุล, พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ*

Pokchawat Mokkhamukkul, Peerakarn Banjerdkij*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pbanjerdkij@gmail.com

บทคัดย่อ

ในงานออกแบบระบบสาธารณูปโภคประปา ในประเทศไทยไม่นิยมใช้การออกแบบระบบท่อวงจรรวม (Ring Loop Pipe System) เนื่องจากมีความยุ่งยากในการคำนวน และไม่มีข้อบ่งชี้หรือข้อเปรียบเทียบของความคุ้มค่าในการออกแบบระหว่างระบบท่อประธาน (Main Pipe System) และระบบวงจรรวม (Ring Loop Pipe System) งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อบ่งชี้ข้อมูลเพื่อเป็นทางเลือกประกอบการตัดสินใจของผู้ออกแบบ ระหว่างความแตกต่างของแรงดันและปริมาณท่อของการออกแบบระบบท่อประธาน (Main Pipe System) ที่เป็นการใช้ท่อ 1 ชุด และระบบวงจรรวม (Ring Loop Pipe System) ที่เป็นการใช้ท่อมากกว่า 1 ชุด งานวิจัยนี้คำนวณหาค่าแรงดันในท่อโดยโปรแกรมโอเพ่นโฟลว์ วอเตอร์เจมส์ (OpenFlows WaterGEMS) และสมการของเฮเซน วิลเลียมส์ (Hazen–Williams equation) โดยทำการศึกษาในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมขนาด 1,987.61 ไร่ มีการกำหนดให้แรงดันตั้งต้นน้ำเท่ากับ 30 เมตรน้ำ ความเร็วน้ำไม่เกิน 3 เมตรต่อวินาที พบว่าระบบท่อประธานมีแรงดันต่ำสุดในระบบที่ 8.48 เมตรน้ำ แรงดันสูงสุดที่ 37.46 เมตรน้ำ ในขณะที่ระบบวงจรรวมมีแรงดันต่ำสุดในระบบที่ 16.18 เมตรน้ำ แรงดันสูงสุดที่ 36.95 เมตรน้ำ ซึ่งแสดงว่าความสามารถในการจ่ายน้ำขั้นต่ำของระบบวงจรรวมมากกว่าระบบท่อประธาน 90.80 เปอร์เซ็นต์ และต้นทุนค่าวัสดุท่อสูงกว่าระบบท่อประธาน 4.07 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: การคำนวณการไหล, ท่อวงจรรวม, ท่อประธาน, ต้นทุนการออกแบบระบบท่อ, เครือข่ายท่อ, โอเพ่นโฟลวส์ วอเตอร์เจมส์

Abstract

In Thailand, The Ring Loop Pipe System is rarely used to Design the Water Supply System due to Complicated Calculations. In addition, there is no Comparison data of Advantages and Costs between Main Pipe System and Ring Loop Pipe System. Therefore, The Purpose of This research was to present the supporting information as an alternative decision for Designer. This research is aimed to study the differentiation of pressure and number of pipes of Main Pipe System that uses one set of pipe and Ring Loop Pipe System that uses more than one set of pipes. This research is calculated pressure in pipes by OpenFlows WaterGEMS program and Hazen–Williams equation. This research is studied at 1,987.61 rai of industrial estate. Determine initial water pressure at 30 meter of water (mH_2O) and velocity not greater than 3 meters per second (mps). The Resultd of Main Pipe System and Ring Loop Pipe System at The lowest pressure are 8.48 mH2O and 16.80 mH2O while highest pressure are 37.46 and 36.95 mH2O respectively which means the system's Capacity and Pipe material cost of Ring Loop Pipe System is higher than Main Pipe System at 90.80 percent (%) and 4.07% respectively.

Keywords: Design pipe cost, Hydraulic calculation, Loop system, Main system, OpenFlows WaterGEMS Pipeline network

คำนำ

ปัจจุบันการออกแบบระบบท่อการจ่ายน้ำในประเทศไทยนิยม ใช้การจ่ายน้ำระบบท่อประธาน(Main Pipe System) (เกรียงศักดิ์, 2557) คือการจ่ายน้ำจากจุดต้นทางไปยังปลายทางด้วยท่อเพียง 1 ชุด แล้วแตกย่อยไปเป็นท่อแขนงต่างๆ ภายในพื้นที่โครงการ โดยคำนวณปริมาณการใช้น้ำหลักในแต่ละพื้นที่ของโครงการและนำมาคำนวณหาขนาดท่อที่ใช้ในแต่ละพื้นที่ ทำให้เมื่อโครงการมีพื้นที่ขนาดใหญ่ พบปัญญาในเรื่องของแรงดันน้ำที่มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ของโครงการ โดยเฉพาะจุดต้นทางและจุดปลายทาง ที่มีปัญหาในเรื่องของแรงดันน้ำอย่างชัดเจน วิธีการออกแบบระบบท่อวงจร (Ring Loop Pipe System) คือ การออกแบบการจ่ายน้ำจากจุดต้นทางไปยังปลายทางโดยมีท่อมากกว่า 1 ชุดในการจ่ายน้ำและลักษณะการเดินท่อเป็นวงกลม เพื่อใช้ในการกระจายแรงดันและเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันในระบบการจ่ายน้ำของโครงการ ทั้งนี้การออกแบบท่อแบบระบบท่อวงจร (Ring Loop Pipe System) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2557) ในพื้นที่ขนาดใหญ่มีตัวแปรและขอบเขตพื้นที่จำนวนที่ต้องนำมาคำนวณจำนวนมากการคำนวณค่าไฮโดรลิคโหลดด้วยตัวเองนั้นมีโอกาสผิดพลาดได้มาก จึงได้เลือกใช้โปรแกรมมาช่วยในการคำนวณ หาค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ต่างๆ โดยปัจจุบันโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบระบบการจ่ายน้ำมีหลากหลายโปรแกรม ทั้งชนิดประเภท ฟรีแวร์ (Freeware) และแชร์แวร์ (Shareware) อาธิเช่น Pipe Network Analysis, EPANET 2.0, Pipe Flow และ OpenFlows WaterGEMS เป็นต้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม OpenFlows WaterGEMS เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการใช้งานรวมกับโปรแกรม Autocad และโปรแกรมอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี มีความสามารถในการเลือกรูปแบบการคำนวณ เช่นการคำนวณด้วยสมการของ Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Mannings, Modified Hazen-Williams จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายท่อส่งน้ำประปาด้วยโปรแกรม EPANET 2.0 (วิลาสินี, 2564) ที่มีการเปรียบเทียบการใช้สมการของ Darcy-Weisbach และ Hazen-Williams พบว่าค่าความดันในระบบท่อ (Pressure) ของสมการ Darcy-Weisbach มีค่าแรงดันในระบบสูงกว่าในทุกผลการทดลอง โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้สมการของ Hazen-Williams ในงานวิจัยฉบับนี้ ถึงแม้ว่าสมการของ Darcy-Weisbach จะเป็นสมการที่ถูกพัฒนาต่อจากสมการของ Hazen-Williams แต่เนื่องจากสมการของ Hazen-Williams เป็นสมการตั้งต้นของการคำนวณการสูญเสียในเส้นท่อ เป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบระบบท่อชลประทานและการจ่ายน้ำ ซึ่งมีผลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมากกว่าสมการของ Darcy-Weisbach

โดยงานวิจัยนี้ใช้ประกอบการออกแบบ นิคมอุตสาหกรรมโรจนะหนองใหญ่ ครอบคุมพื้นที่ขนาด 1,987.61 ไร่ จัดเป็นนิคมอุตสาหกรรมลำดับที่ 61 ในพื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (อีอีซี) ครอบคลุมกลุ่มอุตสาหกรรมเป้าหมาย ได้แก่ อุตสาหกรรมอิเลคทรอนิคส์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและชิ้นส่วน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมเกี่ยวกับการเกษตร อุตสาหกรรมเบาอุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องประดับ อุตสาหกรรมบริการเช่น คลังสินค้า โลจิสติกส์ การวิจัยและพัฒนา และกลุ่มอุตสาหกรรมที่ได้รับการส่งเสริมตามโครงการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC)

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบจ่ายน้ำประปาภายในของโครงการออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบท่อประธาน (Main Pipe System) และระบบวงจรรวม (Ring Loop Pipe System) โดยให้ความสำคัญของค่าแรงดันขั้นต่ำหรือแรงดันพร้อมใช้งานและต้นทุนเป็นหลัก เพื่อแสดงความแตกต่างของการออกแบบระบบท่อประธาน (Main Pipe System) และระบบวงจรรวม (Ring Loop Pipe System) สำหรับใช้พิจารณาในการออกแบบระบบจ่ายน้ำของโครงการ นิคมอุตสาหกรรมโรจนะหนองใหญ่และแสดงให้เห็นข้อบ่งชี้หรือข้อเปรียบเทียบของความคุ้มค่าในการออกแบบระหว่างระบบท่อประธาน (Main Pipe System) และระบบวงจรรวม (Ring Loop Pipe System) เพื่อใช้เป็นทางเลือกและข้อพิจารณาในการออกแบบของผู้ออกแบบ

อุปกรณ์และวิธีการ

โปรแกรม OpenFlows WaterGEMS เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำทางชลศาสตร์ ในระบบเครือข่าย ภายใต้สมการทางคณิตศาสตร์ของ Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Mannings, Modified Hazen-Williams เพื่อใช้ในการออกแบบระบบท่อและสร้างแบบจำลอง มีกระบวนการออกแบบดัง Fig. 1

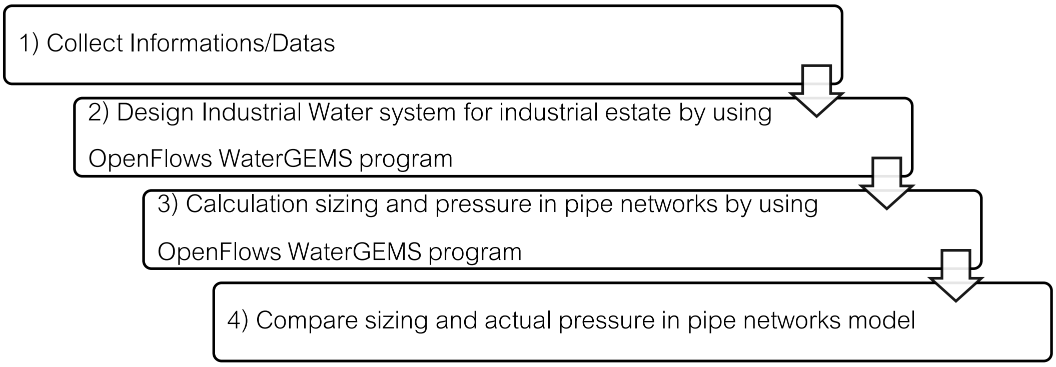


Fig.1 Modeling process in design

วิธีการออกแบบและเปรียบเทียบระบบการจ่ายน้ำภายในพื้นที่โครงการ

1. เก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น ปริมาณความต้องการน้ำใช้ของเขตอุตสาหกรรม ข้อกำหนดในการออกแบบดังนี้ ใช้สมการของเฮเซน วิลเลียมส์ (Hazen–Williams equation) ในการคำนวณโดยกำหนด C เท่ากับ 150 มีจุดส่งน้ำตั้งต้น 4 ตำแหน่ง แรงดันตั้งต้นน้ำเท่ากับ 30 เมตรน้ำ ความเร็วน้ำไม่เกิน 3 เมตรต่อวินาที ปริมาณน้ำใช้ 4 ลบ.ม./ไร่/วัน ตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2562) และค่าระดับความสูงของพื้นที่จริง ใช้ประกอบการในการคำนวณแรงดัน (ธัญดร, 2553)

2. ออกแบบและสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบเป็น 2 ระบบคือ ระบบท่อประธาน (Main Pipe System) และระบบท่อวงจร (Ring Loop Pipe System) ให้รูปแบบการเดินท่อแตกต่างกันน้อยที่สุด

2.1 ระบบท่อประธาน (Main Pipe System) คือวิธีการจ่ายน้ำแบบเส้นตรง เพื่อหาแนวท่อที่สั้นที่สุด ในการกระจายน้ำไปยังพื้นที่ต่างๆ ภายในโครงการ ลักษณะการเดินท่อในระบบท่อประธานดังแสดงใน Fig. 2 และ Fig. 4A ตามลำดับ

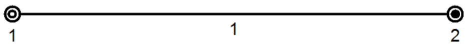


Fig. 2 Type of water supply by Main pipe system

2.2 ระบบท่อวงจร (Ring Loop Pipe System) คือการจ่ายน้ำจากจุดต้นทางไปยังปลายทางโดยมีท่อมากกว่า 1 ชุดในการจ่ายน้ำ ลักษณะการเดินท่อเป็นวงรอบ ดังแสดงใน Fig. 3 และ Fig. 4b ตามลำดับ

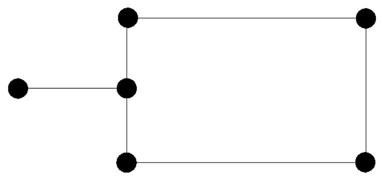


Fig. 3 Type of water supply by Ring Loop Pipe System

3. การคำนวณหาขนาดและแรงดัน โดยใช้โปรแกรม OpenFlows WaterGEMS

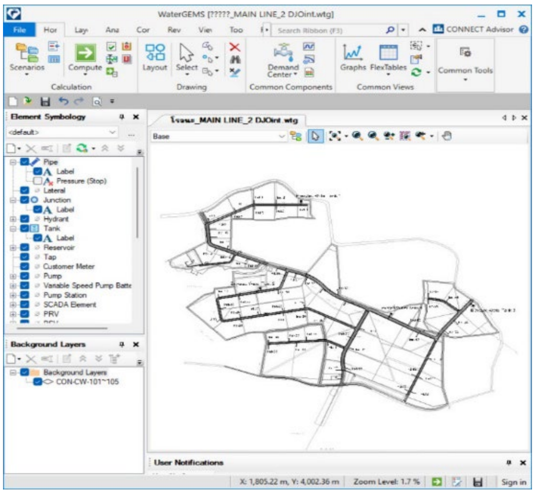


Fig. 4 User Interface of OpenFlows WaterGEMS

4. เปรียบเทียบความแตกต่างของ ระบบท่อประธาน (Main Pipe System) และระบบท่อวงจร (Ring Loop Pipe System) โดยหาความแตกต่างทางด้านแรงดันในจุดต่างๆ ของสองระบบ และเปรียบเทียบต้นทุนทางด้านวัสดุของทั้งสองระบบ

พื้นที่การศึกษา

โครงการนิคมอุตสาหกรรมโรจนะหนองใหญ่ ตั้งอยู่ที่ตำบลห้างสูง อำเภอหนองใหญ่ และตำบลหนองไผ่แก้ว อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี ซึ่งมีพื้นที่ 1,987.61 ไร่ ดังแสดงใน Fig. 5 ออกแบบโครงการเป็น 2 ระบบคือ ระบบท่อประธาน (Main Pipe System) และระบบท่อวงจร (Ring Loop Pipe System) ให้ลักษณะการเดินท่อใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยรูปแบบท่อวงจรจะมีการเชื่อมปลายท่อให้ถึงกันเป็นวงรอบ และต่อเชื่อมทุกระบบเข้าหากัน

Fig.5 Master plan

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผู้วิจัยได้แบ่งพื้นที่ของโครงการออกแบบ 4 ส่วนใหญ่สำหรับส่งจ่ายน้ำ แรงดันตั้งต้น 30 mH_2O ดังแสดงใน Fig. 6 จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการออกแบบระบบจ่ายน้ำในรูปแบบท่อประธาน (Main pipe system) ดังแสดงใน Fig. 7A กับท่อวงจรรวม (Ring Loop pipe system) ดังแสดงใน Fig. 7B ในสมการของ Hazen-Williams พบว่าแรงดันน้ำในระบบท่อวงจรรวม (Ring Loop pipe system) มีความดันขั้นต่ำสูงกว่า ระบบท่อประธาน (Main pipe system) 90.8% ที่ขนาดท่อเท่ากัน แนวการเดินท่อเดียวกัน แต่จะมีแรงดังสูงสุดต่ำกว่าระบบท่อประธาน (Main pipe system) 1.36% ดังแสดงใน Fig. 8A และมีอัตราการสิ้นเปลืองวัสดุท่อมากกว่าระบบท่อประธาน (Main pipe system) 4.07% ดังแสดงใน Table 1

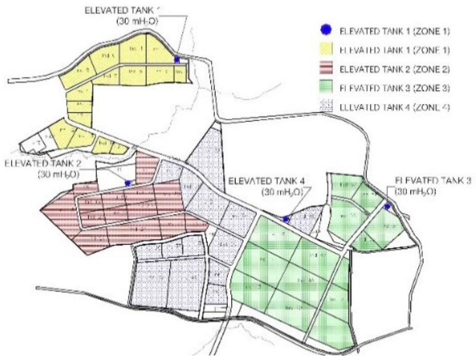


Fig. 6 Master plan

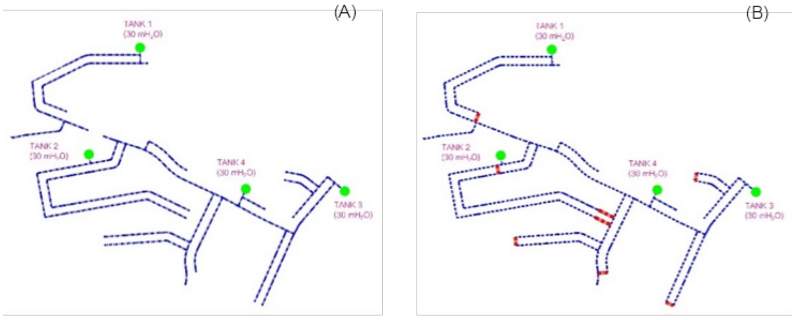


Fig. 7 Pattern of main pipe system and ring loop pipe system

โครงการมีพื้นที่เป็น 4 ส่วนย่อยตามแหล่งจ่ายน้ำต้นทางที่แรงดัน 30 mH_2O ดังแสดงใน Fig. 6 จากผลการวิจัยพบว่าแรงดันในส่วนที่ 1 (ZONE 1), 2(ZONE 2), 3 (ZONE 3), 4(ZONE 4) เมื่อเปรียบเทียบแรงดันระหว่างระบบท่อประธานและท่อวงจรรวม พบว่าระบบวงจรรวมมีแรงดันขั้นต่ำสูงกว่าระบบท่อประธาน +8.94%, +101.41%, +233.47%, +20.12% ตามลำดับ และเมื่อเทียบแรงดันสูงสุดระหว่างท่อประธานและท่อวงจรรวมพบว่า ระบบท่อวงจรรวมมีแรงดันสูงสุดลดลง -3.96%, -0.53%, -1.36%, -0.31% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ Figs.8B–8E

ทั้งนี้ผลการทดลองข้างต้นมีการนำค่าระดับความสูงของพื้นที่มาประกอบด้วย จึงทำให้บางช่วงมีค่าแรงดันมากกว่าแรงดันตั้งต้นอันเนื่องมาจากระดับความสูงของพื้นที่ ที่มีระดับต่ำกว่าพื้นที่ต้นทาง ทำให้มีความดันเสริมจากค่า

ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก(g) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีลักษณะการเดินท่อในรูปแบบเดียวกัน (Wu, 2015) พบว่ามีความดันลด (pressure drop) ในระบบท่อวงจรรวม (Ring Loop pipe system) น้อยลงกว่าระบบท่อประธาน (Main pipe system) เช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าส่วนที่ 1 (ZONE 1) มีความใกล้เคียงกันในด้านของแรงดันในระบบท่อประธานและวงจรรวมเป็นอย่างมาก เนื่องจากพื้นที่ส่วนที่ 1 (ZONE 1) มีลักษณะของภูมิประเทศแยกออกจากพื้นที่อื่นๆ อย่างชัดเจน ทำให้ไม่มีแรงดันเสริมจากจุดปล่อยแรงดันอื่นๆ มาเสริมแรงดันรวมในระบบ แต่พบว่ามีความแตกต่างของแรงดันได้อย่างชัดเจน ส่วนที่ 2 (ZONE 2) เป็นส่วนที่มีลักษณะของภูมิประเทศต่ำที่สุดในพื้นที่ของโครงการทำให้ การออกแบบในระบบวงจรรวม ได้รับแรงดันเสริมจากจุดปล่อยแรงดันอื่นๆ และสภาพของความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกมาเสริมในระบบมาก ส่วนที่ 3 (ZONE 3) มีลักษณะของภูมิประเทศเป็นจุดสูงสุดของพื้นที่โครงการและลดระดับลงมาเชื่อมต่อกับพื้นที่ ส่วนที่ 4 (ZONE 4) ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างในด้านของแรงดัน เนื่องจากมีการเปลี่ยนค่าระดับของพื้นที่ตลอดเส้นแนวการเดินท่อ พื้นที่ส่วนที่ 4 (ZONE 4) มีลักษณะของภูมิประเทศเป็นแนวทางผ่านของแนวการเดินท่อจากส่วนที่ 3 (ZONE 3) ไปยังพื้นที่ส่วนที่ 2 (ZONE 2) ลักษณะทางภูมิประเทศคล้ายกับพื้นที่ในส่วนที่ 3 (ZONE 3)

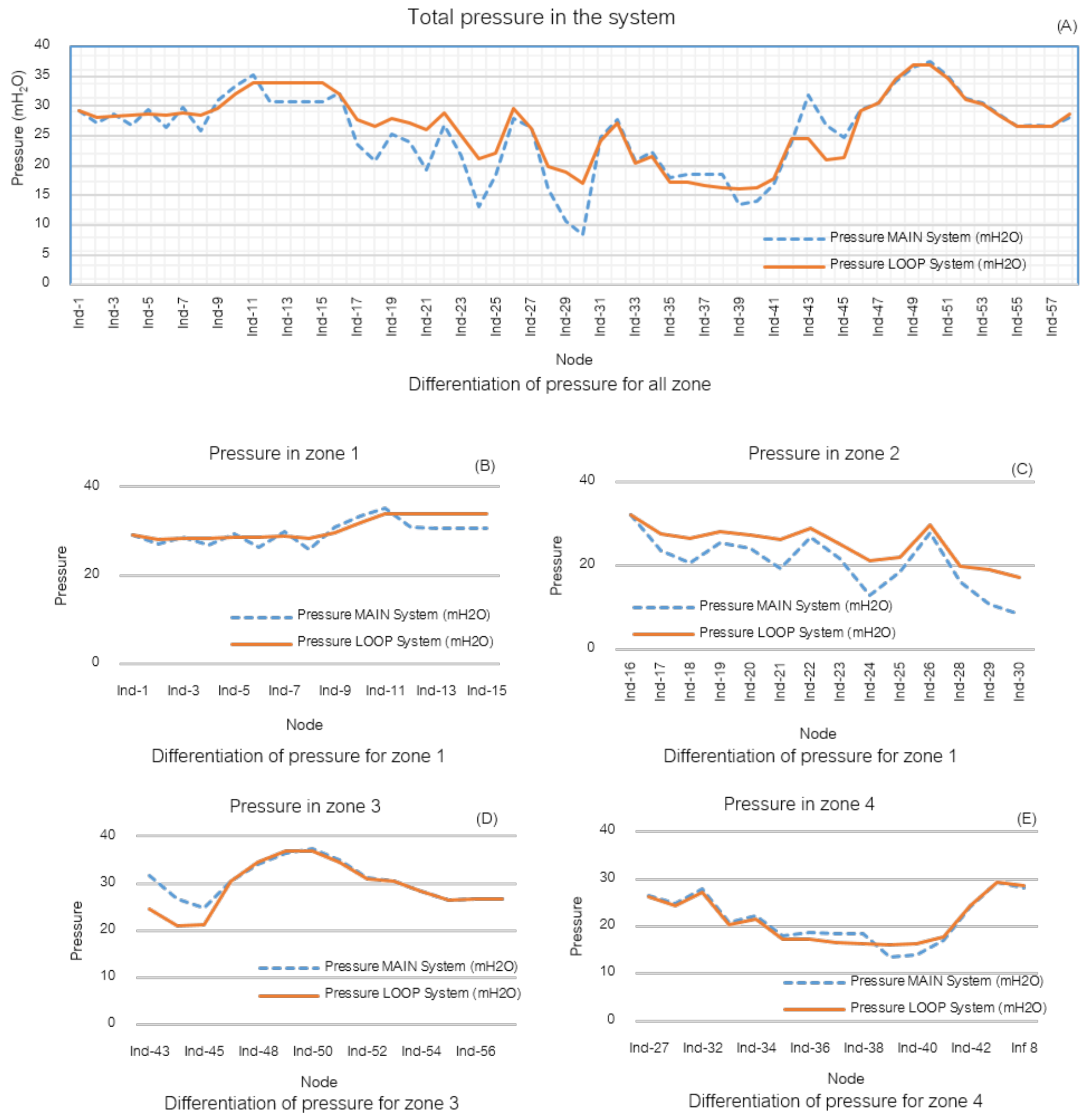


Fig. 8 Differentiation of pressure between Main pipe system and Ring loop system

จากการเปรียบเทียบต้นทุนค่าวัสดุ พบว่าอัตราการใช้วัสดุท่อทั้งหมดของโครงการในระบบท่อวงจร (Ring Loop pipe system) สูงขึ้นมากกว่าระบบท่อประธาน (Main pipe system) 4.07% สามารถแสดงได้ดัง Table 1

Table 1 Comparison of pipe's quantity between Main pipe system and Ring loop system

PIPE SIZE	MAIN SYSTEM (BAHT)	RING LOOP SYSTEM (BAHT)	VALUE DIFFERENCE COST (%)
DN100	128,650.00	128,650.00	-
DN150	10,054,880.00	10,186,308.00	(1.31)
DN200	1,092,495.00	1,596,432.00	(46.13)
DN250	4,316,924.00	4,316,924.00	-
total	15,592,949.00	16,228,314.00	(4.07)

สรุป

จากผลการทดลองพบว่าในการออกแบบระบบท่อวงจรรวม (Ring Loop pipe system) ได้แรงดันในระบบขั้นต่ำสูงกว่าระบบท่อประธาน (Main pipe system) ทำให้มีประสิทธิภาพของแรงดันพร้อมใช้งานสูงกว่า ที่ปริมาณความต้องการน้ำ ขนาดท่อ และแรงดันตั้งต้นเดียวกัน โดยได้ผลการคำนวณดังนี้ ระบบท่อประธาน (Main pipe system) แรงดันน้ำที่จุดต่ำสุดของระบบที่ 8.48 mH_2O สูงสุดที่ 37.46 mH_2O ในระบบท่อวงจรรวม (Ring Loop pipe system) จุดต่ำสุดของระบบที่ 16.18 mH_2O สูงสุดที่ 36.95 mH_2O ปริมาณการสิ้นเปลืองวัสดุท่อสูงกว่าระบบท่อประธาน (Main pipe system) 4.07%

เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2557. วิศวกรรมประปา. มิตรนราการพิมพ์. กรุงเทพฯ.

วิลาสินี สุขขำ. 2564. การออกแบบระบบท่อส่งน้ำประปาและการศึกษาความดันในเส้นท่อในพื้นที่อำเภอขุนหาญ จังหวัดศรีสะเกษ สำหรับความต้องการการใช้น้ำภายในระยะ 10 ปี และ 20 ปี โดยใช้โปรแกรม EPANET 2.0. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันน้ำและสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. แนวทางการประเมินการใช้น้ำภาคอุตสาหกรรมสำหรับประเทศไทย. นีโอ ดิจิตอล. กรุงเทพฯ.

ธัญดร ออกวะลา. 2553. กลศาสตร์ของไหล. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม.

Bentley. 2021. Water distribution analysis and design software. https://www.bentley.com/

Moise, B.K. 2022. Integrating Gis and hydraulic modeling for sustainable design of water distribution networks: A case study of the city of Bukavu in Dr Congo. M.Sc. thesis. Pan African University Institute for Water and Energy Sciences, Tlemcen, Algeria.

Wu, D., Yang, B., Liu, Y. Pressure drop in loop pipe flow of fresh cemented coal gangue–fly ash slurry: Experiment and simulation. Adv. Powder Technol. 26: 920–927. doi.org/10.1016/j.apt.2015.03.009

Comparison design of constructed and packaged wastewater treatment system for nitrogen and phosphorus removal

Chanyoot Aiemsumanga, Peerakarn Banjerdkita*

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pbanjerdkij@gmail.com

Abstract

This study aims to compare the differences in design and study the strengths and restrictions of packaged and constructed wastewater treatment system for nitrogen and phosphorus removal which their applications could be alternative system for domestic wastewater treatment. All design parameters of packaged and constructed system achieved design criteria for preliminary and primary treatment, except 63 $m^3/m^2{\cdot}d$ of overflow rate at peak hourly in packaged system. The constructed wastewater treatment system had a distinctive performance for 98% of nitrogen removal when the SRT is 9.26 h in aeration tank. Because the selection of SRT is directly related to nitrification process which perform the efficiency of nitrogen removal. The other way, the packaged wastewater treatment system with 287.23 m^3 of aeration tank and 5 h of SRT had a higher phosphorus removal efficiency at 85.4% that occurred by system with shorter SRT. Because of low SRT is used to prevent nitrification which available for decreasing the phosphorus removal efficiency. The comparison revealed that the packaged system can be used as a cost-effective treatment to achieved effluent standard for nutrients removal with limited application for treatment. But the constructed system is particularly attractive for variable application, depending on the desired results.

Keywords: Constructed wastewater treatment system, Nitrogen removal, Packaged wastewater treatment system, Phosphorus removal

Introduction

Recently, packaged wastewater treatment system has been using for several wastewater treatment projects. Because it has a greater design time saving, shorter installation time and lower cost when compared to wastewater treatment system by reinforced concrete structure (Nasr and Mikhaeil, 2014). Even packaged wastewater treatment tanks have more convenience but still have some limitation. Consequently, several wastewater treatment projects have considered the reinforced concrete structure for wastewater treatment system. Distinctive points of this structure are more many choices in shape and size design.

Both of wastewater treatment systems have distinct limitations but they must have efficiency to release the effluent as law defined. So, the main factor that made the effective wastewater treatment system operation almost depends on design (Tang and Ngu, 2011). Commonly, their design was defined by criteria standard for each treatment unit. Criteria standard is rarely a problem for reinforced concrete structure, but it will be a problem for package wastewater treatment tanks. Because of limitation design, the packaged wastewater treatment tanks must be designed in a limited size not to be too large in order to maintain the tank size (Abbassi et al., 2018) and possible have design which could not follow the criteria standard. Causing the effluent quality is not comply to law or regulation, especially nutrient. This study aims to compare the difference of these wastewater treatment design using the completely mixed activated sludge system for information in the decision of design engineer or interested person in wastewater treatment system.

Materials and Methods

Selection of wastewater treatment system

The domestic wastewater was studied of characteristics and information whereas maximum flowrate is 1,000 m^3/d. The packaged wastewater treatment system was defined by specification of large biological wastewater treatment system (Activated Sludge System) as SATS (AME Series) in Table 1.

Table 1 Specification of large biological wastewater treatment system as SATS (AME Series)

Specification	AME-2200	AME-2400	AME-2600	AME-2800	AME-3000	A
Flow rate (m^3/day)	440	480	520	560	600	1000
BOD influent (mg/l)	250	250	250	250	250	250
BOD load (kg/day)	110.00	120.00	130.00	140.00	150.00	250.00
BOD effluent (mg/l)	20	20	20	20	20	20
Capacity (m^3)						
Solid separation part and equalization part	91.77	98.73	106.48	113.77	121.53	260.85[1]
Aerated part	116.46	125.47	136.28	145.29	156.11	287.23[1]
Sedimentation part	37.92	56.89	56.89	56.89	56.89	107.00[1]
Sludge holding part	69.76	76.21	81.74	88.2	94.66	154.01[1]

A Packaged wastewater treatment system for this study, [1] Assumption values from specification sheet of AME Series

This packaged wastewater treatment system used a completely mixed activated sludge system (CMAS) for treating wastewater. The activated sludge and the wastewater were completely mixed throughout the entire aeration tank. All processes involved: (1) solid separation, (2) equalization, (3) aeration, (4) sedimentation, and (5) sludge digestion as Fig. 1 is shown.

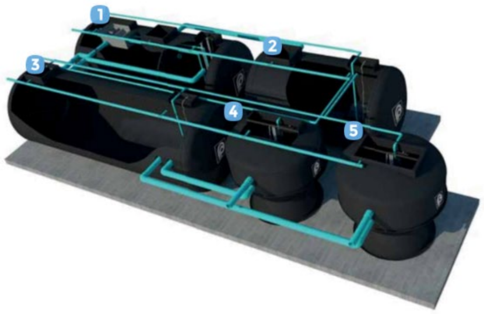


Fig. 1 Cross - section perspective of packaged wastewater treatment process

Study design information

The design information was chosen following typical design criteria. There are unit operations involved: preliminary and primary treatment, secondary treatment, and sludge treatment. The nitrogen removal was performed by nitrification design which the specific growth rate (μ_n) for the nitrifying organisms according to Equation 1 (Metcalf and Eddy, 2003):

$$\mu_n = \left(\frac{\mu_{nm} N}{K_n + N}\right)\left(\frac{DO}{K_0 + DO}\right) - k_{dn} \tag{1}$$

The phosphorus removal will be determined using a phosphorus used for heterotrophic biomass synthesis in addition to phosphorus storage due to biological phosphorus removal according to Equation 2 (Metcalf and Eddy, 2003):

$$P_{x,\,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)SRT} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{den})SRT} \tag{2}$$

Thus, the comparison design was concluded following typical design criteria and compliance with domestic effluent standards. The constructed wastewater treatment system for this study was defined similar workflow for each unit operation as Fig. 2 is shown.

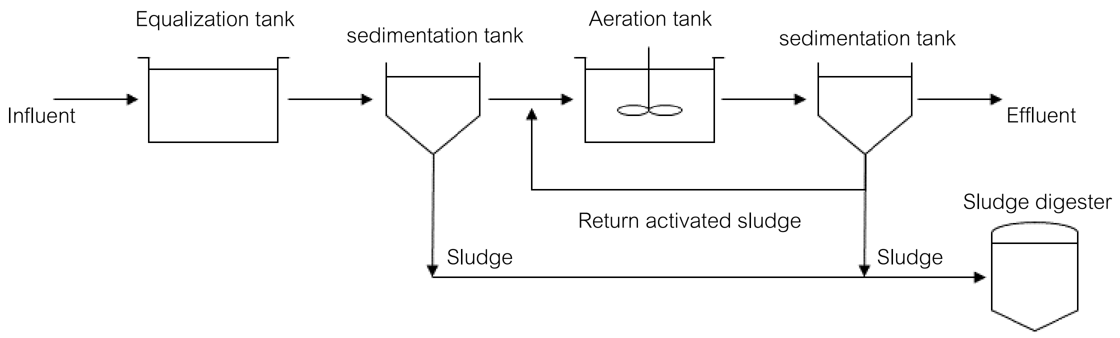


Fig. 2 Schematic diagram of constructed wastewater treatment system

Results and Discussion

Preliminary and primary treatment

Primary sedimentation tank

The design criteria of primary sedimentation tanks were used include (1) followed by secondary sedimentation process, (2) detention time at 1–4 h, and (3) average and peak hourly overflow rate at 30 – 50 and 70–130 $m^3/m^2 \cdot d$, respectively. These 3 criteria were chosen without using the weir loading because it generally has little effect on the efficiency of the sedimentation tank (Metcalf and Eddy, 2003). The size of packaged tank was a rectangular with a height of 3.5 m. For the constructed tank, design information was determined 40 $m^3/m^2 \cdot d$ of overflow rate and 3.5 m of side water depth. The design information of packaged and constructed tank was met EEAT's design criteria (Pollution Control Department and Environmental Engineering Association of Thailand, 2003). In case of higher tank volume, it will affect surface area increasing, lower overflow rate and longer detention time which may be causes of noncomplier the design criteria. On the other hand, the lower tank volume will be the cause of the higher overflow rate that made the suspension of settled particles (Metcalf and Eddy, 2003). The primary sedimentation is used as preliminary step to remove BOD and TSS following the formula of Crites and Tchobanoglous (1998) according to Equation 3:

$$R = \frac{t}{a + bt} \tag{3}$$

Typical performance for the removal of BOD and TSS in primary sedimentation tanks, as a function of the detention time and constituent concentration. Efficiently designed primary sedimentation tanks for packaged and constructed tank could remove 58 and 57 percent of the suspended solids and 36 and 35 percent of the BOD at average flow as range of criteria defined.

Equalization tank

The equalization tank has chosen design criteria followed Peter Dold (1982) for detention time (4–6 h) and formular of Commonwealth of Massachusetts (2014) for tank volume (An average flow greater than 379 m^3/d, the volume is 25% of average flow). To comply design criteria of primary sedimentation for packaged treatment system, the volume of equalization tank was defined at 160.85 m^3 as 16.085 percent of average flow. Conversely, volume of constructed tank was defined at 25% of the average flow rate. Even the constructed tank is met criteria. A longer detention time, it also required aerator to provide a relatively constant flowrate and aerobic condition to the subsequent treatment processes (Reynolds and Richards, 1996). Therefore, the preliminary treatment of packaged treatment system which is not clearly divided equalization part and sedimentation part should be increased the volume of equalization tank and decreased the volume of primary sedimentation tank. Alternatively, equalization tank can be applied before entering to primary sedimentation. This arrangement can be used to achieve a considerable amount of constituent concentration and flowrate damping (Metcalf and Eddy, 2003), it also reduces the required size of the downstream treatment facilities (Reynolds and Richards, 1996).

Secondary treatment

Aeration tank

The key design concepts are the selection of the SRT, the selection of kinetic and stoichiometric coefficients and application of appropriate mass balances (Metcalf and Eddy, 2003). The computations are typically used for the BOD removal and nitrification process design can be applied by modifying the SRT. The results revealed that aeration volume requirements and SRT also are directly related to nitrification μ_m values. The biomass production also relative to the amount of BOD and nitrogen removed affects the aeration size, the determination of biomass production and the determination of biological phosphorus removal using a mass balance at the influent of the aerator according to Equations 4 and 5, respectively (Metcalf and Eddy, 2003):

$$P_{x,\,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + (k_d)SRT} + \frac{(f_d)(k_d)QY(S_0 - S)SRT}{1 + (k_d)SRT} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + (k_{dn})SRT} \quad (4)$$

$$Q_{RAS}(NO_3\text{-}N)_{inf} + Q_{RAS}(NO_3\text{-}N)_{RAS} = (Q + Q_{RAS})(NO_3\text{-}N)_{Aerated} \quad (5)$$

Table 2 Design summary for aeration tank

Item	Criteria	Design		
	1	A	B	C
SRT, d	3 – 15	5	5	9.26
Aeration tank volume, m^3		287.23	362.95	615.06
Detention time, h	3 – 5	6.89	8.71	14.76
MLSS, mg/l	1500 – 4000	3790.82	3000	3000
MLVSS, mg/l		3146.38	2492.04	2486.63
F/M, kobo/kgMLVSS·d	0.2 – 0.6	0.24	0.24	0.14
V_L, kobo/m^3·d	0.3 – 2.0	0.77	0.61	0.36
Sludge production, kg/d		217.77	217.77	199.20
Q_R/Q	0.25 – 1.00	0.65	0.45	0.45
Air requirement, m^3/god	45 – 90	50.77	50.77	56.46
Effluent BOD, mg/l		<20	<20	8.99
Effluent TSS, mg/l		<30	<30	10
Effluent NH_4-N, mg/l		39.5	39.5	0.5
Effluent P, mg/l		1.46	1.46	1.79

[1]Sririwittayapakorn (2007), A Packaged tank, B Constructed tank, C Constructed tank with nitrification

Table 2 showed that the different results for packaged system and constructed system including performance with nitrification. The packaged system was determined 287.23 m^3 of aeration tank volume. It was found that the 6.89 h of detention time exceeded the design criteria and when determined 5 d of SRT, the other variable values are within design criteria. Even, the SRT in criteria range was determined (3–15 d), it is not cause of air requirement exceeding the criteria. But according to SRT, the detention time cannot be satisfied because it depends on the volume of aeration tank which already defined as specification. The constructed system has a similar result, except for return sludge flow rate (Q_R). Return sludge flow rate was defined by biomass concentration and tank volume which does not fix as specification. For constructed system with nitrification, the results showed it is higher volume for aeration tank by SRT modifying. The variable values are appropriated except the detention time as previously results.

Secondary sedimentation tank

The secondary sedimentation used most is to base the design on a consideration of the surface overflow rate and the solids loading rate. Because steady state operation seldom occurs due to fluctuations in wastewater flowrate, return activated sludge flowrate, and MLSS concentrations, attention to the occurrence of peak events and use of safety factors are important design considerations. The specification of packaged

system is given 3.8 m of depth, but the assumptions of constructed system are given 3.5 m of depth and 16.3 $m^3/m^2 \cdot d$ of overflow rate for secondary sedimentation tank. The nitrification process demonstrated that return sludge flow rate affected to solids loading rate for secondary sedimentation tank. As Table 2 is shown, Q_R/Q for constructed tank and constructed tank with nitrification are not different. The solids loading rate also represents a characteristic value for the suspension under consideration. While the surface overflow rate has been the historical sedimentation tank design parameter, the solid loading rate is considered by some to be the limiting parameter that affects the effluent concentration (Metcalf and Eddy, 2003).

Sludge treatment

The comparison of packaged and constructed system for sludge digester demonstrated that solids retention time (SRT) in digester is related to the volume of digester tank. The digester tank volume can be calculated followed formular of WEF (1998) according to Equation 6:

$$V = \frac{Q_i(X_i + YS_i)}{X(k_d P_v + \frac{1}{SRT})} \qquad (6)$$

The value of 20 days for solids retention time was selected to design the aerobic digester for constructed system. The tank volume is governed by the detention time necessary to achieve the desired volatile solids reduction. Moreover, the concentration of the feed solids digester is also important in the design and operation of the aerobic digester. The higher feed solids concentrations will result in higher oxygen input levels, longer SRT, smaller digester volume requirements, and subsequently increased levels of volatile solids destruction (WEF, 1998). However, the digester volume for packaged system was defined at 154.01 m^3 which made 5.88 days of solids retention time not complying design criteria. To meet requirements for pathogen reduction, the regulations state the solids retention times must be meet the above criteria design. If the design of aerobic digester does not meet the SRTs, it will be necessary to monitor the performance of the process to demonstrate that the pathogen reduction criterion has been met (U.S. EPA, 1995).

Conclusion

Packaged and Constructed wastewater treatment systems were compared design information as nitrogen and phosphorus removal in domestic wastewater. Configuration of aeration tank in constructed system with and without nitrification were evaluated and demonstrated significant treatment with 90.90% and 99.51% BOD removal and 86.36% and 95.45% TSS removal observed at hydraulic retention times with 8.71 and 14.76 d, respectively. Significant nitrogen removal of 98% was observed in constructed system with nitrification in aeration tank at 9.26 d SRT, while significant phosphorus removal of 85.4% was observed in packaged system at 5 d SRT. Effluent quality of packaged and constructed systems already would be achieved standard following designed parameters. Thus, the comparison of packaged and constructed system depends on the application

or desired results. This study revelated that the packaged system can be used as a low-cost system due to its low energy requirement. Conversely, the constructed system can be applied over a wide of SRT, depending on the wastewater characteristic. But there is particularly attractive for large municipalities where space is limited even required more space than packaged system.

References

Abbassi, B.E., Abuharb, R., Ammary, B., Almanaseer, N., Kinsley, C. 2018. Modified septic tank: Innovative onsite wastewater treatment system. Water 10: 578. doi.org/10.3390/w10050578.

Commonwealth of Massachusetts. 2014. Guidelines for the Design, Construction, Operation, and Maintenance of Small Wastewater Treatment Facilities with Land Disposal. Department of Environmental Protection. USA.

Crites, R., Tchobanoglous, G. 1998. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. McGraw-Hill. New York, NY, USA.

Dold, P.L., 1982. Design and control of equalization tanks. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering,University of Cape Town. Cape Town, Republic of South Africa.

Metcalf, Eddy. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse, 4th ed. McGraw-Hill Companies, Inc.Pennsylvania, PA, USA.

Nasr, F.A., Mikhaeil, B. 2015. Treatment of domestic wastewater using modified septic tank. Desalination andWater Treatment 56: 2073–2081. doi.org/10.1080/19443994.2014.961174

Reynolds, T.D., Richards, P.A. 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, 2nd ed. PWS Publishing Company. Boston, MA, USA.

Sririwittayapakorn, S. 2007. Technology of Wastewater, 2nd ed. Kasetsart University. Bangkok, Thailand. [in Thai]

Tang, F.E., Ngu, V.J. 2011. A study of performance of wastewater treatment systems for small sites. International Journal of Environmental and Ecological Engineering 5: 804–810.

U.S. EPA. 1995. Process Design Manual-Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage, EPA/625/R-95/013. Center for Environmental Research Information. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, USA.

WEF. 1998. Manual of Practice No. 11, 5th ed. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, 4thed. Water Environment Federation. Virginia, VA, USA.

การประเมินประสิทธิภาพ และปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอสบีอาร์จำลอง

Evaluation of efficiency and factors of polypropylene microplastic removal in a laboratory-scale SBR wastewater treatment process

ศุทธิณีย์ เศรษฐวานิช*, สุชีลา พลเรือง, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์

Suttinee Sattvanich*, Sucheela Polruang, Varinporn Asokbunyarat

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Suttinee.sa@ku.ac.th

บทคัดย่อ

พลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนนิยมนำมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารแบบใช้แล้วทิ้งก่อให้เกิดขยะพลาสติกจำนวนมาก ขยะพลาสติกบางส่วนจัดการอย่างไม่ถูกวิธีทำให้ขยะพลาสติก และไมโครพลาสติกปนเปื้อนสู่ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (PP MPs) ในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอสบีอาร์ (SBR) จำลอง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์กำหนด SRT 10 และ 15 days และเติมชิ้นไมโครพลาสติกที่ไม่ผ่าน และผ่านกระบวนการ photo-oxidative degradation จำนวน 10 ชิ้น/รอบ บันทึกผลชิ้นไมโครพลาสติกในน้ำทิ้งและสลัดจ์ผลการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกใหม่ประเภทโพลีโพพิลีน ขนาด 4×4 mm. และ 2×2 mm. มีค่า 15% และ 6.5% ตามลำดับ และประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกเก่าประเภทโพลีโพพิลีน ขนาด 2x2 mm. มีค่า 36% โดยขนาดของชิ้นไมโคร-พลาสติก, ลักษณะพื้นผิว, ความหนาแน่น และไบโอฟิลม์บนพื้นผิวของไมโครพลาสติกเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการบำบัดไม-โครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในระบบ SBR จำลอง

คำสำคัญ: ไมโครพลาสติก, โพลีโพพิลีน , เอสบีอาร์

Abstract

Polypropylene plastic is commonly used for single used food packaging, which generates a large amount of plastic waste. The plastic waste that was violate the rule managed causes plastic and microplastic waste contaminate to domestic wastewater treatment systems. This research was to study the efficiency and factors affecting the treatment of polypropylene microplastics (PP MPs) in a simulated domestic wastewater treatment (SBR) system by specifying SRT 10 and 15 days. By adding synthetic wastewater and 10 pieces of new and old PP MPs/cycle and record the microplastic particles in the effluent and sludge. The results show that the treatment efficiency of new polypropylene microplastics size 4×4 mm. and 2×2 mm. were 15% and 6.5% respectively and the treatment efficiency of old polypropylene microplastics size 2×2 mm. was 36%. The percentage of particle size, surface texture, density, and biofilm on the surface were the factors affecting the treatment of polypropylene microplastics in the simulated SBR system.

Keywords: Microplastic, Polypropylene, SBR

คำนำ

ปัจจุบันขยะพลาสติกในประเทศไทยยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากการเติบโตของธุรกิจจัดส่งอาหารออนไลน์ (Online food delivery) ซึ่งเป็นธุรกิจใหม่ภายใต้แพลตฟอร์ม (Platform Economy) ซึ่งเป็นบริการที่ช่วยเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้บริโภค อีกทั้งช่วยเพิ่มยอดขายให้ผู้ประกอบการ เมื่อธุรกิจดังกล่าวได้รับการตอบรับที่ดีขึ้นผลที่ตามมาควบคู่กับการเติบโตของเศรษฐกิจ คือ การเพิ่มจำนวนของขยะพลาสติก ผนวกกับสถารณ์การการระบาดของโรค COVID-19 ที่ยาวนานยิ่งส่งผลให้การสั่งอาหารออนไลน์กลายเป็นเรื่องจำเป็น เมื่อความต้องการสั่งอาหารแบบ food delivery มีมากขึ้นพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (polypropylene , PP) จึงถูกนำมาใช้งานมากขึ้น (บุญชนิต และคณะ, 2564ก, 2564ข) เนื่องจากคุณสมบัติความเหนียว และความสามารถในการทนความร้อนที่สูงมากพอในการบรรจุอาหารได้อย่างปลอดภัย อาทิ ถุงแกงร้อน ถุงหูหิ้ว หรือกล่องพลาสติกที่สามารถนำเข้าไมโครเวฟได้ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักถูกใช้งานเพียงครั้งเดียว และถูกทิ้งโดยไม่ได้มีการคัดแยก ขยะพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (polypropylene, PP) ที่ไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกวิธีสามารถแตกตัวจากพลาสติกขนาดใหญ่กลายเป็นพลาสติกชิ้นเล็กลงได้เรื่อยๆ ดังนั้น เมื่อมีการใช้พลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (polypropylene, PP) มากขึ้น แนวโน้มการเพิ่มจำนวนของไมโครพลาสติกประเภท PP จึงมีความเป็นไปได้มากขึ้น ไมโครพลาสติกเกิดจากการเสื่อมสถาพทางกายภาพ และเคมี ทำให้เกิดการแตกหัก และฉีกขาดของสายโซ่ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดจากขนาดใหญ่เป็นขนาดเล็ก แม้ขนาดจะเล็กลงแต่ยังคงมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีจึงเกิดเป็นวัฏจักรการวนกลับไปปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร (Punyauppa-path, 2019) ซึ่งหนึ่งในสาเหตุของการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมมาจากน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสีย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ และปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (PP MPs) ในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอสบีอาร์ (sequencing batch reactor, SBR) จำลอง

อุปกรณ์และวิธีการ

ระบบ SBR จำลอง

1. เติมหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์และเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Mixed liquor suspended solids, MLSS) อยู่ในช่วง 2,000–4,000 mg/l โดยกำหนดการเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ระบบ (influent) มีค่า BOD_{Inf} เท่ากับ 450 mg/L น้ำทิ้งจากระบบ (effluent) มีค่า $SS_{eff} < 30$ mg/L และมีค่าประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ $COD_{removal} > 90\%$ โดยการวัดค่า COD ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อน – หลังการเดินระบบ

2. เตรียมไมโครพลาสติกสังเคราะห์ประเภทโพลีโพรพิลีน โดยผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีน (PP MPs) ที่นำมาทดสอบ คือ ถุงแกงร้อนใหม่ที่ยังไม่เสื่อมสภาพ (new PP MPs) โดยไม่ผ่านกระบวนการ photo-oxidative degradation และถุงแกงร้อนที่เสื่อมสภาพ (old PP MPs) โดยผ่านกระบวนการ photo-oxidative degradation ที่มีขนาด 2×2 mm. และ 4×4 mm.

3. เดินระบบ SBR จำลอง ที่มีค่า Sludge retention time, SRT 10 days และ15 days โดยกำหนด 1 รอบของระบบ SBR จำลอง ใช้เวลา 24 hr. แบ่งเป็น (Fig. 1)

ขั้นที่ 1–2 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ พร้อมทั้งชิ้นไมโครพลาสติกสังเคราะห์ (MPs) 10 ชิ้น/ 1 cycle เข้าสู่ระบบ (Fill) ใช้เวลา 0.5 hr.

ขั้นที่ 3 ทำปฏิกิริยาด้วยการเติมอากาศ (React) ใช้เวลา 22 hr.

ขั้นที่ 4 ปล่อยตกตะกอน (settle) ใช้เวลา 1 hr.

ขั้นที่ 5–6 ปล่อยน้ำทิ้งและสูบตะกอนส่วนเกินจากระบบ (Draw, decant) 0.5 hr. (Singh and Srivastava, 2011; สุเทพ, 2552)

4. บันทึกผลจำนวนชิ้นไมโครพลาสติก (MPs) ในน้ำทิ้ง (effluent) และสลัดจ์ส่วนเกิน (excess sludge) ต่อ 1 รอบของระบบ SBR จำลอง และบันทึกผลจำนวนชิ้นไมโครพลาสติกทั้งหมดในน้ำทิ้ง (effluent) และสลัดจ์ส่วนเกิน (excess sludge) โดยใช้หลักการสมดุลมวล (mass balance) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีนในระบบ SBR จำลอง

5. ตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นไมโครพลาสติกในน้ำทิ้ง (effluent) และสลัดจ์ส่วนเกิน (excess sludge) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Stereo Microscope Olympus Model SZ61

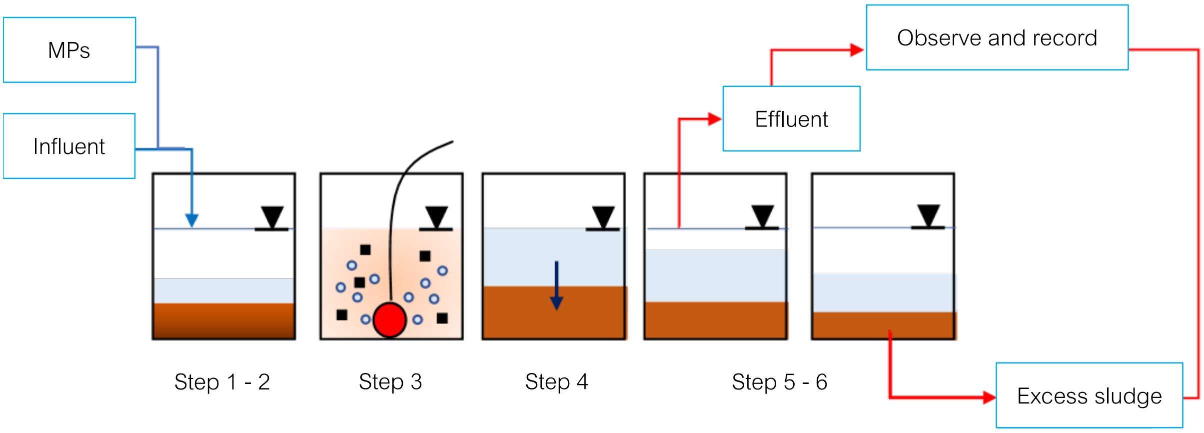


Fig. 1 Step of SBR system

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์จำลอง

จากการศึกษาไมโครพลาสติกเก่าประเภทโพลีโพพิลีน (old PP MPs) ขนาด 2×2 mm. ในระบบ SBR จำลองที่มีค่า SRT 10 days และ 15 days พบว่า ปริมาณ MLSS ของระบบ SBR จำลองที่มีค่า SRT 15 days มีค่าสูงกว่าระบบที่มีค่า SRT 10 days (Fig. 5A) เมื่อสังเกตปริมาณ MLSS (Fig. 1A) ในระบบควบคู่กับรูปถ่ายชิ้นไมโครพลาสติกเก่าประเภทโพลีโพพิลีนในน้ำทิ้งและสลัดจ์ จากกล้องจุลทรรศน์แบบ Stereo Microscope พบการเกาะตัวของไบโอฟิลม์บนพื้นผิวของ old PP MPs ในระบบ SBR จำลองที่มีค่า SRT 15 days(Figs. 4A–4C) มากกว่าในระบบ SBR จำลองที่มีค่า SRT 10 days (Fig. 4D) ปริมาณไมโครพลาสติกที่สะสมในสลัดจ์ (Fig. 1C) และในน้ำทิ้งของระบบ SBR จำลอง บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอสบีอาร์ได้ โดยผลการศึกษาของชิ้นไมโครพลาสติกใหม่ประเภทโพลีโพพิลีน (new PP MPs) พบว่า สัดส่วนของ new PP MPs ขนาด 2×2 mm. ในน้ำทิ้งของระบบ SBR จำลอง มีค่าสูงถึง 94.5% และสูงกว่า new PP MPs ขนาด 4×4 mm. ถึง 9.5% และผลการศึกษาของชิ้นไมโครพลาสติกเก่าประเภทโพลีโพพิลีน (old PP MPs) พบว่า สัดส่วนของ old PP MPs ขนาด 2×2 mm. ในน้ำทิ้งของระบบ SBR จำลอง อยู่ที่ 64% ของจำนวนชิ้นไมโครพลาสติกทั้งหมด 150 ชิ้น (คิดเป็น old PP MPs ในน้ำทิ้ง 96 ชิ้น และในสลัดจ์ 54 ชิ้น) จากสัดส่วนดังกล่าว พบแนวโน้มของการสะสมของไมโครพลาสติกเก่าในสลัดจ์ที่สูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับไมโครพลาสติกใหม่ แสดงถึงประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในระบบบำบัด

น้ำเสียแบบเอสบีอาร์ คิดเป็น 36% ซึ่งกลไกของการบำบัดไมโครพลาสติกเกี่ยวข้องกับการจมตัวของไมโครพลาสติกในสลัดจ์ นอกจากนี้งานวิจัยของ Xu et al. (2019) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกของโรงบำบัดน้ำเสีย 11 แห่งในจังหวัดหางโจวประเทศจีน พบว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติก มีค่าสูงมากกว่า 90% และสัดส่วนของไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในน้ำเสียและน้ำทิ้ง อยู่ที่ 27.6% และ 29.2% ของประเภทไมโครพลาสติกที่พบทั้งหมด 14 ประเภท ตามลำดับ ซึ่ง PP พบในสัดส่วนที่สูงทั้งในน้ำเสียและน้ำทิ้ง รวมทั้ง (Blair et al., 2019) ได้กล่าวว่าไมโครพลาสติกมีขนาดเล็กว่า 5 mm.ถูกจัดเป็นสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็ก ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียไม่ได้ถูกออกแบบมาให้กำจัดสิ่งเหล่านี้ จากการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียแห่งหนึ่งในสหรัฐอเมริกาพบว่า น้ำทิ้งจากระบบบำบัดขั้นที่สองพบไมโครพลาสติกรูปแบบต่างๆ อาทิ ฟิลม์ เส้นใย โดยพบเส้นใย 23% เป็นพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน และ (Castelluccio et al., 2022) ได้ทำการศึกษาการกักเก็บไมโครพลาสติกในระบบ SBR เป็นเวลา 93 วัน โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ SBR แบบใช้ไมโครไฟเบอร์ไม่สามารถป้องการการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกออกไปสู่น้ำทิ้งทั้งหมดได้ โดยพบว่า MPs ปนเปื้อนออกมาภาพรวมคิดเป็น 72%

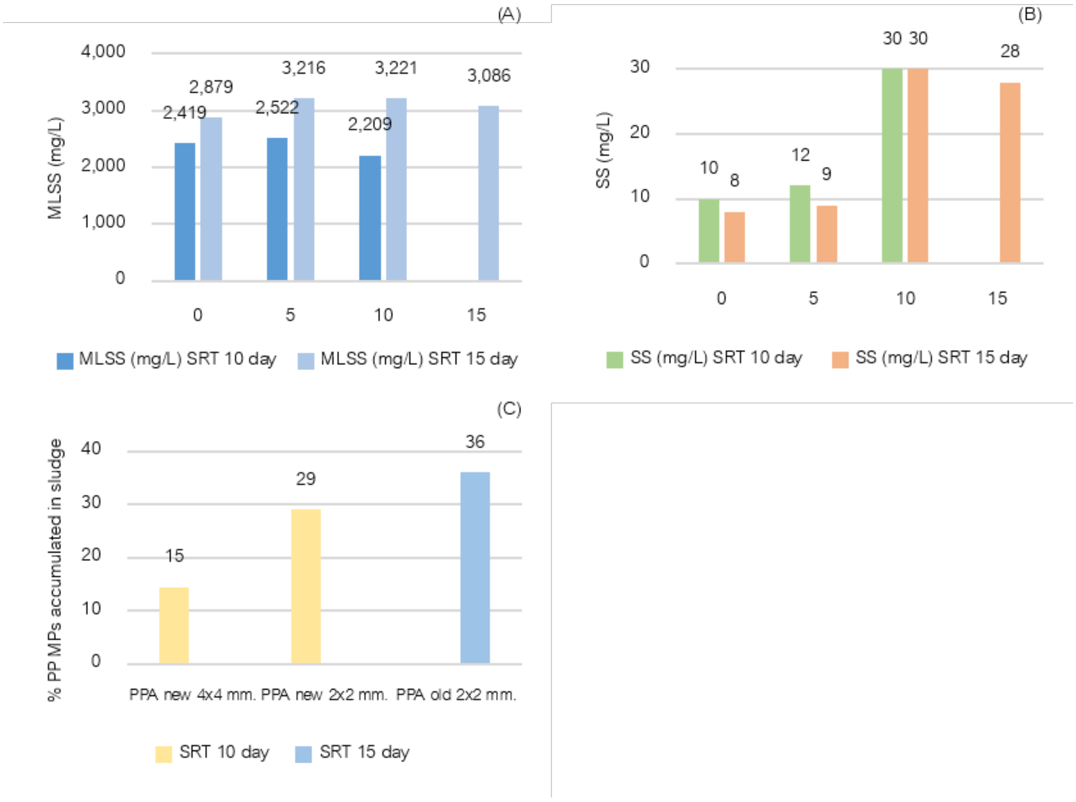


Fig. 1 (A) MLSS in SBR system (SRT10 days and 15 days) with feeding old PP MPs; (B) SS in SBR system (SRT 10 days and 15 days) with feeding old PP MPs; (C) percentage of new and old PP MPs accumulated in sludge of SBR system

ปัจจัยที่มีต่อการบำบัดไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์จำลอง

สัดส่วนของการสะสมของไมโครพลาสติกใหม่ประเภทโพลีโพพิลีน (new PP MPs) ขนาด 2×2 mm. และ 4×4 mm. ในสลัดจ์ของระบบ SBR จำลอง มีค่าอยู่ที่ 29% และ 14.5% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสัดส่วนของการสะสมของ new

PP MPs ในสลัดจ์ พบว่า แนวโน้มการสะสมของ new PP MPs ขนาด 2×2 mm. ในสลัดจ์ที่สูงกว่า new PP MPs ขนาด 4×4 mm. อย่างชัดเจน และผลการศึกษาของไมโครพลาสติกเก่าประเภทโพลีโพพิลีน (old PP MPs) พบว่า สัดส่วนของ old PP MPs ขนาด 2×2 mm. ในสลัดจ์ มีค่าอยู่ที่ 36% ซึ่งสูงกว่า new PP MPs ขนาด 2×2 mm. ในงานวิจัยนี้ ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไมโครพลาสติกในระบบเอสบีอาร์จำลอง มี 4 ปัจจัย คือ

1. ขนาดของชิ้นไมโครพลาสติก ผลการศึกษา บ่งชี้ว่า ชิ้นไมโครพลาสติกขนาดเล็ก มีแนวโน้มการสะสมของไม-โครพลาสติกในสลัดจ์ที่สูงกว่าชิ้นไมโครพลาสติกขนาดใหญ่

2. ลักษณะพื้นผิวของไมโครพลาสติก ผลการศึกษา บ่งชี้ว่า ชิ้นไมโครพลาสติกเก่าที่มีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปเนื่องด้วยปฏิกิริยา photo-oxidation (เช่น พื้นผิวมีความขุ่นโดยสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์แบบ Stereo Microscope (Fig. 2) และพื้นผิวมีรอยแตกและความขรุขระโดยสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (Allen, 1980; Tang et al., 2019)) มีผลต่อการยึดเกาะของไบโอฟิลม์บนพื้นผิวไมโครพลาสติก ซึ่งพื้นผิวที่ขรุขระง่ายต่อการยึดเกาะของไบโอฟิลม์ ส่งผลให้ไมโครพลาสติกเก่าประเภทโพลีโพพิลีน (old PP MPs) สะสมในสลัดจ์ในสัดส่วนที่สูงกว่าไมโครพลาสติกใหม่ประเภทโพลีโพพิลีน (new PP MPs)

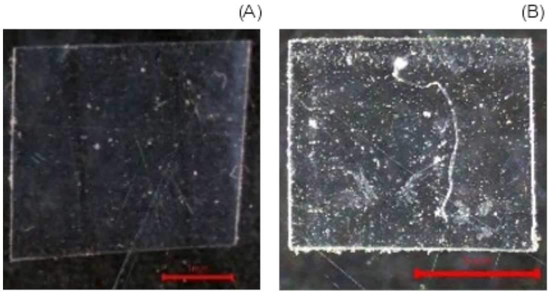


Fig. 2 Samples of PP MPs observed from Stereo microscope: (A) new PP MP without photo-oxidation; (B) old PP MPs with photo-oxidation

3. ความหนาแน่นของพลาสติก ส่งผลต่อการลอยและการจมของไมโครพลาสติกในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพซึ่งค่าความหนาแน่นของพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.91–0.94 g/cm^3 (IsabelJalón-Rojas, 2022) ในสภาวะปกติไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (PP MPs) ลอยบนผิวน้ำเพราะความหนาแน่นของ PP MPs ต่ำกว่าความหนาแน่นของน้ำจืดที่มีค่า 0.997 g/cm^3 (IsabelJalón-Rojas, 2022) ผลการทดสอบของการลอยและการจมของไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนใหม่ซึ่งไม่ผ่านกระบวนการ photo-oxidationและไมโครพลาสติกเก่าซึ่งผ่านกระบวนการ photo-oxidationในน้ำประปา พบว่า ไมโครพลาสติกใหม่และเก่าประเภทโพลีโพพิลีนทั้งหมดลอยบนผิวน้ำในสัดส่วน 100% กล่าวได้ว่า ค่าความหนาแน่นของไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีนแบบผ่านและไม่ผ่านกระบวนการ photo-oxidation มีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของน้ำประปา

ผลการทดลองของระบบ SBR จำลองที่มีค่า SRT 10-15 days และเติมไมโครพลาสติกสังเคราะห์ในน้ำเสีย 10 ชิ้น/cycle พบว่า รูปแบบของการลอยและการจมของไมโครพลาสติก มี 3 รูปแบบ ได้แก่ 1. ไมโครพลาสติกลอยเหนือผิวน้ำ (Fig. 3A) 2. ไมโครพลาสติกลอยจมตัวในน้ำและลอยเหนือสลัดจ์ (Fig. 3B) 3. ไมโครพลาสติกจมตัวในสลัจด์ (Fig. 3C) นอกเหนือจากนั้น ในระบบ SBR จำลอง ไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (PP MPs) ส่วนใหญ่ลอยเหนือผิวน้ำเนื่องจากความหนาแน่นของ PP MPs ต่ำกว่าน้ำ และไมโครพลาสติกบางส่วนจมตัวในน้ำและสลัจด์เนื่องจากไบโอฟิลม์ที่ยึดเกาะบนพื้นผิว

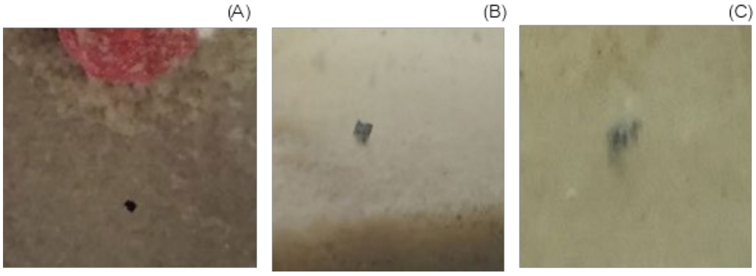


Fig. 3 (A) old PP MP sample: Float; (B) old PP MP sample: middle; (C) old PP MP sample: Sink

4. ไบโอฟิลม์บนพื้นผิวไมโครพลาสติก ผลของรูปถ่ายชิ้นตัวอย่าง old PP MPs ที่จมตัวในสลัดจ์ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบ Stereo microscope (Fig. 4) พบไบโอฟิลม์บนพื้นผิวของไมโครพลาสติก ซึ่งปริมาณไบโอฟิลม์บนพื้นผิวมีความสัมพันธ์กับค่าอายุตะกอน (Sludge retention time, SRT) ผลการทดลอง บ่งชี้ว่า ค่าอายุตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อไบโอฟิลม์บนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น ดัง Fig. 4

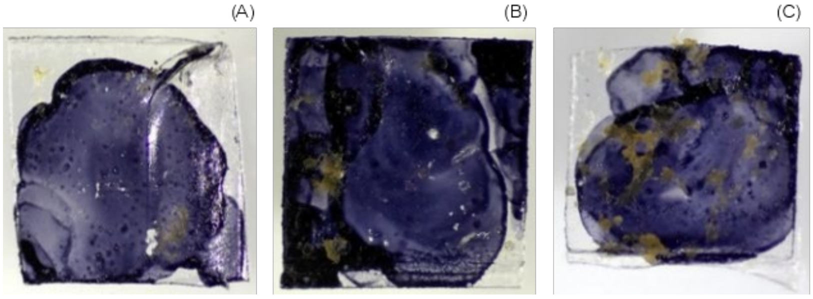


Fig. 4 Samples of old PP MPs accumulated in sludge of SBR system (SRT 15 days) using Stereo microscope: (A) Day 1; (B) Day 10; (C) Day 15

สรุป

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์จำลอง ประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกใหม่ประเภทโพลีโพพิลีน ขนาด 4×4 mm และ 2×2 mm มีค่า 15% และ 6.5% ตามลำดับ และประสิทธิภาพของการบำบัดไมโครพลาสติกเก่าประเภทโพลีโพพิลีน ขนาด 2x2 mm มีค่า 36% และปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไมโครพลาสติกในระบบเอสบีอาร์จำลอง มี 4 ปัจจัย คือ 1. ขนาดของไมโครพลาสติก ไมโครพลาสติกขนาดเล็กสะสมในสลัดจ์มากกว่าไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ 2. ลักษณะพื้นผิวของไมโครพลาสติก ไมโครพลาสติกเก่าที่มีพื้นผิวที่ขรุขระง่ายต่อการยึดเกาะของไบโอฟิลม์บนพื้นผิว ไมโครพลาสติกเก่าสะสมในสลัดจ์มากกว่าไมโครพลาสติกใหม่ 3. ความหนาแน่นของพลาสติก ส่งผลต่อการลอยและการจมของไมโครพลาสติก ในระบบเอสบีอาร์ไมโครพลาสติกประเภทโพลีโพพิลีน (PP MPs) ส่วนใหญ่ลอยเหนือผิวน้ำ เนื่องจากความหนาแน่นของ PP MPs ต่ำกว่าน้ำ และไมโครพลาสติกบางส่วนจมตัวในน้ำและสลัจด์เนื่องจากไบโอฟิลม์ที่ยึดเกาะบนพื้นผิว 4. ไบโอฟิลม์บนพื้นผิวไมโครพลาสติก ปริมาณไบโอฟิลม์บนพื้นผิวมีความสัมพันธ์กับค่าอายุตะกอน ค่าอายุตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อไบโอฟิลม์บนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสโครงการวิจัย ร-ม 14.63

เอกสารอ้างอิง

บุญชนิต ว่องประพิณกุล, สุจิตรา วาสนาดำรงดี. 2564ก. “ขยะพลาสติกจากการสั่งอาหารออนไลน์” สถานการณ์ปัญหาและแนวทางแก้ไข (ตอนที่ 1). วารสารสิ่งแวดล้อม 25: 1–10.

บุญชนิต ว่องประพิณกุลม สุจิตรา วาสนาดำรงดี. 2564ข. ขยะพลาสติกจากการสั่งอาหารออนไลน์ (ตอนที่ 2): ผลการสำรวจพฤติกรรมและความคิดเห็นของผู้บริโภค. วารสารสิ่งแวดล้อม 25: 1-11.

สุเทพ สิริวิทยปกรณ์. 2552. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor). 181–184.

Blair, R.M., Waldron, S., Gauchotte-Lindsay, C.J.W.R. 2019. Average daily flow of microplastics through a tertiary wastewater treatment plant over a ten-month period. Water Res. 163: 114909. doi.org/10.1016/j.watres.2019.114909

Castelluccio, S., Alvim, C.B., Bes-Piá, M.A., Mendoza-Roca, J.A., Fiore, S. 2022. Assessment of microplastics distribution in a biological wastewater treatment. Microplastics 1: 141–155. doi: 10.3390/microplastics1010009

Jalón-Rojas, I., Romero-Ramírez, A., Fauquembergue, K., Rossignol, L., Cachot, J., Sous, D., Morin, B. 2022. Effects of biofilms and particle physical properties on the rising and settling velocities of microplastic fibers and sheets. Environ. Sci. Technol. 56: 8114–8123. doi.org/10.1021/acs.est.2c01302

Punyauppa-path, S., Punyauppa-path, P. 2019. Microplastics: Origin,environmental impact,environmental contaminationand management methods. Naresuan University Journal: Science and Technolo 28: 72–80. doi: 10.14456/nujst.2020.17

Allen, N.S. 1980. Photo-degradation and photo-oxidation of polyolefins: Importance of oxygen-polymer charge transfer complexes. Polym. Degrad. Stabil. 2: 155–161. doi.org/10.1016/0141-3910(80)90037-3

Singh, M., Srivastava, R.K. 2011. Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: A review. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering 6: 3–13. doi:10.1002/apj.490

Tang, C.-C., Chen, H.-I., Brimblecombe, P., Lee, C.-L. 2019. Morphology and chemical properties of polypropylene pellets degraded in simulated terrestrial and marine environments. Marine Pollut. Bulletin 149: 110626. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110626

Xu, X., Jian, Y., Xue, Y., Hou, Q., Wang, L. 2019. Microplastics in the wastewater treatment plants (WWTPs): Occurrence and removal. Chemosphere 235: 1089–1096. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.197

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

สมบัติทางเคมีกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณสตาร์ชทนการย่อย และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งกล้วยดิบจากกล้วยต่างชนิดพันธุ์

Physicochemical properties, chemical compositions, resistant starch content and functional properties of unripe banana flours from different banana cultivars

ปราโมทย์ หอมแก่นจันทร์[a], **กัลยาณี สุวิทวัส**[c], **วรัญญา เตชะสุขถาวร**[d], **จิรารัตน์ อนันตกูล**[b,*]
Pramote Homkanjun[a], Kanlayanee Suvittawat[c], Varanya Techasukthavorn[d], Jirarat Anuntagool[b,*]
[a]หลักสูตรวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
[b]ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
[c]สถานีวิจัยปากช่อง ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครราชสีมา 30130
[d]ภาควิชาโภชนาการและการกำหนดอาหาร คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
[a]Program in Science for Industry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
[b]Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
[c]Pakchong Research Station, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Nakhon Ratchasima 30130, Thailand
[d]Department of Nutrition and Dietetics, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: jirarat.t@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสตาร์ชทนการย่อย และสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งกล้วยดิบจากกล้วย 4 พันธุ์ ได้แก่ กล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 กล้วยไข่ กล้วยหักมุกขาว และกล้วยหิน โดยด้านสมบัติทางเคมีกายภาพพบว่า แป้งกล้วยแต่ละชนิดมีค่าสี L^*, a^*, b^* และค่าดัชนีความขาวต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ด้านองค์ประกอบทางเคมีพบว่า แป้งกล้วยมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก (91.59 ถึง 94.27% db) และมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 25.58 ถึง 32.40% db ในส่วนปริมาณสตาร์ชทนการย่อยพบว่า แป้งกล้วยหินและแป้งกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 มีปริมาณสตาร์ชทนการย่อยสูงสุด ($p < 0.05$)(66.47% และ 65.45% db) นอกจากนี้ยังพบว่า แป้งกล้วยไข่มีค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงสูงสุด ($p < 0.05$) และแป้งกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 มีค่าความหนืดคืนตัวสูงสุด ($p < 0.05$)
คำสำคัญ: กล้วยดิบ, สตาร์ชกล้วย, สตาร์ชทนการย่อย, สมบัติการเกิดเพสต์, องค์ประกอบทางเคมี

Abstract

This research studies the physicochemical properties, chemical compositions, resistant starch content, and functional properties of unripe banana flours from four banana varieties, including Kluai Namwa Pakchong 50, Kluai Khai, Kluai Hak Muk Khao, and Kluai Hin. In terms of physicochemical properties, it was found that each type of banana flour had significantly different color parameters (L^*, a^*, b^*) and whiteness index ($p < 0.05$). In terms of chemical composition, banana flour contained carbohydrates as the main constituent (91.59% to 94.27% db) and the amylose content was in the range of 25.58 to 32.40% db. Kluai Hin and Kluai Pakchong 50 had the highest resistant starch content ($p < 0.05$) (66.47% and 65.45% db). In addition, Kluai Khai had the highest peak viscosity and breakdown viscosity ($p < 0.05$), while Kluai Pakchong 50 had the highest setback viscosity ($p < 0.05$).
Keywords: banana starch, green banana, pasting properties, proximate compositions, resistant starch

คำนำ

กล้วย (*Musa* spp.) เป็นพืชที่มีแหล่งกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Simmonds, 1996) โดยประเทศไทยจัดอยู่ในเขตพื้นที่ที่เหมาะแก่การเพาะปลูกกล้วยและให้ผลผลิตมากในแถบเอเชีย กล้วยสามารถปลูกได้ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ประกอบกับกล้วยเป็นพืชล้มลุกที่ให้ผลผลิตได้ตลอดปี จึงทำให้ง่ายต่อการส่งเสริมการปลูกหากต้องการเพิ่มผลผลิต นอกจากนี้กล้วยยังเป็นพืชที่สามารถนำส่วนต่างๆ นอกจากผลไปใช้ประโยชน์ได้ด้วย ในช่วงที่ผลผลิตของกล้วยสุกมีมากบางครั้งเกิดปัญหาคือใช้บริโภคหรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ไม่ทัน หรือบางครั้งผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากกล้วยสุกก็มีมากเกินความต้องการของตลาดจึงส่งผลให้ราคากล้วยถูกลง การนำกล้วยมาแปรรูปในรูปแบบอื่นๆ จึงเป็นอีกทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดปัญหากรณีผลผลิตกล้วยมีปริมาณล้นตลาด

แป้งกล้วยเป็นผลิตภัณฑ์จากการนำกล้วยดิบมาแปรรูปเป็นแป้ง สามารถนำไปเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผลิตภัณฑ์ขนมไทย แป้งกล้วยมีกลิ่นเฉพาะตัว มีคุณสมบัติทางกายภาพที่รวมกับน้ำได้ดี เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวใส เมื่อปล่อยให้เย็นจะเกิดลักษณะคล้ายวุ้น เนื่องจากแป้งที่มีแอมิโลสสูง จึงทำให้มีคุณสมบัติพิเศษ เหมาะที่จะนำมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมอบได้ดี จากงานวิจัยของ นฤเทพ และจารุวรรณ (2564) พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของกล้วย 4 ชนิด (กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และกล้วยหักมุก) ต่อการนำมาผลิตเป็นแป้งคือที่อายุการเก็บเกี่ยวร้อยละ 70 เนื่องจากแป้งมีการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพทางกายภาพและเคมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแป้งจากกล้วยอายุการเก็บเกี่ยวร้อยละ 80 และมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแป้งจากกล้วยอายุการเก็บเกี่ยวร้อยละ 60 นอกจากนี้ยังพบว่า กล้วยดิบเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสตาร์ชทนการย่อย มีการนำแป้งกล้วยดิบ 3 ชนิด ได้แก่ กล้วยหอมทอง กล้วยน้ำว้า และกล้วยไข่ มาวิเคราะห์ปริมาณแป้งต้านทานการย่อยซึ่งพบว่า แป้งกล้วยดิบทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณแป้งที่ต้านทานการย่อยอยู่มากกว่าร้อยละ 50 (จิดาภา, 2563) โดยแป้งทนการย่อยหรือสตาร์ชทนการย่อย คือแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ จึงมีความสามารถผ่านเข้าไปถึงลำไส้ใหญ่และถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acids) ที่ช่วยสร้างความแข็งแรงให้แก่เซลล์ผนังลำไส้ใหญ่ ผลจากการทนการย่อยด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก และจากการย่อยที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ จึงทำให้ร่างกายได้รับปริมาณพลังงานในระดับต่ำกว่าปกติหรือทำหน้าที่คล้ายกับใยอาหาร (Bojarczuk et al, 2022) อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการปลูกกล้วยหลายชนิดในเชิงการค้าและมีกล้วยพันธุ์ท้องถิ่นหลายชนิดในประเทศไทย แต่งานวิจัยที่ดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ และปริมาณสตาร์ชต้านทานการย่อยของแป้งกล้วยดิบจากกล้วยที่ปลูกเชิงการค้าและกล้วยพันธุ์ท้องถิ่นยังมีน้อย การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ตลอดจนปริมาณสตาร์ชต้านทานการย่อยจะเป็นประโยชน์ในการนำแป้งกล้วยดิบไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสมได้ ทั้งต่อการนำไปแปรรูปหรือเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณสตาร์ชทนการย่อยและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งจากกล้วย 4 พันธุ์ ได้แก่ กล้วยน้ำว้าปากช่อง 50, กล้วยไข่, กล้วยหักมุกขาว, และกล้วยหิน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและการเตรียมแป้งกล้วย

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างแป้งกล้วย ได้แก่ กล้วย 4 พันธุ์ (กล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 (P50) กล้วยไข่ (KHA) กล้วยหักมุกขาว (HMK) และกล้วยหิน (HIN)) โดยวัตถุดิบมาจากสถานีวิจัยปากช่อง ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดนครราชสีมา และตลาดมอกล้วยไข่ จังหวัดกำแพงเพชร เก็บเกี่ยวที่ระยะสุกร้อยละ 70

ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึงมีนาคม 2565 โดยคัดเลือกจากวิธีพิจารณาเหลี่ยมผลกล้วย (เบญจมาศ, 2538) นำมาแปรรูปเป็นแป้งจากเนื้อผลกล้วย โดยนำกล้วยดิบล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก สไลด์ความหนา 3.0–5.0 มิลลิเมตร และอบแห้งโดยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดแห้ง (dry grinding) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช บรรจุแป้งที่ผ่านการร่อนแล้วในถุงปิดสนิท และจัดเก็บที่อุณหภูมิห้องเพื่อเตรียมนำวิเคราะห์ค่าคุณภาพทั้ง 4 ตัวอย่างๆ ละ 3 ซ้ำในขั้นตอนถัดไป

ค่าสีตามระบบ CIE L^*, a^*, b^* และค่าดัชนีความขาว (Whiteness index)

ค่าสีแป้งกล้วยตามระบบ CIE, L^*, a^*, b^* ทำการวัดโดย Chroma meter (CR-400, KONIKA MINOLTA SENSING, Japan) และคำนวณค่าดัชนีความขาว (Whiteness index) ตาม Equation 1

$$\text{Whiteness index} = 100 - \sqrt{(100-L^*)^2+(a^*)^2+(b^*)^2} \tag{1}$$

ลักษณะ Birefringence

การถ่ายภาพลักษณะ Birefringence ทำการศึกษาโดยใช้กล้องดิจิตอลเชื่อมต่อกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus BX51, USA) ภายใต้การบิดระนาบแสงโดยเลนส์โพลารอยด์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เถ้า เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรต

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย ใช้วิธีตาม AOAC (2019) 935.29 และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยนำผลรวมร้อยละขององค์ประกอบต่างๆ หักออกจาก 100

ปริมาณสตาร์ชทนการย่อย (Resistant starch content)

วิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชทนการย่อยตามวิธี AOAC 2002.02 โดยชั่งตัวอย่าง 100 mg เติมด้วย pancreatic α-amylase (10 mg/mL) และ amyloglucosidase (3 U/mL) ใน 0.1 M sodium maleate buffer (pH 6.0) 4 mL จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C ใน shaker water bath เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังครบเวลานำตัวอย่างเติมด้วย 95% ethanol 4 mL จากนั้นแยกตะกอนโดยการปั่นเหวี่ยงที่แรงหนีศูนย์กลาง 1500xg ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 10 นาที รินสารละลายส่วนใสเก็บ จากนั้นล้างตะกอนที่เหลือด้วย 50% ethanol 8 mL และนำไปปั่นเหวี่ยง รินแยกสารละลายส่วนใสเก็บตามขั้นตอนข้างต้น ทำการล้างตะกอนด้วย 50% ethanol ซ้ำ 2 รอบ

นำตะกอนที่เหลือเติมด้วย 2 M KOH 2 mL กวนผสมด้วย magnetic stirrer ในอ่างน้ำเย็นเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเติมด้วย 1.2 M sodium acetate buffer (pH 3.8) 8 mL และ amyloglucosidase (3300 U/mL) 0.1 mL ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นรินสารละลายใส่ขวดปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ปิเปตต์สารละลายเจือจาง 0.1 mL ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติม GOPOD reagent (Megazyme, Ireland) 3 mL ผสมให้เข้ากัน และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 517 nm และคำนวณปริมาณสตาร์ชทนการย่อย ตาม Equation 2

$$\text{Resistant starch content (\%, db)} = \text{Absorbance} \times \left(\frac{100}{\text{Absorbance of 100 } \mu\text{g D-Glucose} \times \text{Dry weight (mg)}}\right) \times 90 \tag{2}$$

ปริมาณแอมิโลสปรากฏ (Apparent amylose content) ดัดแปลงจากวิธีของ Juliano (1971)

ชั่งตัวอย่าง 100 mg เติมด้วย 95% ethanol 1 mL และ 1 N NaOH 9 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 mL จากนั้นต้มตัวอย่างในน้ำเดือด เป็นเวลา 10 นาที หลังครบเวลาทิ้งตัวอย่างให้เย็นจนมีอุณหภูมิห้อง จากนั้นถ่ายตัวอย่างลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรโดยน้ำกลั่น

ทำการปิเปตต์สารละลายเจือจาง 5 mL ถ่ายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL เติม 1 N acetic acid 1 mL และ iodine solution (สารละลายผสม iodine 0.2 g และ potassium iodide 2.0 g ปรับปริมาตร 100 mL โดยน้ำกลั่น) ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 620 nm เพื่อเปรียบเทียบกราฟมาตรฐานจาก potatoes amylose และคำนวณปริมาณแอมิโลสปรากฏ ตาม Equation 3

$$\text{Apparent amylose content (\%, db)} = \frac{\text{Amylose content (mg/100 mL) from standard curve} \times 10}{\text{Dry weight (g)} \times 5} \quad (3)$$

สมบัติการเกิดเพสต์

สมบัติการเกิดเพสต์ ทำการวัดโดย Rapid Visco Analyzer (Series 4D, Newport Scientific, Australia) โดยใช้ความเข้มข้นน้ำแป้ง 12% โดยประมาณ ใช้สภาวะการทำงานของ RVA ตาม AACC International Method 76–21 (Test Configuration : Standard profile 1) แสดงค่า Viscosity parameters ในหน่วย Centipoise (cP) โดย Thermocline software, version 3.11

การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ออกแบบและวางแผนการทดลองโดย Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software (Version 19.0, SPSS Inc., USA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย โดย Duncan's New Multiple Range Test ระบุความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ค่าสีแป้งกล้วย 4 พันธุ์แสดงตาม Table 1 โดยพบว่า ค่าสี L^*, a^*, b^* และค่าดัชนีความขาวของแป้งกล้วยทั้ง 4 พันธุ์มีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยผลทดลองสามารถบ่งบอกถึงปัจจัยด้านความต่างของชนิดพันธุ์กล้วยที่ใช้เป็นวัตถุดิบต่อความแตกต่างในลักษณะคุณภาพด้านสีของแป้งกล้วย นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ เช่น องค์ประกอบทางเคมีตลอดจนกระบวนการผลิต อาจสามารถส่งผลต่อคุณภาพด้านสีของแป้งกล้วยได้เช่นกัน และเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีความขาว พบว่า แป้งจากกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 มีค่าดัชนีความขาวสูงที่สุด ($p < 0.05$) ที่ 83.22 ค่าดัชนีความขาวเป็นค่าบ่งบอกคุณลักษณะด้านความขาว สะอาดของแป้ง โดยสามารถใช้เป็นปัจจัยเพื่อกำหนดการยอมรับของผู้บริโภคสำหรับแป้งได้ (Anyasi et al., 2017) ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีความขาวของแป้งสามารถเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอย่างปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) และกรดอะมิโนภายในโปรตีน ซึ่งเป็นผลจากความต่างด้านองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบได้เช่นกัน

Table 1 Color values (L^*, a^*, b^*) and whiteness index of banana flour from different banana cultivars

Samples	Color values			
	L^*	a^*	b^*	Whiteness index
P50	85.51^{d}±0.30	0.69^{a}±0.10	8.44^{d}±0.10	83.22^{a}±0.29
KHA	85.51^{c}±0.07	-0.64^{b}±0.01	13.25^{b}±0.21	77.42^{d}±0.13
HMK	87.58^{b}±0.13	-1.39^{d}±0.06	16.04^{a}±0.22	79.67^{c}±0.25
HIN	88.01^{a}±0.07	-0.78^{c}±0.02	12.41^{c}±0.10	82.72^{b}±0.10

*Means±SD (*n* = 3) in the same column followed by different superscripts are significantly different (p < 0.05)

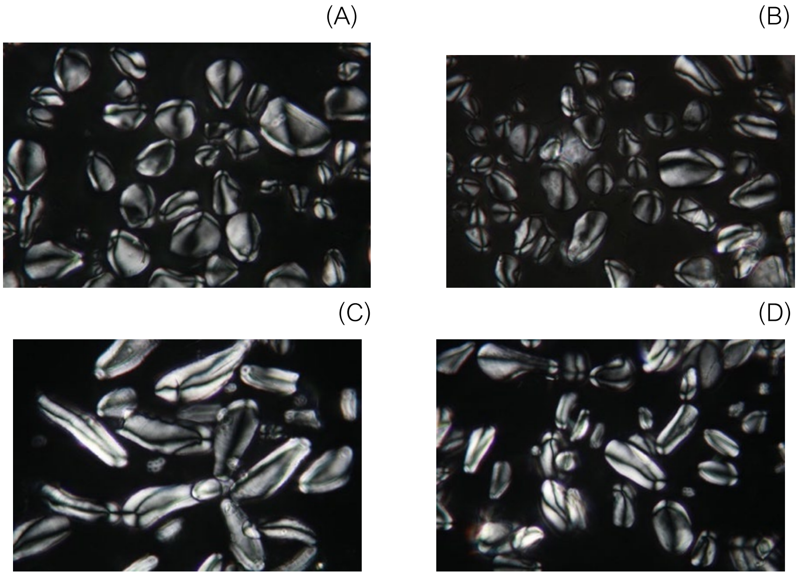


Fig. 1 Birefringence pattern of banana flours from different banana cultivars, represented images at 1000x magnification: (A) Kluai Namwa Pakchong 50; (B) Kluai Khai; (C) Kluai Hak Muk Khao; (D) Kluai Hin

ลักษณะ Birefringence ของเม็ดสตาร์ช (starch granule) แป้งกล้วยทั้ง 4 พันธุ์ แสดงตาม Fig. 1 เมื่อพิจารณารูปร่างเม็ดสตาร์ชจะสังเกตพบว่ามีรูปร่างเป็นวงรี (oval shape) แท่งยาว (elongated) และมีรูปร่างไม่แน่นอน (irregular shape) โดยกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 กล้วยไข่ และกล้วยหิน สังเกตพบเม็ดสตาร์ชรูปร่างวงรีเป็นส่วนใหญ่ และกล้วยหักมุกขาวสังเกตพบเม็ดสตาร์ชรูปร่างเป็นแท่งยาวและมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยอีก 3 พันธุ์ในงานวิจัย โดยความแตกต่างของรูปร่างเม็ดสตาร์ชและขนาดจะสามารถส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่อื่นๆ ของแป้ง เช่น ความสามารถในการจับน้ำ กำลังการพองตัว และความหนืด เป็นต้น และจากลักษณะ birefringence จะพบว่าแป้งจากกล้วยทั้ง 4 พันธุ์มีเม็ดสตาร์ชที่เกิด birefringence การที่เม็ดสตาร์ชเกิด birefringence เมื่อบิดระนาบแสงโพลาไรซ์แสดงถึงการมีสภาพเป็น semi-crystalline โดยส่วนที่เป็น birefringence เกิดจาก crystalline region ในเม็ดสตาร์ช (Gallant, Bouchaet และ Baldwin, 1997) และจากการวิเคราะห์ลักษณะ birefringence พบว่าสามารถสังเกตเห็นลักษณะ birefringence อย่างชัดเจนและมีตำแหน่งไฮลัมที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช แสดงถึงการสร้างสายพอลิเมอร์ของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่เริ่มจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ชและขยายออกตามแนวรัศมีของสตาร์ช และการเห็นลักษณะ birefringence ที่ชัดเจนนี้เป็นการชี้ให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชไม่เกิดความเสียหายในกระบวนการเตรียมแป้ง โดยสตาร์ชที่เกิดการเจลาติไนซ์หรือสุกแล้ว จะไม่พบการเกิดลักษณะ birefringence ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติการเป็นสตาร์ชทนการย่อยของแป้ง

Table 2 Proximate compositions of banana flour from different banana cultivars

Samples	Moisture content (%, wb)	Crude protein (%, db)	Crude fat (%, db)	Ash (%, db)	Crude fiber (%, db)	Carbohydrates (%, db)
P50	10.39^{b}±0.05	2.23^{d}±0.02	0.19^{c}±0.02	2.00^{b}±0.04	1.31^{b}±0.05	94.27^{a}±0.07
KHA	8.91^{c}±0.03	4.66^{a}±0.09	0.35^{a}±0.03	2.39^{a}±0.33	1.00^{b}±0.19	91.59^{d}±0.62
HMK	6.83^{d}±0.09	2.99^{b}±0.13	0.27^{b}±0.04	2.44^{a}±0.03	1.87^{a}±0.18	92.42^{c}±0.10
HIN	10.74^{a}±0.03	2.66^{c}±0.04	0.38^{a}±0.04	2.26^{ab}±0.03	1.36^{b}±0.08	93.34^{b}±0.07

*Means±SD (n = 3) in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

ค่าองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เถ้า เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรต แสดงตาม Table 2 โดยพบว่า แป้งกล้วย 4 ชนิด มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณอยู่ในช่วง 91.54–94.27% db ในส่วนของโปรตีนพบว่ามีปริมาณอยู่ในช่วง 2.23–4.66% db ส่วนปริมาณไขมันพบว่า แป้งกล้วยทั้ง 4 ชนิดมีปริมาณไขมันต่ำกว่า 1% (0.19–0.38% db) ความต่างขององค์ประกอบทางเคมีในแป้งกล้วยเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความต่างในคุณสมบัติในด้านอื่นๆ ได้ เช่น ลักษณะทางกายภาพของแป้ง และพฤติกรรมการเกิดเพสต์ เป็นต้น โดยในผลการทดลองพบว่า ชนิดพันธุ์กล้วยมีผลต่อความต่างในค่าองค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วย และนอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ เช่น ฤดูกาลเก็บเกี่ยว พื้นที่การเพาะปลูก สามารถเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความต่างขององค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยได้เช่นกัน

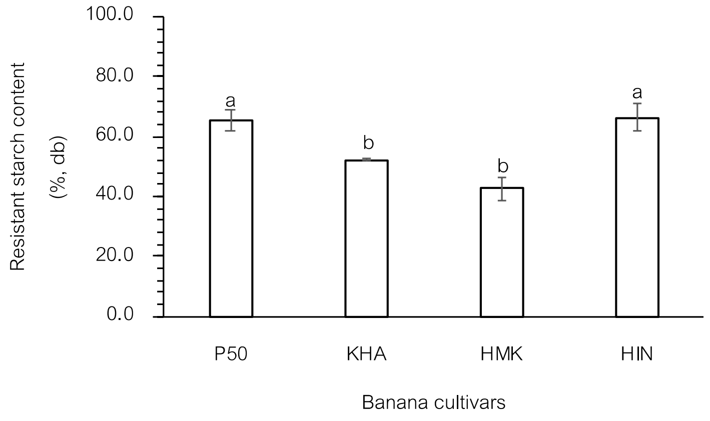


Fig. 2 Resistant starch content (%, dry basis) of banana flours from different banana cultivars

ปริมาณสตาร์ชทนการย่อยแสดงตาม Fig. 2 จากการทดสอบหาปริมาณสตาร์ชทนการย่อย พบว่าแป้งจากกล้วยหินและกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 มีปริมาณสตาร์ชทนการย่อยสูงที่สุด ($p < 0.05$) (ร้อยละ 66.47 และ 65.45 โดยน้ำหนักแห้ง) โดยสตาร์ชทนการย่อยหมายถึงแป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่าเส้นใยอาหาร สามารถผ่านเข้าไปถึงลำไส้ใหญ่และถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันสายสั้น (shot chain fatty acids) ที่เอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อลำไส้และช่วยสร้างความแข็งแรงให้แก่เซลล์ผนังลำไส้ใหญ่ ผลจากการทนการย่อยด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กและจากการย่อยที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ จะทำให้ร่างกายได้รับปริมาณพลังงานในระดับต่ำกว่าปกติหรือทำหน้าที่คล้ายกับใยอาหาร (Bojarczuk et al, 2022) ทั้งนี้การที่โครงสร้างเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย อาจส่งผลต่อการ

สูญเสียคุณสมบัติการเป็นสตาร์ชทนการย่อยของแป้งกล้วยดิบ ดังนั้นในการนำประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปต่อ อาจต้องพิจารณาปัจจัยที่จะส่งผลต่อการถูกทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช เช่น อุณหภูมิ และระยะเวลา เป็นต้น โดยการควบคุมปัจจัยในกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม จะสามารถช่วยคงหรือลดการสูญเสียคุณสมบัติการเป็นสตาร์ชทนการย่อยของแป้งกล้วยได้

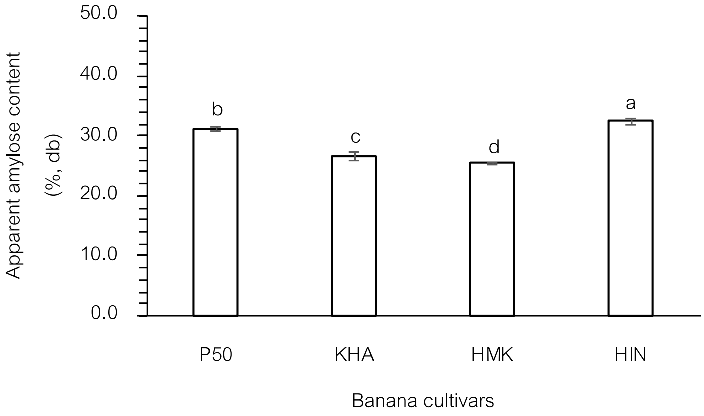


Fig. 3 Apparent amylose content (%, dry basis) of banana flours from different banana cultivars

ปริมาณแอมิโลสปรากฏแสดงตาม Fig. 3 จากการวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสพบว่า แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิดมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 25.58–32.40% db โดยใกล้เคียงตามงานวิจัยของ Vatanasuchart และคณะ (2009) ที่รายงานว่าแป้งกล้วยดิบสายพันธุ์ทั่วไป (common cultivars) มีปริมาณแอมิโลส อยู่ระหว่าง 25.8–37.1% ทั้งนี้ปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ได้อาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต่างของชนิดพันธุ์กล้วย ฤดูกาลเก็บเกี่ยว และพื้นที่การเพาะปลูก

โดยทั่วไปเม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน และเนื่องจากโครงสร้างของแอมิโลสเป็นโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรงของกลูโคสที่จัดเรียงตัวอย่างแน่นหนาและเป็นส่วนที่ทนทานต่อการย่อยสลาย แป้งที่มีปริมาณแอมิโลสที่สูงจึงดูดน้ำและพองตัวได้ต่ำ ส่งผลให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาการย่อยสลายได้ยาก (จิรนาถ และคณะ, 2558)

ตามงานวิจัยของจิรนาถ และคณะ (2558) รายงานว่าปริมาณแอมิโลสและปริมาณแป้งทนการย่อยในแป้งกล้วยดิบมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก และแสดงความสัมพันธ์ในเชิงแปรผันตรง โดยเมื่อพิจารณาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปริมาณแอมิโลสและปริมาณสตาร์ชทนการย่อยของแป้งกล้วยทั้ง 4 ตัวอย่างในการทดลอง พบว่าแป้งกล้วยที่มีปริมาณแอมิ- โลสสูงมีแนวโน้มที่มีปริมาณสตาร์ชทนการย่อยสูงเช่นกัน หรือกล่าวคือมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก และแสดงความสัมพันธ์ในเชิงแปรผันตรงสอดคล้องกันตามงานวิจัยข้างต้น

Table 3 Pasting properties of banana flour from different banana cultivars

Samples	Pasting Temperature (°C)	Peak Viscosity (cP)	Trough (cP)	Breakdown (cP)	Final Viscosity (cP)	Setback (cP)
P50	79.72^{b}±0.08	6530^{b}±191	4725^{a}±168	1811^{d}±43	6925^{a}±39	2206^{a}±127
KHA	81.55^{a}±0.36	7388^{a}±193	4372^{b}±193	3030^{a}±24	5731^{b}±264	1372^{c}±94
HMK	79.47^{b}±0.20	4752^{c}±100	2523^{d}±85	2238^{c}±143	3584^{c}±36	1070^{d}±74
HIN	82.02^{a}±0.89	6580^{b}±315	4024^{c}±204	2571^{b}±104	5637^{b}±156	1628^{b}±104

*Means±SD (n = 3) in the same column followed by different superscripts are significantly different (p < 0.05)

Table 3 แสดงสมบัติการเกิดเพสต์ของแป้งกล้วย 4 ชนิดพันธุ์ โดยพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชั่น (pasting temperature) ของแป้งกล้วยทั้ง 4 ตัวอย่างอยู่ระหว่าง 79.47–82.02 °C โดยค่า pasting temperature เป็นอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนแล้วเกิดการเจลาติไนซ์ ความร้อนจะทำลายพันธะไฮโดรเจน ทำให้ร่างแหไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลง เม็ดสตาร์ชจึงดูดน้ำและพองตัวขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) และจากค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าความหนืดลดลง (breakdown) พบว่าแป้งกล้วยไข่มีค่าสูงสุด ($p < 0.05$)(7388 cP และ 3030 cP) ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญของแป้ง ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง และการดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลให้ความหนืดสูงสุดของแป้งกล้วยไข่มีค่าสูงที่สุดอาจเนื่องมาจากสตาร์ชในแป้งกล้วยไข่สามารถพองตัวได้ดีกว่าสตาร์ชในแป้งกล้วยอีก 3 ชนิดที่ใช้เปรียบเทียบ และอาจมีผลมาจากปัจจัยด้านองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ปริมาณโปรตีน ไขมัน เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลต่อความหนืดของแป้งได้ด้วยเช่นกัน ส่วนค่าความหนืดลดลง (breakdown) สามารถบ่งบอกความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงและแรงเฉือนของแป้งได้ และจากค่าความหนืดคืนตัว (setback) ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดรีโทรเกรเดชั่น พบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 มีค่าความหนืดคืนตัวสูงที่สุด ($p < 0.05$) โดยพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของแป้งกล้วยที่มีลักษณะแตกต่างกันแปรตามชนิดพันธุ์ที่นำมาแปรรูป สามารถนำมาใช้เพื่อพิจารณาการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมตามคุณสมบัติเด่นของแป้งกล้วยแต่ละชนิด

สรุป

จากผลศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณสตาร์ชทนการย่อย และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งกล้วยดิบจากกล้วย 4 พันธุ์ ได้แก่ กล้วยน้ำว้าปากช่อง 50, กล้วยไข่, กล้วยหักมุกขาว, และกล้วยหิน พบว่า ด้านสมบัติทางเคมีกายภาพ แป้งกล้วยแต่ละชนิดมีค่าสี L^*, a^*, b^* และค่าดัชนีความขาวต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ด้านองค์ประกอบทางเคมีพบว่า แป้งกล้วยมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก (91.59–94.27% db) มีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 2.23–4.66% db มีปริมาณไขมันต่ำกว่า 1% (0.19–0.38% db) และมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 25.58–32.40% db ในส่วนปริมาณสตาร์ชทนการย่อยพบว่า แป้งกล้วยหินและแป้งกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 มีปริมาณสตาร์ชทนการย่อยสูงสุด ($p < 0.05$)(66.47% และ 65.45% db) และด้านสมบัติการเกิดเพสต์พบว่า แป้งกล้วยไข่มีค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงสูงสุด ($p < 0.05$) ในขณะที่แป้งกล้วยน้ำว้าปากช่อง 50 มีค่าความหนืดคืนตัวสูงสุด ($p < 0.05$)

โดยคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณสตาร์ชทนการย่อย และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งกล้วยที่แตกต่างกันแปรตามชนิดพันธุ์ที่นำมาแปรรูป สามารถนำมาใช้เพื่อพิจารณารูปแบบการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมตามคุณสมบัติของแป้งกล้วยแต่ละชนิดในการต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากโครงการปฏิรูประบบ อววน. การส่งเสริมและพัฒนาบุคลากรผ่านการเรียนรู้แบบปฏิบัติจริง (Experiential Learning) เรื่อง การสนับสนุนการพัฒนาความเป็นเลิศของสถาบันอุดมศึกษาและผลิตกำลังคนคุณภาพสูงผ่านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษาเพื่ออุตสาหกรรม (Hi-FI) จากสำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สป.อว.) ปีงบประมาณ 2565 ร่วมกับบริษัท ธนะวัฒน์ ควอลิตี้ สตาร์ช จำกัด

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีแป้ง, พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

จิดาภา วงศ์รุ่งเรือง, 2563. การศึกษาความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์ของผลิตภัณฑ์ทดแทนครีมเทียมแบบผงจากผงแป้งกล้วยหอม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จิรนาถ บุญคง, ทิพวรรณ บุญมี, พัชราวรรณ เรือนแก้ว. 2557. การใช้แป้งกล้วยหอมทองดิบที่มีสมบัติต้านทานการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์พาสต้า. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม 10: 19–29.

นฤเทพ เวชภิบาล, จารุวรรณ บางแวก. 2564. ผลของอายุการเก็บเกี่ยวต่อปริมาณและคุณภาพแป้งจากกล้วยชนิดต่างๆ. เอกสารเผยแพร่กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร.

เบญจมาศ ศิลาย้อย. 2538. กล้วย, พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ผาณิต รุจิรพิสิฐ. 2551. องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งฟลาวร์จากแห้วจีน. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย 28: 168–178.

AACC. 2000. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists (10th ed.). St. Paul, MN: The Association.

Anyasi, T. A., Jideani, A. I., Mchau, G. R. 2017. Effects of organic acid pretreatment on microstructure, functional and thermal properties of unripe banana flour. J. Food Meas. Charact. J FOOD MEAS CHARACT, 11(1): 99–110.

AOAC. 2000. Official methods of analysis of AOAC international (17th ed.).

Bojarczuk, A., Ska̧pska, S., Khaneghah, A.M. Marszaøek, K. 2022. Health benefits of resistant starch: a review of the literature. J. Funct. Foods. 93: 105094.

Gallant, D. J., Bouchaet, B., Baldwin, P. M. 1997. Microscopy of starch: Evidence of a new level of granule organization. Carbohydr. Polym. 32: 177–191.

Juliano, B. O. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. J. Cereal Sci. 16: 334–360.

Simmonds, N. W.; Shepherd, K. The taxonomy and origins of the cultivated bananas. Linnean Soc. Bot. 1955, 55: 302–312.

Vatanasuchart, N., Miyomwit, B. Wongkrojang, K. 2009. Resistant starch contents and the in vitro starch digestibility of Thai foods. Starchy Foods. 178–186.

ผลของกระบวนการต่อคุณภาพบางประการของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน

Effect of processing on selected qualities of sunflower seed milk

วรพรต สวนคร้ามดี, **เทพกัญญา หาญศีลวัต***

Worapot Suankramdee, Thepkunya Harnsilawat*

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thepkunya.h@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการผลิตที่มีต่อคุณภาพบางประการของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน โดยศึกษาผลของอัตราของส่วนเมล็ดทานตะวันต่อน้ำในการแช่ (1:2, 1:3, 1:4), อุณหภูมิ (40–80 องศาเซลเซียส), เวลาในการให้ความร้อน (10–30 นาที) และการอบเมล็ดทานตะวันที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5, 10, 15 นาที ต่อคุณภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้, ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ค่าความหนืด และปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณของน้ำในส่วนผสมส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้เพิ่มขึ้น แต่ค่าอื่นๆ ลดลง การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบเมล็ดทานตะวันส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ และค่าความหนืดของน้ำนมเมล็ดทานตะวันสูงขึ้น จากการศึกษานี้ทำให้ทราบแนวทางการผลิตน้ำนมจากเมล็ดทานตะวันที่เหมาะสม

คำสำคัญ: กระบวนการ, คุณภาพ, น้ำนมเมล็ดทานตะวัน

Abstract

The objective of this research was to study the effect of processing on selected qualities of sunflower seed milk. This study investigated the effect of seed: water ratio for soaking (1:2, 1:3, 1:4), heating temperature (40 to 80 °C), heating time from 10 to 30 minutes, and sunflower seed roasting temperature at 100, 150, 200 °C with 5, 10, 15 minutes on qualities of sunflower seed milk. The results showed that increasing heating time and temperature increased %yield, total soluble solid, viscosity and total solid content. Increasing the water amount increased %yield but others decreased. Increasing sunflower seed roasting temperature and time increased %yield and viscosity of sunflower seed milk. This study can be used as a guideline for suitable sunflower seed milk production.

Keywords: processing, qualities, sunflower seed milk

คำนำ

เมล็ดทานตะวันเป็นแหล่งของโปรตีน สามารถใช้เป็นโปรตีนทางเลือกจากพืช มีธาตุเหล็กสูง เมล็ดทานตะวัน จำนวน 100 กรัมน้ำหนักแห้ง มีพลังงาน 490 กิโลแคลอรี่, มีคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 38.6, มีไขมันร้อยละ 32.8, มีโปรตีนร้อยละ 16.7, มีใยอาหารร้อยละ 3.7, มีแคลเซียม 92 มิลลิกรัม, มีฟอสฟอรัส 632 มิลลิกรัม และมีธาตุเหล็ก 5.8 มิลลิกรัม (สำนักงานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2558) อีกทั้งเมล็ดทานตะวันยังมีวิตามินอีสูงกว่าพืชชนิดอื่น ซึ่งวิตามินอีมีส่วนช่วยในการลดไขมันในหลอดเลือด ทำให้ระบบสืบพันธุ์เป็นปกติ บำรุงผิว และบำรุงสายตา (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2561) ในปี พ.ศ. 2565 เป็นปีที่ผู้คนให้ความสำคัญกับอาหารแห่งอนาคตที่สามารถทดแทนอาหารที่ผลิตจากวัตถุดิบจากการทำปศุสัตว์ เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนอาหาร และปัญหาโลกร้อนที่เกิดขึ้น (Haas et al., 2019) ร่วมกับปัญหาการแพ้นมวัวของคนไทย พบว่ามีคนไทยประมาณร้อยละ 3 ที่มีอาการแพ้โปรตีนในนมวัว และ มีคนไทยประมาณร้อยละ 50-60 ที่มีภาวะย่อยน้ำตาลแล็กโทสบกพร่อง ส่งผลให้เกิดอาการผิดปกติหลังบริโภคนมวัว (มาร์เก็ตธิงค์, 2020) ทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำนมจากพืชทดแทนนมวัวมีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้น โดยมูลค่าตลาดของผลิตภัณฑ์น้ำนมจากพืชในประเทศไทยปี พ.ศ. 2564 มีมูลค่าอยู่ที่ 23,633.9 ล้านบาท มีการเติบโตเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 4.6 มีการคาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2565 ตลาดน้ำนมจากพืชจะมีมูลค่าสูงถึง 24,934.4 ล้านบาท โดยผลิตภัณฑ์นมถั่วเหลืองมีสัดส่วนในตลาดน้ำนมจากพืช อยู่ประมาณร้อยละ 94.25 และน้ำนมจากพืชอื่นๆ เช่น น้ำนมอัลมอนด์ น้ำนมข้าวโอ๊ต น้ำนมข้าว และน้ำนมมะพร้าว มีสัดส่วนอยู่ประมาณร้อยละ 5.75 (ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2564) น้ำนมจากเมล็ดทานตะวัน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใหม่ในท้องตลาดที่มีโอกาสเติบโตได้อีกมาก และด้วยคู่แข่งที่น้อยจึงเป็นโอกาสที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำนมจากเมล็ดทานตะวันเพื่อความสร้างแปลกใหม่ และเป็นการเพิ่มตัวเลือกให้กับตลาดน้ำนมจากพืชพร้อมดื่ม งานวิจัยของ Kundu และคณะ (2017) ได้ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทดแทนนมด้วยการใช้น้ำนมถั่วเหลืองและน้ำนมอัลมอนด์ โดยศึกษาอัตราส่วนของเมล็ดถั่วต่อน้ำ พบว่า อัตราส่วนถั่วเมล็ดแห้งต่อน้ำใน-อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ส่งผลให้น้ำนมที่ได้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงที่สุด และส่งผลให้น้ำนมมีเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ งานวิจัยของ Manzoor และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติบางประการของน้ำนมจากอัลมอนด์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนส่งผลให้น้ำนมจากอัลมอนด์มีปริมาณไขมันและความชื้นลงลด ในขณะที่ปริมาณโปรตีน ใยอาหารและเถ้าเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Ikya และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติบางประการของน้ำนมจากถั่วเหลือง พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้น้ำนมจากถั่วเหลืองมีปริมาณความชื้น และไขมันลดลง ในขณะที่ปริมาณโปรตีน ใยอาหาร และเถ้าเพิ่มสูงขึ้น จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าปัจจัยต่างๆในกระบวนการผลิตอาจมีผลต่อคุณภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการต่อคุณภาพบางประการของน้ำนมเมล็ดทานตะวันเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำนมจากเมล็ดทานตะวันต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

เมล็ดทานตะวันเลาะเปลือก ตรา NUTRIRIS, น้ำดื่ม ตรา เนสท์เล่ เพียวไลฟ์

1. การศึกษาผลของอัตราส่วนเมล็ดทานตะวันต่อน้ำ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน

ทำการวางแผนการทดลองแบบ Box-Behnken design โดยแบ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาออกเป็น 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนเมล็ดทานตะวันแห้งต่อน้ำ (X1), อุณหภูมิในการให้ความร้อน (X2) และเวลาในการให้ความร้อน (X3) ดังตาราง ที่ 1 จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างน้ำนมเมล็ดทานตะวัน เริ่มจากชั่งน้ำหนักเมล็ดทานตะวัน ทำการแช่เมล็ดทานตะวันลงในน้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สะเด็ดน้ำส่วนเกินออกด้วยตะแกรง ทำการชั่งน้ำหนักเมล็ดทานตะวันหลังจากแช่น้ำเพื่อหาน้ำหนักของน้ำที่เข้าไปอยู่ในเมล็ดทานตะวัน ชั่งเมล็ดทานตะวันกับน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในแผนการทดลอง จากนั้นปั่นตัวอย่างด้วยเครื่องปั่นผสม ยี่ห้อ Russell Hobbs รุ่น 24731-56 ที่ความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 2 นาที นำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ยี่ห้อ Memmert รุ่น WNB 7 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ จากนั้นกรองกากออกด้วยผ้าขาวบาง บรรจุใส่ขวดเก็บตัวอย่าง และนำไปฆ่าเชื้อด้วยวิธีพาสเจอร์ไรซ์ ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (Romulo, 2022) ทำการเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ค่าสี, ค่าความหนืด และคำนวณร้อยละผลได้จากการผลิต

Table 1 Experiment design of sunflower seed milk by using Box-Behnken design

Treatment	Temperature (°C)	Time (minute)	Ratio
1	40 (-1)	10 (-1)	1:3 (0)
2	80 (1)	10 (-1)	1:3 (0)
3	40 (-1)	30 (1)	1:3 (0)
4	80 (1)	30 (1)	1:3 (0)
5	40 (-1)	20 (0)	1:2 (-1)
6	80 (1)	20 (0)	1:2 (-1)
7	40 (-1)	20 (0)	1:4 (1)
8	80 (1)	20 (0)	1:4 (1)
9	60 (0)	10 (-1)	1:2 (-1)
10	60 (0)	30 (1)	1:2 (-1)
11	60 (0)	10 (-1)	1:4 (1)
12	60 (0)	30 (1)	1:4 (1)
13	60 (0)	20 (0)	1:3 (0)
14	60 (0)	20 (0)	1:3 (0)
15	60 (0)	20 (0)	1:3 (0)

2. การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบเมล็ดทานตะวันต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน

ทำการอบเมล็ดทานตะวันก่อนนำมาทำตัวอย่างน้ำนมเมล็ดทานตะวันด้วยอุณหภูมิ 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที ด้วยเตาอบแบบขดลวดความร้อน ยี่ห้อ Sharp รุ่น EO-28LP ระบบไฟบน-ล่าง จากนั้นชั่งน้ำหนักเมล็ดทานตะวันที่อบแล้ว นำมาแช่เมล็ดทานตะวันลงในน้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สะเด็ดน้ำส่วนเกินออกด้วยตะแกรง ทำการชั่งน้ำหนักเมล็ดทานตะวันหลังจากแช่น้ำเพื่อหาน้ำหนักของน้ำที่เข้าไปอยู่ในเมล็ดทานตะวัน ชั่งเมล็ดทานตะวันกับน้ำที่อัตราส่วนเมล็ดทานตะวันแห้งต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 3 แล้วทำการปั่นตัวอย่างด้วยเครื่องปั่นผสม ยี่ห้อ Russell Hobbs รุ่น 24731-56 ที่ความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 2 นาที นำไปให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองกากออกด้วยผ้าขาวบาง บรรจุใส่ขวดเก็บตัวอย่าง และนำไปฆ่าเชื้อด้วยวิธีพาสเจอร์ไรซ์ ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (Romulo, 2022) ทำการเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศา

เซลเซียส จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ค่าสี, ค่าความหนืด และคำนวณร้อยละผลได้จากการผลิต

3. การวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid) ด้วยเครื่อง Refractometer ยี่ห้อ ATAGO รุ่น PAL-1 ทำการวัดค่าซ้ำ 3 ครั้ง (Bielmann et al., 2010)

4. การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

วัดค่า pH ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง รุ่น Sartorius Docu-pH+ meter ทำการวัดค่าซ้ำ 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 25±0.5 องศาเซลเซียส (Inmanee et al., 2020)

5. การวัดค่าสี

วัดค่าสี L*a*b* ของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน ด้วยเครื่องวัดค่าสี (HunterLab รุ่น UltraScan PRO) โดยเทตัวอย่างน้ำนมเมล็ดทานตะวันในคิวเวตขนาด 14.5 ml ทำการวัดค่าซ้ำ 3 ครั้ง ด้วยโหมด Reflectance specular excluded ในโปรแกรม EasyMatchQC (Tribst et al., 2019)

6. การวัดค่าความหนืด

วัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด ยี่ห้อ Brookfield รุ่น DVIII ULTRA ที่ต่อกับ UL adapter ปริมาณตัวอย่าง 16 ml ความเร็วในการวัด 60 รอบต่อนาที (Shear rate = 73.4 1/sec) อ่านค่าหลังจากเครื่องทำงานไปแล้วเป็นเวลา 30 วินาที ทำการวัดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส จำนวน 3 ซ้ำ (Abdulghani et al., 2015)

7. การวัดค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด

ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม ลงในแคนใส่ตัวอย่างที่ผ่านการไล่ความชื้นและทราบน้ำหนักที่แน่นอน นำตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นตัวอย่างนำไปอบไล่ความชื้นต่อเป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น และนำการชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างคงที่ (Navicha et al., 2017)

8. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าทางสถิติของคุณภาพทางเคมีกายภาพของตัวยอย่างน้ำนมเมล็ดทานตะวัน ด้วยการวางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) และสมการถดถอย (Regression) โดยทำการเก็บข้อมูลอย่างน้อย 3 การทดลอง การทดลองละ 3 ซ้ำ หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan’s Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics Version 28.0 (Thaisoftup Co., Ltd., Thailand)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของอัตราส่วนเมล็ดทานตะวันต่อน้ำ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน

ผลการศึกษาอัตราส่วนเมล็ดทานตะวันต่อน้ำ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อนต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวันแสดงดัง Fig. 1 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อน สูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ส่งผลให้น้ำนมเมล็ดทานตะวันมีค่าปริมาณร้อยละผลได้, ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ค่าความหนืด และค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนการสกัดน้ำนมอาจส่งผลให้แป้งในเมล็ดทานตะวันเกิดการเจลาติไนซ์โดยที่แป้งในเมล็ดทานตะวันสามารถเกิดการเจลาติไนซ์ได้ที่อุณหภูมิในช่วง 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส (Istrate et al., 2022) ร่วมกับโปรตีนในเมล็ดทานตะวันเกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน โดยโปรตีนในเมล็ดทานตะวันสามารถเกิดการเสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิ 75.05 ถึง 89.12 องศาเซลเซียส (Mehryar, et al., 2017) ส่งผลให้เมล็ดทานตะวันที่ผ่านการให้ความร้อนมีเนื้อสัมผัสที่นิ่มเละมากขึ้น และทำให้เนื้อของเมล็ดทานตะวันผ่านผ้าขาวบางในขั้นตอนการกรองได้มากขึ้น หรือทำให้สกัดส่วนของเนื้อเมล็ดทานตะวันออกมาได้มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Syamsuri และ Lestari (2021) ศึกษาผลของกระบวนการต่อคุณภาพของน้ำนมถั่วเหลือง โดยพบว่าการแช่เมล็ดถั่วเหลืองด้วยน้ำร้อนทำให้โปรตีนสามารถละลายตัวออกมากับน้ำนมถั่วเหลืองได้มากขึ้น เนื่องจากโปรตีนเกิดเสียสภาพเมื่อเจอความร้อน เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม ส่งผลให้น้ำนมเมล็ดทานตะวันมีค่าปริมาณร้อยละผลได้เพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ค่าความหนืด และค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของเนื้อเมล็ดทานตะวันในน้ำนมลดลง การเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้น้ำนมเมล็ดทานตะวันมีค่าปริมาณร้อยละผลได้ และค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ผลของอัตราส่วนน้ำต่อเมล็ดทานตะวัน อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อนไม่มีผลต่อค่าสี L* a* b* และค่าความเป็นกรด-ด่าง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (data not shown)

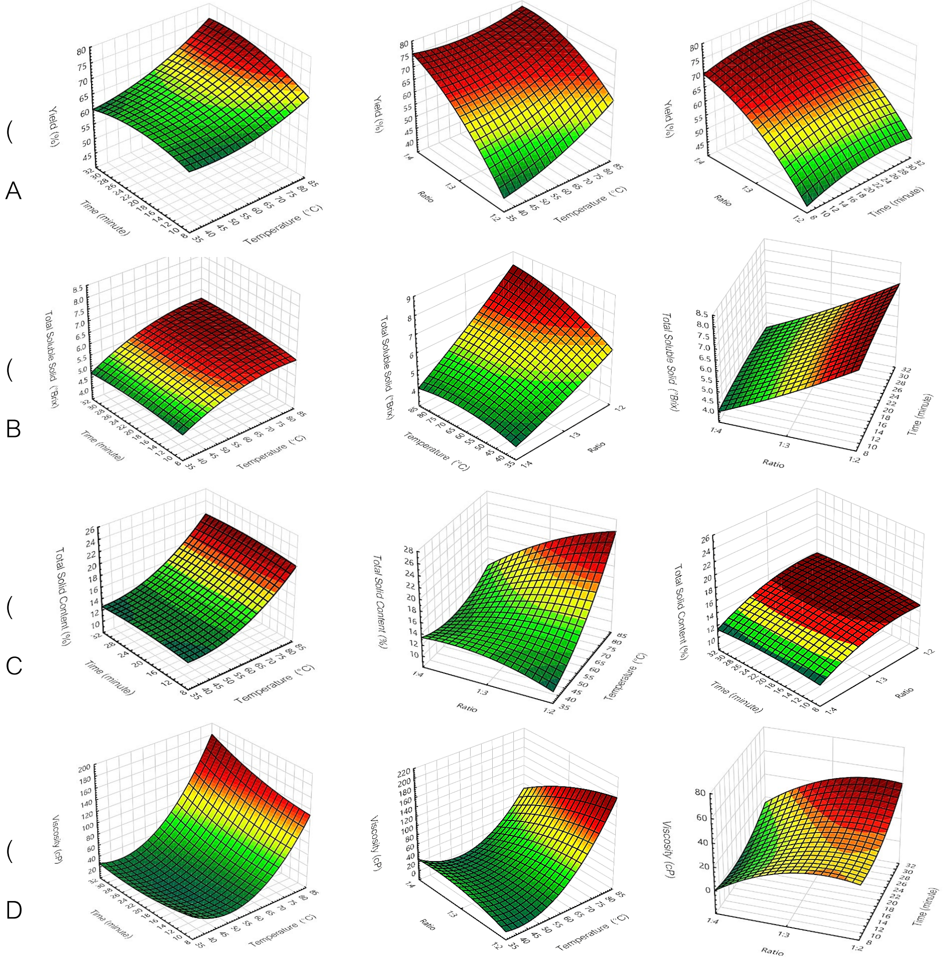


Fig. 1 Effect of temperature, time, and dry seed: water radio on: (A) %Yield; (B) Total soluble solid; (C) % Total solid content; and (D) Viscosity of sunflower seed milk

2. ผลของการอบเมล็ดทานตะวันที่อุณหภูมิ และเวลาต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน

ผลการศึกษาการอบเมล็ดทานตะวันที่อุณหภูมิ 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียสที่เวลา 5, 10 และ 15 นาทีต่อค่าสี L* a* b*, ค่าปริมาณร้อยละผลได้ และค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด แสดงดัง Table 2 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบเมล็ดทานตะวันมีผลให้ค่าร้อยละผลได้ของน้ำนมเมล็ดทานตะวันเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบ ส่งผลให้ค่าปริมาณร้อยละผลได้ของน้ำนมเมล็ดทานตะวันลดลง และส่งผลให้น้ำนมเมล็ดทานตะวันมีสีเข้มมากขึ้น ผลของการอบเมล็ดทานตะวันต่อค่าความหนืด, ค่า pH และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด แสดงใน Fig. 2 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบเมล็ดทานตะวัน ส่งผลให้น้ำนมเมล็ดทานตะวันมีค่าความหนืดสูงขึ้น แต่ไม่มีผลกับค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากอาจเป็นผลจากการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนในเมล็ดทานตะวันซึ่งสามารถเกิดอุณหภูมิ 75.05 ถึง 89.12 องศาเซลเซียส (Mehryar et al., 2017)

Table 2 Effect of roasting temperature and time on color %yield and %total solid content of sunflower seed milk

Temperature (°C)	Time (min)	% Yield	% Total Solid Content[ns]	Color L*	Color a*	Color b*
100	5	62.94±0.22[b]	15.65±0.47	63.94±0.12[g]	1.40±0.03[e]	12.84±0.05[f]
	10	62.60±1.08[b]	14.93±0.76	64.07±0.12[fg]	1.61±0.02[c]	13.16±0.03[d]
	15	65.56±0.82[a]	16.07±1.30	66.04±0.08[a]	1.59±0.01[c]	12.98±0.02[e]
150	5	62.79±0.57[b]	15.26±1.13	65.86±0.04[b]	1.55±0.01[d]	13.16±0.03[d]
	10	64.95±00.16[a]	15.85±1.26	64.11±0.04[f]	1.38±0.02[e]	13.58±0.05[b]
	15	64.64±0.56[a]	15.63±0.80	63.11±0.05[h]	1.20±0.01[f]	13.30±0.07[c]
200	5	62.88±0.14[b]	16.14±0.82	64.51±0.03[e]	1.22±0.01[f]	12.95±0.07[e]
	10	61.01±0.44[c]	15.79±0.65	65.68±0.10[c]	1.64±0.03[b]	13.36±0.04[c]
	15	60.87±0.14[c]	15.12±0.60	65.46±0.07[d]	2.66±0.03[a]	15.11±0.08[a]

*Means±SD within columns with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$) (ns) not significant

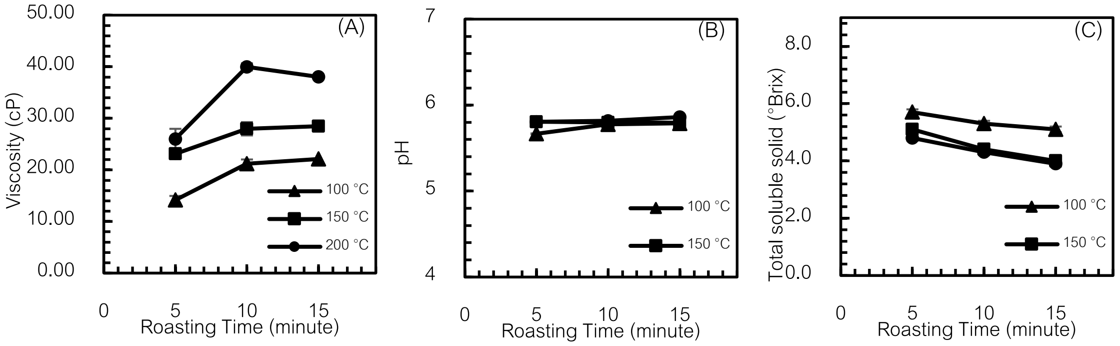


Fig. 2 Effect of roasting temperature and time on (A) Viscosity, (B) pH and (C) Total soluble solid of sunflower seed milk

สรุป

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อเมล็ดทานตะวัน อุณหภูมิในการให้ความร้อน และเวลาในการให้ความร้อน ต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้น้ำนมเมล็ดทานตะวันมีค่าปริมาณร้อยละผลได้, ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ค่าความหนืด และค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมส่งผลให้น้ำนมเมล็ดทานตะวันมีค่าปริมาณร้อยละผลได้เพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ค่าความหนืด และค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าลดลง จากการศึกษาผลของการอบเมล็ดทานตะวันต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบเมล็ดทานตะวันมีผลต่อค่าสี L* a* b* ของน้ำนมเมล็ดทานตะวัน และส่งผลให้ค่าปริมาณร้อยละผลได้, ค่าความหนืดของน้ำนมเมล็ดทานตะวันเพิ่มขึ้น จากการศึกษานี้ทำให้ทราบผลของกระบวนการต่อคุณภาพของน้ำนมเมล็ดทานตะวันเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำนมจากเมล็ดทานตะวัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ทุกคน ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและเพื่อนในภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

มาร์เก็ตธิงค์. 2563. ตลาดคนแพ้ "นมวัว" ในไทย ทำไมถึงน่าสนใจ. https://www.marketthink.co/12400, 7 กรกฎาคม 2565.

ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2564. ตลาดนมจากพืชในประเทศไทย ปี 2564. http://fic.nfi.or.th/Market OverviewDomesticDetail.php?id=358, 7 กรกฎาคม 2565.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 2561. เมล็ดทานตะวัน. https://www.thaihealth.or.th/เมล็ดทานตะวัน-2/, 7 กรกฎาคม 2565.

สำนักงานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2558. ทานตะวัน. https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/249/ทานตะวัน/?fbclid=IwAR36SyBkxfuzC0dvJIVgJqx-x6rMzWpWnXocoOvWq_UTMP83ePpbqr2I5Bk, 7 กรกฎาคม 2565.

Abdulghani, A. H., Prakash, S., Ali, M. Y., Deeth, H. C. 2015. Sensory evaluation and storage stability of UHT milk fortified with iron, magnesium, and zinc. airy Sci Technol. 95(1): 33–46.

Bielmann, V., Gillan, J., Perkins, N. R., Skidmore, A. L., Godden, S., Leslie, K. E. 2010. An evaluation of Brix refractometry instruments for measurement of colostrum quality in dairy cattle. J. Dairy Sci. 93(8): 3713–3721.

Haas, R., Schnepps, A., Pichler, A., Meixner, O. 2019. Cow milk versus plant-based milk substitutes: a comparison of product image and motivational structure of consumption. Sustain Sci. 11(18): 1–25. doi.org/10.3390/su11185046

Ikya, K., Gernah, I., Ojobo, E., Oni, K. 2013. Effect of cooking temperature on some quality characteristics of soy milk. Adv J Food Sci Technol. 5(5): 543–546. doi.org/10.19026/ajfst.5.3123

Inmanee, P., Ratphitagsanti, W., Kamonpatana, P., Pirak, T. 2020. Effect of thermosonication or microwave heating for post pasteurization on chemical, physical, and sensory characteristics of prototype sausage. Agric. Nat. Resour. 54(1): 39–47. doi.org/10.34044/j.anres.2020.54.1.06

Istrate, A., Gontariu, I., Hoffman, D. 2022. Research on the influence of the addition of sunflower seed flour on rheological propertis of the dough. Int. J. Adv. Multidiscip. Res. 9(3): 106–113.

Kundu, P., Dhankhar, J., SharmA, A. 2018. Development of non-dairy milk alternative using soymilk and almond milk. Curr. Res. Nutr. Food Sci. 6(1): 203–210. doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.1.23

Manzoor, M. F. 2017. Effect of cooking temperature on some quality characteristic of Almond milk. Int. J. Agric. Sci. 3: 131–135. doi.org/10.22573/spg.ijals. 017.s122 00077

Mehryar, L., Esmaiili, M., Zeynali, F., Sadeghi, R., Imani, M. 2017. Evaluation of thermal stability of confectionary sunflower protein isolate and its effect on nanoparticulation and particle size of the produced nanoparticles. Food Sci. Biotechnol. 26(3): 653–662. doi.org/10.1007/s10068-017-0101-7

Navicha, W. B., Hua, Y., Masamba, K., Kong, X., Zhang, C. 2017. Optimization of soybean roasting parameters in developing nutritious and lipoxygenase free soymilk. J. Food Meas. Charact. 11(4): 1899–1908.

Romulo, A. 2022. Food Processing Technologies Aspects on Plant-Based Milk Manufacturing. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1059(1): 012064. doi.org/10.1088/1755-1315/1059/1/012064

Syamsuri, R., Lestari, S. 2021. The effect of processing methods on the quality of soy milk. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 807(2): 022050. doi.org/10.1088/1755-1315/807/2/022050

Tribst, A. A. L., Falcade, L. T. P., Ribeiro, L. R., Júnior, B. R. D. C. L., de Oliveira, M. M. 2019. Impact of extended refrigerated storage and freezing/thawing storage combination on physicochemical and microstructural characteristics of raw whole and skimmed sheep milk. Int. Dairy J. 94: 29–37. doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.02.013

ผลของสารก่อเจลต่อคุณภาพบางประการของมอสซาเรลล่าชีสจากพืช

Effect of gelling agent on selected properties of plant-based mozzarella cheese

จุฑามาศ สุขดี, เทพกัญญา หาญศีลวัต*, นพรัตน์ ปราบสงบ

Jutamat Sukdi, Thepkunya Harnsilawat*, Nopparat Prabsangob

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thepkunya.h@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารก่อเจล(อะการ์และสารก่อเจลผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับโลคัสบีนกัมที่อัตราส่วน 1:1) ที่ปริมาณ 3 ระดับคือ 1 1.5 และ 2% ต่อคุณภาพบางประการของมอสซาเรลล่าชีสจากพืช พบว่า ตัวอย่างชีสจากพืชมีลักษณะปรากฏเรียบเนียน มีสีขาวออกเหลือง มีค่าสี L* อยู่ในช่วง 69.35–71.79, ค่า a* อยู่ในช่วง (-0.34)–(-0.07) และค่า b* อยู่ในช่วง 19.37–21.48 ชนิดและปริมาณของสารก่อเจลมีผลต่อค่าเนื้อสัมผัสและความสามารถในการหลอมเหลวของตัวอย่างชีสจากพืช ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจลส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ค่าความยืดหยุ่นและแรงยึดเกาะกันภายในมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) ตัวอย่างชีสจากพืชที่ใช้อะการ์ 1.5% สามารถหลอมเหลวได้มากที่สุด ผลของการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนามอสซาเรลล่าชีสจากพืชได้

คำสำคัญ: ชีสจากพืช, มอสซาเรลล่าชีส, สารก่อเจล

Abstract

The objective of this research studied the effect of gelling agents (agar and a mixture of kappa-carrageenan and locust bean gum at a ratio of 1:1) at 3 levels of 1 1.5 and 2% on selected properties of plant-based mozzarella cheese. All plant-based cheese samples were a smooth appearance, yellowish white. The color value, L* was in a range of 69.35–71.79, a* was in a range of (-0.34)–(-0.07) and b* was in a range of 19.37–21.48. The type and amount of gelling agent had an effect on the texture value and meltability ($p \leq 0.05$). When the amount of gelling agent increased, the hardness was increased but springiness and cohesiveness were decreased ($p \leq 0.05$). The plant-based cheese sample with 1.5% agar showed the highest meltability. Results from this study can be used as a guideline for the development of plant-based mozzarella cheese.

Keywords: gelling agent, mozzarella cheese, plant-based cheese

คำนำ

เนยแข็งหรือชีส (cheese) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโปรตีนในน้ำนม ส่วนใหญ่ใช้น้ำนมสัตว์เป็นวัตถุดิบ กระบวนการผลิตจะนำนมหรือหางนมมาผสมกับเอนไซม์ หรือกรด หรือจุลินทรีย์ ทำให้โปรตีนตกตะกอนแล้วแยกส่วนที่เป็นน้ำออก (กระทรวงสาธารณสุข, 2543) ชีสจึงเป็นผลิตภัณฑ์จากนมที่มีปริมาณโปรตีนสูงและเป็นแหล่งของสารอาหารที่จำเป็น อย่างไรก็ตาม ชีสจากน้ำนมสัตว์จะมีปริมาณไขมันรวม โดยเฉพาะไขมันอิ่มตัวและโคเลสเตอรอลสูง และในกระบวนการผลิตชีสจะได้ผลผลิตต่ำ ชีสจึงมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้ ชีสที่ทำจากพืชจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อช่วยลดต้นทุน ลดไขมันรวม ไขมันอิ่มตัว โคเลสเตอรอล และเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพและผู้บริโภคที่แพ้น้ำตาลแลคโตส (Boylston, 2022) โดยชีสจากพืช คือ ผลิตภัณฑ์ชีสแปรรูปที่มีส่วนผสมจากพืช บางสูตรอาจใช้เคซีนและเคซิเนตเพื่อขึ้นรูปโครงสร้างชีสและแทนที่ไขมันจากน้ำนมสัตว์ด้วยน้ำมันพืชและบางสูตรอาจผลิตโดยใช้โปรตีนจากพืชและน้ำมันพืชแทนที่ทั้งหมด แม้ว่ากระบวนการทำชีสจากพืชจะคล้ายกับกระบวนการผลิตชีสจากน้ำนมสัตว์ แต่ความแตกต่างในสมบัติเชิงหน้าที่ของส่วนผสมจากน้ำนมสัตว์และส่วนผสมจากพืชมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน คุณภาพของชีส ความสามารถในการละลายได้และละลายไม่ได้ของผลิตภัณฑ์ชีสแปรรูป (Boylston, 2022) โดยส่วนใหญ่ชีสที่ผลิตจากพืชจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสและความสามารถในการละลายได้ไม่ค่อยดีเมื่อเทียบกับชีสจากน้ำนมสัตว์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและละลายได้ดี รวมถึงพืชบางชนิดมีกลิ่นเฉพาะที่แรงจึงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น การพัฒนาชีสจากพืชให้มีรสชาติ เนื้อสัมผัสและความสามารถในการละลายเสมือนกับชีสที่ผลิตจากน้ำนมสัตว์จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยหนึ่งในวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการพัฒนามอสซาเรลล่าชีสจากพืช คือ สารก่อเจล การเติมสารก่อเจลสามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสและช่วยขึ้นรูปเป็นโครงสร้างชีสได้ โดยสารก่อเจลที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ อะการ์ และ แคปปา-คาราจีแนน มีคุณสมบัติเป็น Thermo-reversible gel สามารถละลายได้เมื่อโดนความร้อนและการผสมสารก่อเจลระหว่างแคปปา-คาราจีแนนและโลคัสบีนกัม ช่วยทำให้โครงสร้างเจลแข็งแรงและมีความหยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้แคปปา-คาราจีแนนเพียงชนิดเดียว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารก่อเจลต่อคุณภาพบางประการของมอสซาเรลล่าชีสจากพืช

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

สารก่อเจล ได้แก่ อะการ์, แคปปา-คาราจีแนน (kCAR) และ โลคัสบีนกัม (LBG) (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, ประเทศไทย) เม็ดมะม่วงหิมพานต์ (ตราเอโร่) (บริษัท สยามแม็คโคร จำกัด (มหาชน), ประเทศไทย) แป้งมันสำปะหลัง (ตราใบหยก) (บริษัท บางกอกอินเตอร์ฟูด จำกัด, ประเทศไทย) โซเดียมซิเตรท (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, ประเทศไทย) เกลือ (ตราปรุงทิพย์) (บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด, ประเทศไทย) น้ำมันมะพร้าว (ตราเนเชอเรล) (บริษัท ล่ำสูง จำกัด (มหาชน), ประเทศไทย) กรดแลคติก (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, ประเทศไทย) Nutritional Yeast (ตราออร์แกนิค ซีดส์) (บริษัท เงินทองมั่งมี จำกัด, ประเทศไทย) ผงกระเทียม (บริษัท ผึ้งหลวง สไปซ์ จำกัด, ประเทศไทย) และ น้ำสะอาด

การเตรียมน้ำนมเม็ดมะม่วงหิมพานต์

เตรียมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยล้างเม็ดมะม่วงหิมพานต์และนำไปแช่ในน้ำสะอาดที่อัตราส่วนเม็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อน้ำ = 1:10 น้ำหนัก/ปริมาตร แช่ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชม. จากนั้นแยกน้ำออก ชั่งน้ำมาผสมกับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่อัตราส่วนเม็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อน้ำ = 1:1.6 น้ำหนัก/ปริมาตร นำไปปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็ว

31000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และกรองกากออกด้วยกระชอน จะได้น้ำนมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (Modified from Ahsan et al., 2015)

การเตรียมสารละลายของสารก่อเจล

การศึกษานี้ใช้สารก่อเจล 2 กลุ่ม ได้แก่: (1) อะการ์; และ (2) สารก่อเจลผสมของแคปปา-คาราจีแนนและโลคัสบีนกัม (kCAR-LBG) ที่อัตราส่วน 1:1 ชั่งสารก่อเจลกับน้ำให้มีความเข้มข้น 2.2, 3.3 และ 4.3% เพื่อที่จะได้ความเข้มข้นของสารก่อเจลในสูตรชีสจากพืชเท่ากับ 1.00, 1.50 และ 2.00% น้ำหนัก/ปริมาตร จากนั้นค่อย ๆ เทสารลงในน้ำที่อุณหภูมิ 85±2 °C และกวนผสมเป็นเวลา 1 นาที จนละลายสมบูรณ์ จะได้สารละลายเข้มข้นของสารก่อเจลเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในสูตรชีสจากพืชในข้อต่อไป (Modified from da Costa et al., 2020)

การเตรียมชีสจากพืช

เตรียมส่วนผสม ได้แก่ สารละลายของสารก่อเจลเข้มข้น 46.00% น้ำนมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ 24.00% น้ำมันมะพร้าว 22.00% แป้งมันสำปะหลัง 4.00% โซเดียมซิเตรท 1.00% Nutritional yeast 1.07% ผงกระเทียม 1.07% เกลือ 0.50% และ กรดแลคติก 0.36% กำหนดน้ำหนักรวมสูตรชีสเท่ากับ 400 กรัม ผสมน้ำนมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ แป้งมันสำปะหลัง โซเดียมซิเตรท เกลือ กรดแลคติก Nutritional yeast และ ผงกระเทียม เข้าด้วยกัน ทำการปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็ว 31000 รอบต่อนาที นาน 6 วินาที ให้ส่วนผสมเป็นของเหลวเนื้อเดียวกัน เติมน้ำมันมะพร้าวและปั่นผสมต่ออีก 6 วินาที จากนั้นเติมสารก่อเจลที่เตรียมไว้ และปั่นผสมต่ออีก 10 วินาที รวมเวลาปั่นทั้งหมด 22 วินาที จนส่วนผสมทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 78±2 °C และกวนผสมนาน 1 นาที ตักตัวอย่างชีสที่ได้ใส่ในภาชนะแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดยาว 8 เซนติเมตร กว้าง 5.5 เซนติเมตร สูง 2.4 เซนติเมตร เก็บไว้ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5±2 °C เป็นเวลา 24 ชม. จะได้ตัวอย่างมอสซาเรลล่าชีสจากพืช (Modified from Zeng, 2021) การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบ 2x3 Factorial in CRD ได้ทั้งหมด 6 ตัวอย่างคือ สารก่อเจล 2 กลุ่ม (อะการ์ และสารก่อเจลผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับโลคัสบีนกัม) ความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 1.00 1.50 และ 2.00% นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ดังนี้

การวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

ตัดตัวอย่างชีสขนาด 15x15x15 มิลลิเมตร ใส่ในกล่องพลาสติกใสที่มีฝาปิด วางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25–27 °C เป็นเวลา 30 นาที และทำการวิเคราะห์แบบ Texture profile analysis (TPA) ด้วยเครื่อง Texture analyzer วัดโดยกดตัวอย่างลง 60% ของความสูงของตัวอย่าง 2 ครั้ง โดยใช้หัววัดทรงกระบอกสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็วในการทดสอบ 1.5 mm/s โดยทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ และวัดค่าตัวอย่างละ 25 ครั้ง (Alinovi et al., 2020)

การวิเคราะห์ค่าสี

วัดค่าสี L*, a*, b* ด้วยเครื่องวัดสี Spectrophotometer ระบบ CIELAB L*, a*, b* โดยใช้แหล่งแสงเป็น Daylight (D65) มีมุมของผู้สังเกตการณ์ 10 องศา นำตัวอย่างชีสขนาด 15x15x15 มิลลิเมตร บดโดยใช้มือให้เป็นเนื้อเดียวกันและใส่ในอุปกรณ์วัดสี จากนั้นไปวางที่เครื่องแล้วครอบด้วยฝาสีดำทรงกระบอกและวัดค่าสีของตัวอย่าง โดยทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ และวัดค่าตัวอย่างละ 10 ครั้ง (Modified from Zhang et al., 2021)

การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของชีส

นำตัวอย่างชีสรูปทรงครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร และสูง 5 มิลลิเมตร อุณหภูมิแช่เย็น 5±2°C วางบนฝา Moisture can นำไปให้ความร้อนในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำให้เย็นลงในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 30 นาที ทำการวัดค่าการละลายของชีส โดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชีสที่ละลาย (mm) และ คำนวณ % Meltability ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ และวัดค่าตัวอย่างละ 10 ครั้ง (Modified from Zhang et al., 2021) ตาม Equation 1

$$\%\ \text{Meltability} = \frac{\text{The diameter of heated cheese - the diameter of cheese before heating}}{\text{The diameter of cheese before heating}} \times 100 \qquad (1)$$

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติด้วย Analysis of variance (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics Version 28.0 (Thaisoftup Co., Ltd., Thailand)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของสารก่อเจลต่อคุณภาพบางประการของมอสซาเรลล่าชีสจากพืช โดยศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารก่อเจลที่แตกต่างกัน ซึ่งชนิดของสารก่อเจล แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ อะการ์ (Agar) และ สารก่อเจลผสมของ แคปปา-คาราจีแนน (kCAR) และ โลคัสบีนกัม (LBG) ที่อัตราส่วน 1:1 แปรความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 1.00 1.50 และ 2.00% ตามลำดับ ตัวอย่างที่เตรียมได้มีลักษณะปรากฏแสดงดัง Table 1

Table 1 Effect of gelling agent on the appearance of plant-based mozzarella cheese

Gelling agent	Amount (%)		
	1.00	1.50	2.00
Agar			
kCAR–LBG			

จาก Table 1 พบว่า ตัวอย่างชีสทุกตัวอย่างมีสีขาวออกเหลือง มีสีอ่อน สอดคล้องกับค่าสีที่แสดงใน Table 2 โดยตัวอย่างชีสจากพืชที่เตรียมได้มีค่าความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 69.35–71.79 ค่าความเป็นสีเขียว (a*) อยู่ในช่วง (-0.34)–(-0.07) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) อยู่ในช่วง 19.37–21.48 เนื่องมาจากชีสจากพืชผลิตจากน้ำนมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีสีขาวและมีการเติมส่วนผสมอื่น ๆ ลงไปเช่น สารก่อเจล Nutritional yeast ผงกระเทียม เป็นต้น จึงทำให้สีของชีสมีสีขาวออกเหลืองตามสีธรรมชาติ เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏของตัวอย่างชีสที่เตรียมได้ พบว่า ตัวอย่างชีสทุกตัวอย่างมีลักษณะก้อนชีสมีผิวเรียบเนียน เป็นเนื้อเดียวกัน ยกเว้นตัวอย่างชีสที่ใช้สารก่อเจลผสมระหว่าง kCAR-LBG ที่

ความเข้มข้น 2% มีผิวไม่เรียบเนียน ลักษณะผิวแตกและขรุขระ อาจเป็นผลจากปริมาณของสารก่อเจลที่สูง โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารก่อเจลในระดับหนึ่ง ทำให้สารละลายของสารก่อเจลผสมมีความข้นหนืดสูง เมื่อนำสารผสมที่มีความข้นหนืดมากผสมกับส่วนอื่น ๆ ในสูตร จึงมีผลให้ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื้อชีสที่ได้จึงมีผิวไม่เรียบเนียน

เมื่อพิจารณาค่าคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส (Table 2) พบว่า ชนิดและปริมาณของสารก่อเจลมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างชีสจากพืช โดยชีสจากพืชที่มีการเติมสารก่อเจล ส่งผลให้มีค่าความแข็ง (Hardness) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ชีสที่มีการใช้ kCAR-LBG 1.5% ให้ค่าความแข็งมากที่สุด และชีสที่มีการใช้อะการ์ 1% ให้ค่าความแข็งต่ำที่สุด ส่วนค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และ แรงยึดเกาะกันภายใน (Cohesiveness) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจลส่งผลให้ค่าความแข็งของตัวอย่างชีสจากพืชมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความยืดหยุ่นและแรงยึดเกาะกันภายในมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของชนิดของสารก่อเจล พบว่า ตัวอย่างชีสที่ใช้สารก่อเจลผสม (kCAR-LBG) มีค่าคุณภาพทางเนื้อสัมผัสมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อะการ์เพียงชนิดเดียว การที่ปริมาณของสารก่อเจลมีผลต่อค่าความแข็งอาจเป็นผลจากปริมาณน้ำในสูตรมีปริมาณลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaya et al. (2015) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแคปปา-คาราจีแนนที่ผสมกับกลูโคแมนแนนในตัวอย่างเจลที่ผลิตจากส่วนผสมของคาราจีแนนและกลูโคแมนแนน มีผลให้ค่า Gel strength และ Gel hardness มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณสารก่อเจลมีผลต่อค่าความแข็ง เนื่องจากเจลที่เกิดขึ้นในระบบเกิดโครงสร้างเป็น Double helixes โดยโครงสร้างนี้จะรวมตัวกันเป็นร่างแหพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างสามมิติมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารที่ทำให้เกิดเจลในตัวอย่าง จึงทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้โครงร่างตาข่ายของเจลมีความแข็งแรงและมีความคงตัวมากขึ้น เจลที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง (Langendorff et al., 1999)

Table 2 Effect of gelling agent at different concentrations on color and texture of plant-based mozzarella cheese

Gelling agent	Amount	Color			Texture		
	(%)	L*	a*	b*	Hardness (N)	Springiness	Cohesiveness
Agar	1.00	70.96 ± 0.64^{ab}	-0.34 ± 0.12^{b}	20.21 ± 0.86^{bc}	137.86 ± 3.89^{f}	0.59 ± 0.02^{ab}	0.42 ± 0.03^{a}
	1.50	69.99 ± 0.50^{bc}	-0.07 ± 0.04^{a}	21.25 ± 0.25^{a}	169.60 ± 4.90^{e}	0.54 ± 0.11^{cb}	0.33 ± 0.08^{b}
	2.00	69.35 ± 1.64^{c}	-0.23 ± 0.13^{ab}	21.48 ± 1.31^{a}	266.26 ± 3.86^{c}	0.33 ± 0.08^{d}	0.18 ± 0.04^{c}
kCAR-LBG	1.00	71.15 ± 0.97^{ab}	-0.27 ± 0.20^{b}	20.58 ± 0.33^{ab}	236.55 ± 3.78^{d}	0.64 ± 0.06^{a}	0.41 ± 0.02^{a}
	1.50	71.23 ± 0.69^{a}	-0.25 ± 0.06^{b}	19.37 ± 0.65^{c}	292.11 ± 3.96^{a}	0.58 ± 0.02^{ab}	0.37 ± 0.04^{ab}
	2.00	71.79 ± 0.97^{a}	-0.27 ± 0.16^{b}	20.63 ± 0.35^{ab}	279.77 ± 4.48^{b}	0.44 ± 0.07^{c}	0.31 ± 0.03^{b}

[a-f]Means within the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

Fig. 1 แสดงผลของสารก่อเจลต่อความสามารถในการหลอมเหลวของตัวอย่างมอสซาเรลล่าชีสจากพืช พบว่า ชีสจากพืชที่มีการเติมสารก่อเจลทั้ง 2 กลุ่มมีค่าความสามารถในการหลอมเหลวที่ 4–24% โดยตัวอย่างชีสจากพืชสามารถหลอมเหลวได้เมื่อโดนความร้อน เนื่องจากสารก่อเจลที่ใช้ในการศึกษานี้เป็น Thermo-reversible gel ซึ่งสามารถก่อเจลและหลอมละลายเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Imeson, 1997) เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณสารก่อเจลในการศึกษานี้ พบว่า ชีสที่เติมอะการ์ 1.5% สามารถหลอมเหลวได้มากที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างชีสที่เติม kCAR-LBG 2% ไม่พบการหลอมเหลว ($p \leq 0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมเหลวแปรผันตามปริมาณสารก่อเจล เมื่อปริมาณสารก่อเจลมากขึ้นอาจส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้น (Nayar et al., 2012) ตัวอย่างชีสที่มีสารก่อเจลปริมาณมาก จึงมีค่าความสามารถในการหลอมเหลวต่ำกว่าตัวอย่างชีสที่มีสารก่อเจลปริมาณน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Solowiej (2012) ที่ศึกษาผลของการเติม Kappa-carrageenan ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสและ

ความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์เลียนแบบชีส พบว่า เมื่อปริมาณ Kappa-carrageenan เพิ่มขึ้นจาก 0.05 ถึง 0.3% ทำให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ชีสเพิ่มขึ้น แต่ค่าแรงยึดติดและความสามารถในการหลอมละลายลดลง

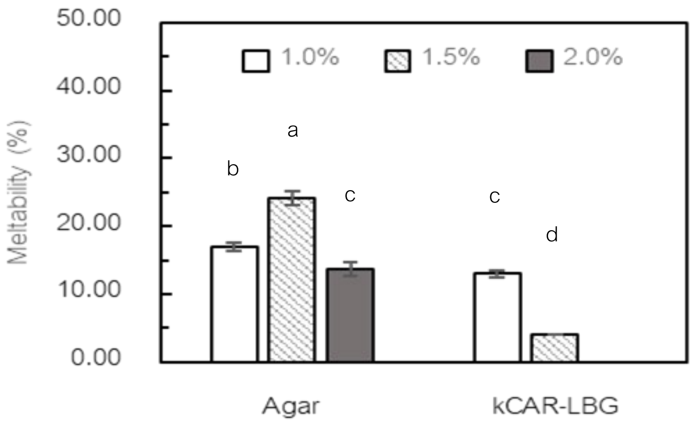


Fig. 1 Effect of gelling agent at different concentrations on meltability of plant-based mozzarella cheese. kCAR = Kappa-carrageenan; LBG = Locust bean gum. Lowercase letter means for cheese at the same storage time with different letters are significantly different ($p \le 0.05$)

สรุป

จากการศึกษาผลของสารก่อเจลต่อคุณภาพบางประการของมอสซาเรลล่าชีสจากพืช พบว่า ชนิดและปริมาณของสารก่อเจลมีผลต่อค่าเนื้อสัมผัสและความสามารถในการหลอมเหลวของชีส โดยตัวอย่างชีสจากพืชมีค่าสี ความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 69.35–71.79 ค่าความเป็นสีเขียว (a*) อยู่ในช่วง (-0.34)–(-0.07) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) อยู่ในช่วง 19.37–21.48 มีค่าความแข็งแตกต่างกัน ($p \le 0.05$) เมื่อพิจารณาปริมาณและชนิดสารก่อเจล ตัวอย่างที่ใช้สารก่อเจลผสม ได้แก่ kCAR ผสม LBG ที่อัตราส่วน 1:1 มีค่าความแข็งสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อะการ์เป็นสารก่อเจลชนิดเดียว แต่ให้ความสามารถในการหลอมเหลวของตัวอย่างได้น้อยกว่า ส่วนตัวอย่างชีสที่ใช้อะการ์ 1.5% สามารถหลอมเหลวได้มากที่สุด จากงานวิจัยนี้ได้เลือกชีสที่ใช้อะการ์ 1.5% เป็นแนวทางในการพัฒนามอสซาเรลล่าชีสจากพืชต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก และ รศ. ดร.นพรัตน์ ปราบสงบ อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระร่วมที่ได้ช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัยมาจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งขอขอบพระคุณการให้ทุนสนับสนุนในการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 ของคณะอุตสาหกรรมเกษตรมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 209) พ.ศ.2543 เรื่องเนยแข็ง. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 118, ตอนพิเศษ 6 ง. (ลงวันที่ 24 มกราคม พ.ศ.2544).

Ahsan, S., Zahoor, T., Hussain, M., Khalid, N., Khaliq, A., Umar, M. 2015. Preparation and quality characterization of soy milk based non-dairy ice cream. Int. j. adv. appl. sci. 01: 21–27.

Alinovia, M., Corredig, M., Mucchetti, G., Carini, E. 2020. Water status and dynamics of high-moisture mozzarella cheese as affected by frozen and refrigerated storage. Food Res Int. 137: 1–12.

Boylston, T. D. 2022. The use of vegetable ingredients in processed cheese. In: El-Bakry, M. and Mehta, B.M. (Eds.). Processed Cheese Science and Technology. E-Publishing Inc, New York, NY, USA, pp. 113–125.

Da Costa, J. N., Leal, A. R., Nascimento, L. G. L., Rodrigues, D. C., Muniz, C. R., Figueiredo, R. W., Mata, P., Noronha, J. P., de Sousa, P. H. M. 2020. Texture, microstructure and volatile profile of structured guava using agar and gellan gum. Int. J. Gastron. Food Sci. 20: 1–8.

Imeson, A. 1997. Thickening and Gelling Agents for Food. Second edition. Blackie Academic & Professional. London.

Kaya, A. O. W., Suryani, A., Santoso, J., Rusli, M. S. 2015. The effect of gelling agent concentration on the characteristic of gel produced from the mixture of semi-refined carrageenan and glucomannan. Int. j. sci.: basic appl. res. 20(1): 313–324.

Langendorff, V., Cuvelier, G., Launay, B., Michon, C., Parker, A., Kruif, C. G. D. 1999. Casein micelle/iota carrageenan in interactions in milk: influence of temperature. Food Hydrocoll. 13(3): 211–218.

Nayar, V. T., Weiland, J. D., Nelson, C. S., Hodge, A. M. 2012. Elastic and viscoelastic characterization of agar. J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 7: 60–68.

Solowiej, B. G. 2012. Effect of K-carrageenan on physicochemical properties of processed cheese analogues. ZYWNOSC. Nauka. Technologia. Jakosc. 2(81): 107–118.

Zeng, C. 2021. Development of vegan mozzarella-like cheese with extruded fava protein. M.Sc. thesis, Graduate school, Cornell University. New York, NY, USA.

Zhang, D., Lillevang, S. K., Shah, N. P. 2021. Influence of pre-acidification, and addition of KGM and whey protein-based fat replacers CH-4560, and YO-8075 on texture characteristics and pizza bake properties of low-fat Mozzarella cheese. LWT - Food Sci. Technol. 137: 1–11.

การออกแบบและพัฒนาลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติสำหรับเสื้อผ้าเด็กหญิงปฐมวัย

The design and development of hand-woven ikat silk with natural dyes for Girl's clothes

อภิชญา ชาญเชี่ยว, กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล*

Apichaya chanchiew, Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul*

ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Textile science, Factory of Argo-industry, Kasersart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagiktw@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาและความต้องการของเด็กและผู้ปกครองเกี่ยวกับลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติสำหรับเสื้อผ้าเด็กหญิงปฐมวัย เก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์เชิงลึกและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยโปรแกรมเอ็นวีโวพร้อมทั้งจัดกลุ่มปัญหาและความต้องการด้วยโมเดลคาโน จากนั้นเก็บข้อมูลโดยแบบสอบถามเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเกี่ยวกับปัจจัยในการเลือกซื้อเสื้อผ้าเด็ก และทำการวิเคราะห์ข้อมูลความต้องการด้วยแนวคิดการคิดเชิงออกแบบ จากการจัดกลุ่มปัญหาและความต้องการด้วยโมเดลคาโน พบว่า: (1) คุณลักษณะพื้นฐาน ได้แก่ สีไม่ตก ดูแลรักษาง่าย ไม่ระคายเคืองผิวหนัง; (2) คุณลักษณะที่เกิดความพึงพอใจ ได้แก่ รูปแบบเสื้อผ้า สวมใส่สบาย สีสันและลวดลาย; และ (3) คุณลักษณะที่เกิดความประทับใจ ได้แก่ รองรับการเจริญเติบโต เคลื่อนไหวสะดวก เนื้อผ้านุ่มพิเศษ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามพบว่าปัจจัยในการเลือกซื้อเสื้อผ้าเด็ก ได้แก่ เนื้อผ้า รูปแบบเสื้อผ้า สีสันและลวดลาย ราคา และโอกาสในการสวมใส่ และผลจากการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องให้ความเห็นผ่านการคิดเชิงออกแบบว่า ควรทอผ้าไหมมัดหมี่ผสมเส้นด้ายฝ้ายให้มีลวดลายการ์ตูนสีสันสดใสให้เหมาะสมกับวัยของเด็กหญิง

คำสำคัญ: การออกแบบและพัฒนา, เด็กหญิงปฐมวัย, ผลิตเสื้อผ้า, ผ้าไหมมัดหมี่ทอมือ

Abstract

This research studied the problems and needs of children and their parents regarding hand-woven Ikat silk with natural dyes for Girl's clothes. Data were collected through In-depth Interviews and the data were qualitatively analyzed by the Nvivo program and the problems and needs were grouped by the Kano model. Then collected data by questionnaires to analyze statistical data on the factors for purchasing children's clothes and analyzing demand data with design thinking concepts. Classifying problems and needs with the Kano model, it was found that: (1) Basic attributes were staining, easy care, and non-skin irritated; (2) Performance attributes were clothing styles, comfortable to wear, colors and patterns; and (3) The delight attributes were supported for growth, easy to move, and the super soft fabric. When analyzing the data from the questionnaire, it was found that the factors for purchasing children's clothes were fabrics, clothing styles, colors and patterns, prices, and occasions to wear. The results from brainstorming from relevant experts commented through design thinking that Ikat silk mixed with cotton yarn should be weaved with colorful cartoon patterns suitable for the age of the girls.

Keywords: clothing production, design and development, early childhood girls, hand-woven Ikat silk

คำนำ

ผ้าไหมถือเป็นมรดกอันล้ำค่าด้านหัตกรรมประเภทหนึ่งของประเทศไทย หนึ่งในชนิดของผ้าไหมที่ได้รับความนิยมมาก ได้แก่ ผ้าไหมมัดหมี่ ซึ่งมีความโดดเด่นกว่าผ้าไหมชนิดอื่นๆ ในด้านของลวดลายอันเกิดจากการย้อมสีเส้นไหมก่อนนำไปทอ ทำให้มีลวดลายที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละผืน (อรรถพล และคณะ, 2556) การพัฒนาผ้าไหมและผลิตภัณฑ์จากไหมเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคสามารถเจาะตลาดได้หลายกลุ่ม ดังสอดคล้องกับข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า (สนค.) ว่าปัจจุบันมีการใช้ผ้าไหมไปสร้างสรรค์ผลงานหลากหลายประเภท เช่น เสื้อผ้า งานตกแต่งบ้าน และเฟอร์นิเจอร์ จนกลายเป็นสินค้าที่ได้รับความนิยมซึ่งแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ โดยนำผ้าไหมมาออกแบบในรูปแบบที่มีความทันสมัย ประยุกต์ปรับเปลี่ยนตามกระแสนิยม (กรุงเทพธุรกิจ, 2564) และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผ้าไหมสำหรับเด็กเป็นกลุ่มตลาดที่มีความน่าสนใจพบว่ามูลค่าตลาดเสื้อผ้าเด็กมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง (สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.), 2561) ผ้าไหมเป็นผ้าที่ทอจากเส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับผลิตเสื้อผ้าเด็กเนื่องจากสมบัติการระบายอากาศที่ดี และไม่สร้างความระคายเคืองต่อผิวที่บอบบางของเด็ก อีกทั้งยังเป็นการปลูกฝังความเข้าใจเกี่ยวกับผ้าไหมไทยที่ถูกต้องและเป็นวัฒนธรรมสืบทอดมาอย่างยาวนาน สอดคล้องกับนโยบายส่งเสริมและสนับสนุนการใช้และสวมใส่ผ้าไทยตามที่กระทรวงมหาดไทยได้มีการประชาสัมพันธ์ตามสื่อต่างๆ และได้มีหน่วยงานและประชาชนนำไปปฏิบัติตามอย่างแพร่หลาย (สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี, 2563)

งานวิจัยเรื่องการศึกษาการออกแบบและพัฒนาลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติสำหรับเสื้อผ้าสำหรับเด็กหญิงปฐมวัยใช้การคิดเชิงออกแบบ (Design thinking) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับโมเดลคาโนในการศึกษาและจำแนกความต้องการของกลุ่มตัวอย่างให้ชัดเจน โดยแบ่งออกเป็น 3 คุณลักษณะ ได้แก่ ความต้องการขั้นพื้นฐาน ความต้องการขั้นที่เกิดความพึงพอใจ และคุณลักษณะที่เกิดความประทับใจ (Sauerwein et al., 1996) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์แนวทางการแก้ไขปัญหาและความต้องการ รวมถึงการใช้การคิดเชิงออกแบบเพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหาและตอบสนองความต้องการของกลุ่มตัวอย่าง เป็นกระบวนการคิดเชิงออกแบบสำหรับพัฒนานวัตกรรมที่ผสมผสานการคิดสร้างสรรค์และการคิดเชิงธุรกิจ เพื่อพัฒนาสิ่งใหม่ๆ และนวัตกรรมอย่างมีระบบ (มะยุรีย์ และพิชญาภา, 2564) ซึ่งช่วยส่งเสริมให้กลุ่มเป้าหมายเห็นถึงคุณค่าและความสำคัญของผ้าไหมไทย เป็นการสืบทอดภูมิปัญญาทั้งในแง่คุณค่าทางวัฒนธรรมและคุณค่าทางเศรษฐกิจ เพื่อขยายโอกาสของผ้าไหมไทยสู่ตลาดสากลต่อไป

วิธีดำเนินงานวิจัย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร ได้แก่ ผู้ปกครองอายุ 25–45 ปี ที่มีบุตรเป็นเด็กหญิงปฐมวัย อายุ 4–6 ปี ที่ร่างกายสมบูรณ์แข็งแรงดีและอาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร

กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ผู้ปกครองอายุ 25–45 ปี ที่มีบุตรเป็นเด็กหญิงปฐมวัย อายุ 4–6 ปี ที่ร่างกายสมบูรณ์แข็งแรงดีและอาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร เป็นการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกจำนวน 10 คน และเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามจำนวน 100 คน

ผู้เชี่ยวชาญด้านงานวิจัย ด้านการออกแบบเสื้อผ้าเด็ก ผู้เชี่ยวชาญด้านการทอผ้า และตัวแทนผู้ปกครอง รวมจำนวน 5 คน

เครื่องมือในการวิจัย

การสัมภาษณ์เชิงลึก (in-depth interviews) ด้วยคำถามกึ่งโครงสร้าง โดยมีการบันทึกเสียงการสัมภาษณ์และทำการถอดเทปการสนทนาเพื่อเก็บข้อมูลเป็นคำพูดคำต่อคำ (Verbatim) หลังการสัมภาษณ์โดยเป็นการสัมภาษณ์ที่เป็นในลักษณะของการพูดคุย ซักถาม ระหว่างผู้สัมภาษณ์และผู้ให้สัมภาษณ์โดยตรง

การตอบแบบสอบถาม (questionnaires) จำนวน 100 คน คำถามแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ ส่วนที่ 2 พฤติกรรมการเลือกซื้อ และส่วนที่ 3 ทัศนคติและความคิดเห็นเกี่ยวกับผ้าไหมมัดหมี่ และทดสอบสมมติฐานด้านข้อมูลทางประชากรศาสตร์มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมและความคิดเห็นเกี่ยวกับผ้าไหมมัดหมี่ โดยทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้สถิติไคสแคว์ (Chi Square test)

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการ เพื่อออกแบบลายผ้ามัดหมี่ทอมือให้เหมาะสมกับกลุ่มเสื้อผ้าเด็กหญิงปฐมวัย ด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้ปกครองจำนวน 10 คน คนละ 1 ครั้ง ครั้งละ 60 นาที โดยบันทึกเสียงสนทนา
2. ศึกษาปัจจัยในการเลือกซื้อของเด็กและผู้ปกครองเกี่ยวกับผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติสำหรับเสื้อผ้าเด็กหญิงปฐมวัย เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถาม จำนวน 100 คน โดยเป็นแบบสอบถามออนไลน์
3. ระดมสมองเพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหาของกลุ่มตัวอย่าง โดยผ่านกระบวนการคิดเชิงออกแบบจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ที่เกี่ยวข้องทั้ง 5 คน จากด้านงานวิจัย ด้านการออกแบบเสื้อผ้าเด็ก ผู้เชี่ยวชาญด้านการทอผ้า และตัวแทนผู้ปกครอง
4. ประเมินความชื่นชอบที่มีต่อภาพต้นแบบลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติ เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถาม จำนวน 100 คน โดยเป็นแบบสอบถามออนไลน์

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Nvivo 10 ใช้สำหรับการจัดการข้อมูล โดยจัดแบ่งกลุ่มคำสัมภาษณ์โดยแจงประเด็นตามองค์ประกอบของตัวแบบคาโนและวิเคราะห์ความเชื่อมโยงทางข้อมูล โดยนับความถี่ในการกล่าวถึง (Reference Count) เพื่อแสดงให้เห็นถึงลำดับความสำคัญของปัญหาและความต้องการ
2. โปรแกรมสำเร็จรูป Statistical Package for the Social Science (SPSS) ver.22 .ใช้สำหรับช่วยวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและการจัดการข้อมูลต่างๆ

ผลการวิจัย

ผลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก

จากการสัมภาษณ์เชิงลึกกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 10 คน โดยใช้ตัวแบบสอบถามกึ่งโครงสร้างเกี่ยวกับปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งานที่มีต่อผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของคาโน (Kano's Model) ซึ่งจำแนกปัญหาและความต้องการออกเป็น 3 คุณลักษณะ ได้แก่ คุณลักษณะพื้นฐาน (Basic Attribute), คุณลักษณะที่เกิดความพึงพอใจ (Performance Attribute) และคุณลักษณะที่เกิดความประทับใจ (Delight Attribute) เมื่อนำบทสนทนามานับความถี่ในการกล่าวซ้ำและจัดกลุ่มข้อมูลคำสนทนาด้วยโปรแกรม Nvivo10 ได้ผลแสดงดัง Table 1

Table 1 Analysis of problems and needs of the samples with Nvivo 10 and Kano models.

Attribute	Problems and needs	Frequency*	Percentage (%)
Basic Attribute	Non-skin irritated	18	90
Basic Attribute	Easy care	6	50
Basic Attribute	Staining	4	20
Performance Attribute	Colors and patterns	20	70
Performance Attribute	Comfortable to wear	16	70
Performance Attribute	Clothing style	9	40
Delight Attribute	Super soft fabric	18	70
Delight Attribute	Easy to move	4	20
Delight Attribute	Supported for growth	3	30

Note: * In-depth interviewer mention frequency number based on Nvivo 10 analysis

คุณลักษณะพื้นฐาน ผู้ปกครองร้อยละ 90 กล่าวถึงการไม่ระคายเคืองผิวหนัง พบความถี่ของการพูดซ้ำ 18 ครั้ง ผู้ปกครองร้อยละ 50 กล่าวถึงการดูแลรักษาง่าย พบความถี่ของการพูดซ้ำ 6 ครั้ง และผู้ปกครองร้อยละ 20 กล่าวถึงการไม่ตกสีของเสื้อผ้า พบความถี่ของการพูดซ้ำ 4 ครั้ง

คุณลักษณะที่เกิดความพึงพอใจ ผู้ปกครองร้อยละ 70 กล่าวถึงสีสันและลวดลาย พบความถี่ของการพูดซ้ำ 20 ครั้ง ผู้ปกครองร้อยละ 70 กล่าวถึงความสวมใส่สบาย พบความถี่ของการพูดซ้ำ 16 ครั้ง และผู้ปกครองร้อยละ 40 กล่าวถึงรูปแบบเสื้อผ้า พบความถี่ของการพูดซ้ำ 9 ครั้ง

คุณลักษณะที่เกิดความประทับใจ ผู้ปกครองร้อยละ 70 กล่าวถึงเนื้อผ้านุ่มพิเศษ พบความถี่ของการพูดซ้ำ 18 ครั้ง และผู้ปกครองร้อยละ 20 กล่าวถึงการเคลื่อนไหวสะดวก พบความถี่ของการพูดซ้ำ 4 ครั้ง และผู้ปกครองร้อยละ 30 กล่าวถึงการรองรับการเจริญเติบโต พบความถี่ของการพูดซ้ำ 3 ครั้ง

ผลจากการตอบแบบสอบถาม

จากการตอบแบบสอบถามกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 100 คน พบว่าปัจจัยในการเลือกซื้อเสื้อผ้าเด็ก ประกอบไปด้วย 5 ปัจจัยหลัก ได้แก่ เนื้อผ้า สีสันและลวดลาย รูปแบบเสื้อผ้า ราคา และโอกาสในการสวมใส่ สอดคล้องกับหลักการออกแบบเสื้อผ้าเด็กของ จิตรพี ชวาลาวัณย์ ที่กล่าวว่าเด็กเป็นวัยที่ร่าเริง บริสุทธิ์ และสนุกที่จะทำกิจกรรมต่างๆ อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการออกแบบเสื้อผ้าสำหรับเด็กต้องคำนึงถึงพัฒนาการของเด็กเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความน่ารัก สวยงาม และความเหมาะสมกับเพศอีกด้วย (จิตรพี, 2556) ซึ่งผลที่ได้จากแบบสอบถามช่วยแสดงความต้องการของกลุ่มเป้าหมายให้ละเอียดและชัดเจนยิ่งขึ้น ผลแสดงดัง Table 2

Table 2 Factors in choosing hand-woven Ikat silk with natural dyes for girl's clothes

Factor	1st answer	(%)	2nd answer	(%)	3rd answer	(%)
Fabrics	Light wt.	63.2	Medium wt.	25.3	Heavy wt.	11.6
Fabric patterns	Cartoon	59.2	Animal	18.5	Flower	17.5
Colors	Pink	50	Light blue	25	Yellow	9
Clothing styles	Dress	50.5	Top and pants	29.3	Top and skirt	20.2
Prices	1,000-2,000 THB	57.1	2,000-3,000 THB	34.7	0-1,000 THB	5.1
Occasions to wear	Evening dress	92.9	Everyday clothes	90.9	Etc.	45.5

Note: * Shows only the top 3 answers

ด้านเนื้อผ้า กลุ่มตัวอย่างชื่นชอบเนื้อผ้าที่มีน้ำหนักปานกลางมากที่สุด (63.2%) ถัดมา ได้แก่ ผ้าที่มีน้ำหนักเบา (25.3%) และผ้าที่มีน้ำหนักมาก (11.6%) ตามลำดับ

ด้านสีสันและลวดลาย กลุ่มตัวอย่างต้องการผ้าไหมมัดหมี่ลวดลายการ์ตูนมากที่สุด (59.2%) ถัดมา ได้แก่ ลายสัตว์ (18.5%) และลายดอกไม้ (17.5%) ตามลำดับ และกลุ่มตัวอย่างชื่นชอบสีชมพูมากที่สุด (50%) ถัดมา ได้แก่ สีฟ้า (25%) และสีเหลือง (9%) ตามลำดับ

ด้านรูปแบบเสื้อผ้า กลุ่มตัวอย่างชื่นชอบชุดเดรสมากที่สุด (50.5%) ถัดมา ได้แก่ เสื้อและกางเกง (29.3%) และเสื้อและกระโปรง (20.2%) ตามลำดับ

ด้านราคา กลุ่มตัวอย่างมีความยินดีที่จะซื้อชุดผ้าไหมมัดหมี่ย้อมสีธรรมชาติในราคา 1,000-2,000 บาทมากที่สุด (57.1%) ถัดมา ได้แก่ ราคา 2,000-3,000 บาท (34.7%) และราคา 0–1,000 บาท (5.1%) ตามลำดับ

ด้านโอกาสในการสวมใส่ กลุ่มตัวอย่างคิดว่าผ้าไหมมัดหมี่ย้อมสีธรรมชาติเหมาะสมกับการนำไปตัดเย็บเป็นชุดราตรีมากที่สุด (92.9%) ถัดมา ได้แก่ ชุดไปรเวท (90.9%) และชุดอื่นๆ เช่น ชุดสำหรับการแสดง (45.5%) ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ของข้อมูลประชากรศาสตร์ด้านการศึกษาและพฤติกรรมการเลือกซื้อ แสดงดัง Table 3

Table 3 The correlation test of educational demographic data and purchasing behavior.

Education	Fabric weight			Total (%)
	Light wt.	Medium wt.	Heavy wt.	
Undergraduate	17.4	3.3	-	6.3
Bachelor's degree	78.3	75.4	54.5	73.7
Master's degree	-	21.3	36.4	17.9
Ph.D.	4.3	-	9.1	2.1
Total (%)	100	100	100	100

Note: * χ^2 = 20.763, Sig = 0.002

จากการทดสอบสมมติฐานด้านข้อมูลประชากรศาสตร์ด้านการศึกษาและพฤติกรรมการเลือกซื้อของกลุ่มตัวอย่าง พบว่า ระดับการศึกษาสัมพันธ์กับปัจจัยด้านเนื้อผ้าที่ชื่นชอบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 จากการเลือกเนื้อผ้าของกลุ่มตัวอย่างพบว่าผู้ปกครองที่มีการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาโทเลือกผ้าที่มีน้ำหนักปานกลางมากที่สุด

และพบความสัมพันธ์เกี่ยวกับข้อมูลประชากรศาสตร์ด้านอายุบุตรหญิงและพฤติกรรมการเลือกซื้อด้านรูปแบบเสื้อผ้าที่ชื่นชอบแสดงดัง Table 4

Table 4 The correlation test of children's age and favorite type of clothes

Children's age	Favorite type of clothes			Total (%)
	Dress	Top and pants	Top and skirt	
4	56	20.7	35	41.4
5	28	27.6	45	31.3
6	16	51.7	20	27.3
Total (%)	100	100	100	100

Note: * χ^2 = 15.769, Sig = 0.003

จากการทดสอบสมมติฐานด้านข้อมูลประชากรศาสตร์ด้านอายุบุตรหญิงและพฤติกรรมการเลือกซื้อด้านรูปแบบเสื้อผ้าที่ชื่นชอบของกลุ่มตัวอย่างพบว่า มีความสัมพันธ์กัน โดยบุตรหญิงอายุ 4 ปีชื่นชอบเดรสมากที่สุด บุตรหญิงอายุ 5 ปีชื่นชอบเสื้อและกระโปรงมากที่สุด และบุตรหญิงอายุ 6 ปีชื่นชอบเสื้อและกางเกงมากที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เนื่องจากเด็กมีพัฒนาการและเริ่มเรียนรู้การสวมใส่เสื้อผ้าด้วยตนเอง ดังนั้นเมื่อเติบโตขึ้น จะเลือกเสื้อผ้าที่มีความหลากหลายมากขึ้น ได้แก่ เสื้อกับกระโปรงและเสื้อกับกางเกง สอดคล้องกับพัฒนาการด้านร่างกายของเด็กปฐมวัยที่กล่าวว่าเด็กอายุ 4–6 ปีมีพัฒนาการด้านร่างกายที่เปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วและชัดเจน สามารถเรียนรู้และพัฒนาการใช้กล้ามเนื้อมัดเล็กทำกิจกรรมที่ซับซ้อนและมีความละเอียดมากขึ้น เช่น การติดกระดุม การผูกเชือกรองเท้า เป็นต้น (ชลกร, 2561)

ผลจากการคิดเชิงออกแบบ

ผลจากการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องจากด้านงานวิจัย ด้านการออกแบบเสื้อผ้าเด็ก ผู้เชี่ยวชาญด้านการทอผ้า และตัวแทนผู้ปกครอง ผ่านกระบวนการคิดเชิงออกแบบด้วยวิธีการระดมสมอง โดยการจดบันทึกทุกความคิดเห็นที่ทุกคนนำเสนอแนวทางแก้ปัญหาหรือสนองความต้องการ แล้วนำมาเลือกวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมด้วยการโหวต ได้ผลแสดงดัง Table 5

Table 5 Expert solution

Attribute	Problems and needs	Expert solution
Basic Attribute	Non-skin irritated	Mix other yarns to create a soft
		Using lining
		Using stitched seams that reduce irritation
Basic Attribute	Easy care	Dark fabric design
		Mix other yarns for easy care.
		Water repellant
Basic Attribute	Staining	How to wash label
		Using dyeing agent
Performance Attribute	Colors and patterns	Designed as a popular cartoon pattern
		Using bright colors
Performance Attribute	Comfortable to wear	Over size
		Mix other yarns to create good breathability
		Flexibility
Performance Attribute	Clothing style	Flared skirt dress design
		Fashion and Lifestyle
Delight Attribute	Super soft fabric	Veranda fabric
		Mix other yarns to create a soft and fluffy effect
Delight Attribute	Easy to move	Well-covered clothing
		Flexibility
Delight Attribute	Supported for growth	Using an elastic band to help adjust the size
		Over size
		Modular design

คุณลักษณะพื้นฐานในด้านการไม่ระคายเคืองผิวหนัง ผู้เชี่ยวชาญเสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรทอผสมเส้นด้ายชนิดอื่นเพื่อเพิ่มความนุ่มฟู หรือการใส่ผ้าซับในที่อ่อนโยนต่อผิวที่ด้านในของชุด นอกจากนี้ยังแนะนำให้ใช้ตะเข็บเย็บที่

ระคายเคืองน้อยที่สุด ด้านการดูแลรักษาง่าย ได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรออกแบบลายผ้าให้มีสีเข้มและทอผสมเส้นด้ายชนิดอื่นเพื่อให้ดูแลรักษาง่าย หากเป็นไปได้ควรตกแต่งสำเร็จผ้าสะท้อนน้ำด้วย ด้านสีไม่ตก ได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรจัดทำป้ายระบุวิธีการซักและควรใช้สารช่วยย้อม

คุณลักษณะที่เกิดความพึงพอใจในด้านสีสันและลวดลาย ผู้เชี่ยวชาญเสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรออกแบบเป็นลายการ์ตูนที่เป็นที่นิยมที่มีสีสันหลากหลาย ด้านความสวมใส่สบาย ได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรออกแบบเป็นชุดทรงหลวม และควรทอผสมเส้นด้ายชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติระบายอากาศได้ดี หรือควรเพิ่มความยืดหยุ่นของชุดเพื่อรองรับขนาดสรีระร่างกายของเด็ก ด้านรูปแบบเสื้อผ้าได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรออกแบบเป็นชุดเดรสตามแฟชั่นและไลฟ์สไตล์

คุณลักษณะที่เกิดความประทับใจในด้านเนื้อผ้านุ่มพิเศษ ผู้เชี่ยวชาญเสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรวางผ้าแนวเฉลียงในการตัดเย็บเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และควรทอผสมเส้นด้ายที่นุ่มฟู ด้านการเคลื่อนไหวสะดวก ได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าเสื้อผ้าควรปกปิดมิดชิดและยืดหยุ่น ด้านการรองรับการเจริญเติบโต ได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหาว่าควรใช้ยางยืดเข้ามาช่วยในการปรับเปลี่ยนขนาดชุด หรือควรออกแบบเป็นชุดทรงหลวม และออกแบบให้ชุดสามารถแยกชิ้นได้

ต้นแบบลวดลายผ้ามัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติ

ผลจากการศึกษาวิจัยที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติเพื่อผลิตเสื้อผ้าสำหรับเด็กหญิงปฐมวัยดังแสดงใน Figure 1

(A) (B) (C)

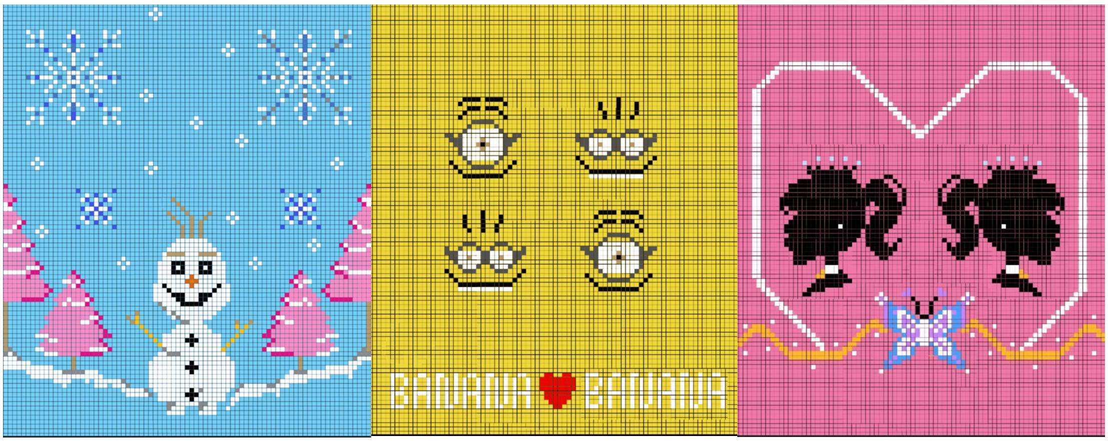


Figure 1 Hand-woven pattern designs: (A) Inspired by Frozen; (B) Inspired by Minions; and (C) Inspired by Barbie

ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาต้นแบบลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติเพื่อผลิตเสื้อผ้าสำหรับเด็กหญิงปฐมวัยตามความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย 3 แบบ โดยได้รับแรงบันดาลใจมาจากการ์ตูนเรื่องโฟรเซน มินเนี่ยน และบาร์บี้ ตามลำดับ ซึ่งเป็นลวดลายที่นำเอาองค์ประกอบสากลที่เกี่ยวข้องกับการ์ตูนเรื่องนั้นๆ มาจัดเรียงไว้ด้วยกัน และใช้สีที่กลุ่มเป้าหมายชื่นชอบ ได้แก่ สีชมพู สีฟ้า และสีเหลือง ในการออกแบบ จากผลการสอบถามพบว่ากลุ่มเป้าหมายชื่นชอบลวดลายที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากการ์ตูนเรื่องโฟรเซนมากที่สุด (67%) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยด้านความต้องการของกลุ่มเป้าหมายและผลวิจัยด้านคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ

สรุป

กลุ่มตัวอย่างมีปัญหาและความต้องการด้านคุณลักษณะพื้นฐานที่เกี่ยวกับชุดผ้าไหมมัดหมี่สำหรับเด็กหญิง ได้แก่ การไม่ระคายเคืองผิวหนัง การทำความสะอาดง่าย และการตกสีของเสื้อผ้า คุณลักษณะที่เกิดความพึงพอใจที่เกี่ยวกับชุดผ้าไหมมัดหมี่สำหรับเด็กหญิง ได้แก่ สีสันและลวดลาย ความสวมใส่สบาย และรูปแบบเสื้อผ้า คุณลักษณะที่เกิดความประทับใจที่เกี่ยวกับชุดผ้าไหมมัดหมี่สำหรับเด็กหญิง ได้แก่ เนื้อผ้านุ่มพิเศษ การเคลื่อนไหวสะดวก และการรองรับการเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยในการเลือกซื้อเสื้อผ้าเด็ก ประกอบไปด้วย 5 ปัจจัย ได้แก่ เนื้อผ้า สีสันและลวดลาย รูปแบบเสื้อผ้า ราคา และโอกาสในการสวมใส่ หลังจากการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องผ่านกระบวนการคิดเชิงออกแบบ เพื่อร่วมกันเสนอแนวทางแก้ปัญหาหรือสนองความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย โดยผู้วิจัยได้ร่วมออกแบบและพัฒนาลวดลายผ้าไหมมัดหมี่ทอมือย้อมสีธรรมชาติ ได้ข้อสรุปว่า ควรออกแบบและพัฒนาลวดลายผ้าไหมมัดหมี่เป็นลวดลายการ์ตูนได้รับแรงบันดาลใจมาจากการ์ตูนเรื่องโฟรเซน ใช้เส้นไหมมัดหมี่ที่ผ่านการย้อมด้วยสารช่วยย้อมเพื่อลดการตกสีที่มีสีสันหลากหลายให้ดูสดใส นำมาทอผสมกับเส้นด้ายอื่น เช่น เส้นด้ายฝ้าย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่นุ่มฟู และดูแลรักษาง่าย ตกแต่งสำเร็จผ้าสะท้อนน้ำเพื่อลดการเปื้อนสิ่งสกปรก ในขั้นตอนการตัดเย็บชุด ควรเป็นชุดเดรสทรงหลวมกระโปรงบานที่สามารถแยกชิ้นได้ โดยใช้ยางยืดเข้ามาช่วยในการปรับเปลี่ยนขนาดและมีตะเข็บเย็บน้อยที่สุด หรือใช้ผ้าซับในช่วยรองด้านในของชุด เพื่อลดการระคายเคือง และจัดทำป้ายจัดทำป้ายระบุวิธีการซักอย่างถูกต้อง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานจากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้มอบทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรุงเทพธุรกิจ. 2564. สนค. หนุนอัปเกรดผ้าไหมไทย ป้อนความต้องการของตลาดที่หลากหลาย. https://www.bangkokbiznews.com/news/955784, 21 สิงหาคม 2565

จิตรพี ชวาลาวัณย์. 2556. เสื้อผ้าเด็ก. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.

ชลกร แผลงมน. 2561. การพัฒนาแบบชุดบอดี้สูทเพื่อช่วยในการทรงตัวสำหรับเด็กสมองพิการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี. 2563. มาตรการส่งเสริมและสนับสนุนการใช้และสวมใส่ผ้าไทย. https://www.soc.go.th/wp-content/uploads/2020/09/v63_272.pdf, 24 ตุลาคม 2565

สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.). 2561. เสื้อผ้าเด็ก ตลาดที่เติบโตในอนาคต. https://www.sme.go.th/upload/mod_download/download-20190328081057.pdf, 16 สิงหาคม 2565

มะยุรีย์ พิทยาเสนีย์, พิชญาภา ยวงสร้อย. 2564. การคิดเชิงออกแบบ: ครูนวัตกรวิถีใหม่. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 10(2): 80–92.

นีรนาท เสนาจันทร์. 2564. การประกอบธุรกิจการผลิตผ้าไหมมัดหมี่ที่ประสบผลสำเร็จของกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรบ้านคึมมะอุ-สวนหม่อน ตำบลหนองหว้า อำเภอบัวลาย จังหวัดนครราชสีมา. วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 11: 183–193

Sauerwein, E., Bailom, F., Matzler, K., Hinterhuber, H. H. 1996. The kano model: How to delight your customers. International Working Seminar on Production Economics. 1996: 313–327

ความยืดหยุ่นชุมชนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กรณีศึกษาพื้นที่ทุ่งรับน้ำในอำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

Community resilience for climate changes: the case study in water-retention area in Lat Bua Luang District, Phra Nakhon Si Ayutthaya

ปาริฉัตร หงสประภาส

Parichat Hongsprabhas

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

E-mail address: parichat.h@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่เกษตรกรรมที่ได้รับผลกระทบจากภัยแล้งและน้ำท่วมขังในตำบลสิงหนาท ตำบลคลองพระยาบันลือ และตำบลพระยาบันลือ อำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยาระหว่างปี 2559–2565 เพื่อประเมินผลกระทบของแผนบรรเทาอุทกภัยในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างต่อชุมชนซึ่งประกอบอาชีพในภาคเกษตร พบว่า โครงการบรรเทาอุทกภัยขนาดใหญ่โดยวิธีธรรมชาติที่ภาครัฐได้ดำเนินการระบายน้ำจากชุมชนเมืองและเขตอุตสาหกรรมของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาทำให้พื้นที่ทุ่งรับน้ำมีจำนวนวันที่น้ำท่วมขังนานขึ้น อย่างไรก็ตามการปรับปรุงภูมิทัศน์และกิจกรรมเพาะปลูกของพื้นที่ในการทำเกษตรกรรมเชิงนิเวศตามแนวทางของโคก หนอง นา ช่วยควบคุมระดับน้ำในแปลงและลดความเสียหายจากการสูญเสียผลผลิตทางการเกษตรได้ กระนั้น ระดับนโยบายยังจำเป็นต้องพิจารณามาตรการบรรเทาผลกระทบเชิงสังคมและเศรษฐกิจของชุมชนในทุ่งรับน้ำเพิ่มเติม เนื่องจากวิถีชีวิตของราษฎรได้เปลี่ยนแปลงจากผลการดำเนินการภาครัฐ และสภาพภูมิอากาศโลกยังมีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงและมีความถี่มากขึ้นจนเป็นภัยคุกคามต่อระบบอาหารของประเทศ

คำสำคัญ: เกษตรกรรมเชิงนิเวศ, เกษตรทฤษฎีใหม่, เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน, ระบบอาหาร

Abstract

This study explores the changes in agricultural areas affected by drought and floods in Singhanat, Khlong Phraya Banlue, and Phraya Bunlue sub-districts, Phra Nakhon Si Ayutthaya between 2016 and 2022 to assess the impact of the National flood relief plan in the lower Chao Phraya basin on agricultural communities. Under the large-scale nature-based solutions (NBS), the authorities drain water from urban communities and industrial areas in Phra Nakhon Si Ayutthaya to the water-retention fields, resulting in longer water-logging days. However, improving the landscape and cultivating activities based on the sustainable agroecology approach of Khok Nong Na help control the water level and reduce the damage loss in the fields to some extent. Nonetheless, the policymakers must consider additional measures to mitigate the social and economic impacts on communities. The people’s livelihoods have changed because of government action, and the global climate is changing more severely and with greater frequency, threatening the country’s food systems.

Keywords: Agroecology, Food Systems, New Agricultural Theory, Sustainable development goals

คำนำ

การพัฒนาและปรับปรุงระบบการผลิตและการบริโภคอาหารของประชากรโลกตามเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals, SDGs) ของสหประชาชาติและประเทศสมาชิกรวมทั้งประเทศไทย ที่คำนึงถึงการบริหารจัดการระบบอาหาร (Food Systems) ที่มีประสิทธิภาพ จะช่วยขจัดความยากจน ความหิวโหย และภาวะทุพโภชนาการในทุกรูปแบบ รวมทั้งการทำให้ราษฎรมีสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี ส่งเสริมการพัฒนาและปรับปรุงสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนแบบองค์รวม ในการปรับปรุงระบบอาหารทั้งระบบเพื่อให้บรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศไทย จึงจำเป็นต้องทำการปฏิรูปการเกษตร ปรับเปลี่ยนสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตอาหารที่ดีต่อสุขภาพ ส่งเสริมการลดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศโลก ส่งเสริมให้ภาคเอกชนมีส่วนร่วมในการปรับเปลี่ยนระบบอาหาร และทำการประเมินต้นทุนที่แท้จริงในการผลิตอาหารซึ่งรวมถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อมและสังคมด้วย (Kennedy et al. 2021)

การประเมินผลการดำเนินการของประเทศไทยจากดัชนีชี้วัดความยั่งยืน (sustainability index) มีอิทธิพลต่ออุตสาหกรรมอาหารและธุรกิจอาหารเป็นอย่างมาก เนื่องจากธุรกิจและอุตสาหกรรมอาหารกำลังตกเป็นจำเลยในเรื่องความรับผิดชอบด้านสิ่งแวดล้อมและสังคม ดังนั้นอุตสาหกรรมอาหารจึงจำเป็นต้องสร้างความสัมพันธ์ที่ดีกับกลุ่มผู้มีส่วนได้เสียของธุรกิจ ไม่ว่าจะเป็นผู้ลงทุน ผู้ถือหุ้น พนักงาน ลูกค้า คู่ค้า ตลอดจนชุมชนเกษตรกรรมที่เกี่ยวข้องอยู่ในห่วงโซ่การผลิตอาหาร (Sandberg et al. 2022) ภายใต้เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนหรือ SDGs

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาภาคสนาม (field study) เบื้องต้น เพื่อประเมินแบบแผนการปรับเปลี่ยนกิจกรรมเพาะปลูกของชุมชนเกษตรในอำเภอลาดบัวหลวง ซึ่งเป็นแหล่งเกษตรกรรมหลักของพระนครศรีอยุธยาและผลิตสินค้าเกษตรให้แก่บริษัทส่งออกรวมทั้งธุรกิจอาหารในตลาดหลักทรัพย์ของประเทศไทย และได้รับผลกระทบทางกายภาพและการดำรงชีวิตในชุมชนจากการเป็นส่วนหนึ่งของทุ่งรับน้ำ (water-retention area) ภายใต้แผนการบรรเทาอุทกภัยลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างของประเทศ ผลการวิจัยนี้อาจนำมาพิจารณาประกอบการเสนอแนวทางเชิงนโยบายสนับสนุนการลงทุนในธุรกิจอุตสาหกรรมอาหารที่รับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม และเพิ่มแนวทางสร้างความยืดหยุ่นของชุมชนเกษตรกรรมต้นน้ำของอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมเกษตรโดยใช้เกษตรกรรมยั่งยืน (sustainable agriculture) ในการปรับเปลี่ยนระบบอาหารทั้งระบบ (Transformation of Food Systems)

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการวิจัยด้านพื้นที่ โดยศึกษาบริบทของชุมชนชายคลองพระยาบันลือในตำบลสิงหนาท ตำบลคลองพระยาบันลือ และตำบลพระยาบันลือ อำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และขอบเขตการวิจัยด้านช่วงเวลาที่บันทึกข้อมูลสภาพพื้นที่และทำการสัมภาษณ์ระหว่างพฤษภาคม 2559–พฤศจิกายน 2565 เกณฑ์กำหนดเวลาเริ่มจากผลกระทบจากปรากฏการณ์ El Niño-Southern Oscillation (ENSO) ในปี 2559 จนน้ำในคลองพระยาบันลือแห้งขอด และการเข้าสู่เหตุการณ์ La Niña ต่อเนื่องในปี 2560, 2561, 2564 และ 2565 โดยได้ดำเนินการวิจัยเชิงคุณภาพ (qualitative research) ทำการรวบรวมข้อมูลจากเอกสารปฐมภูมิ (primary sources) เช่น แผนพัฒนาจังหวัด มติคณะรัฐมนตรี มติคณะกรรมการนโยบายการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษ และเอกสารทุติยภูมิ (secondary sources) เช่น บทความวิจัยและบทความทางวิชาการ เพื่อประเมินบริบทของพื้นที่เกษตรกรรม นโยบายการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านเกษตรกรรม และการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างฝั่งตะวันตก ร่วมกับการสังเกตแบบมีส่วนร่วม (participant observation) โดยการสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการจากผู้ให้สัมภาษณ์ จำนวน 14 คนที่มีภูมิลำเนาในพื้นที่วิจัยและประสบกับอุทกภัยอย่างน้อย 4 ครั้งระหว่างพ.ศ. 2518 – 2565 (4 ทศวรรษ) เพื่อสังเกตแนวคิดของเกษตรกรในพื้นที่ที่ผ่านภัยธรรมชาติก่อนและภายหลังโครงการบรรเทาอุทกภัยขนาดใหญ่ที่ภาครัฐดำเนินการ และนำเสนอแบบการ

วิเคราะห์เชิงพรรณนา (analytical description) ในประเด็นการเปลี่ยนแปลงวิถีชีวิต การผลิต และการสร้างเครือข่ายของชุมชน เพื่อประเมินความยืดหยุ่นของชุมชน

นอกจากนั้นแล้ว ยังได้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมและผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนและความชื้นในพื้นที่ระหว่างปี 2554–2563 ที่ได้รับอนุเคราะห์ข้อมูลจาก Restor.eco platform (Restor Foundation, Switzerland) และรายงานเป็นผลผลิตคาร์บอนปฐมภูมิสุทธิของพืชต่อปี (net primary productivity, tonnes of carbon/year) ซึ่งเป็นค่าประมาณของผลผลิตคาร์บอนขั้นต้นตามข้อมูลการสะท้อนแสงที่ได้จากดาวเทียม หักด้วยค่าประมาณจากการหายใจของพืช (ไม่ใช่ค่าการดูดซับคาร์บอนสุทธิของระบบนิเวศทั้งหมด) และการคายระเหยน้ำ (evapotranspiration, kg of water/m^2) จากการประเมินปริมาณน้ำที่ระเหยจากพื้นที่ร่วมกับการคายระเหยน้ำของพืชจากข้อมูลการสะท้อนแสงที่ได้มาจากดาวเทียม โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ของชุดข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยที่ 500 ม. x 500 ม.

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนในพืชและการคายระเหยน้ำในพื้นที่ขนาด 8 เฮกตาร์ (ประมาณ 50 ไร่) ของพื้นที่ที่ดำเนินกิจกรรมเพาะปลูกแตกต่างกันตั้งแต่ปี 2559 ได้แก่: (1) KNN field เป็นพื้นที่ที่ได้มีการปรับปรุงภูมิทัศน์โดยหลักการของโคก หนอง นาและใช้หลักการของเกษตรกรรมเชิงนิเวศ (agroecology) ในการจัดการเพาะปลูก; (2) Rice field หมายถึง พื้นที่ทำนาปีละ 3 ครั้ง; และ (3) Eucalyptus field หมายถึง พื้นที่ปลูกป่ายูคาลิปตัส ระยะเจริญเติบโตก่อนรอบตัดฟัน เพื่อประเมินผลกระทบของช่วงเวลาตั้งแต่ปีมหาอุทกภัย 2554 ถึงปี 2564 กับการแทรกแซงกิจกรรมเพาะปลูกในแปลง KNN ซึ่งเริ่มในปี 2559 โดยใช้ Two-factor analysis ประเมินด้วย GraphPad PRISM software version 9.0 (GraphPad Software, LLC., USA) อย่างไรก็ตาม ชุดข้อมูลที่รายงานนี้เป็นการประมาณด้วยอัลกอริทึม (algorithm) ของ Restor.eco platform แทนการวัดปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้โดยตรงเนื่องจากต้องใช้ข้อมูลย้อนหลังถึงปี 2554

ผลและวิจารณ์

บริบทของพระนครศรีอยุธยาในการเป็นทุ่งรับน้ำภายใต้แผนบรรเทาอุทกภัยลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

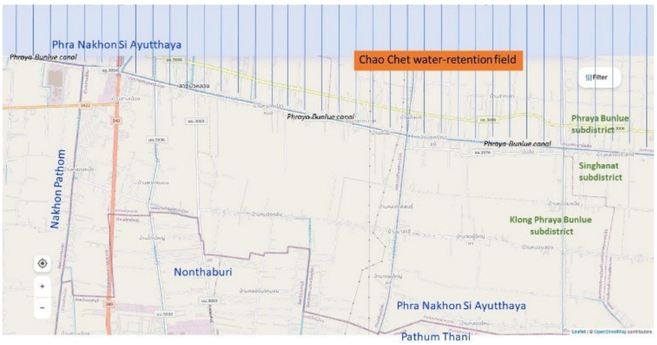
พระนครศรีอยุธยาเป็นจังหวัดที่มีระบบชลประทานที่เอื้อต่อการบริหารจัดการน้ำและถูกกำหนดเป็นพื้นที่ทุ่งรับน้ำตามแผนบรรเทาอุทกภัยในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างภายใต้แผนบรรเทาอุทกภัยที่เป็นโครงการขนาดใหญ่โดยวิธีธรรมชาติ (Nature-based solutions, NBS) (ภัทราภรณ์และกีรติการ, 2560) ภายหลังมหาอุทกภัย (megaflood) ในปี 2554 ต่อเนื่องจนถึงต้นปี 2555 การบริหารจัดการน้ำภายใต้แผนการบรรเทาอุทกภัยกำหนดพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางในจังหวัดนครสวรรค์ตอนล่าง ชัยนาท สิงห์บุรี ลพบุรี สระบุรี พระนครศรีอยุธยา สุพรรณบุรี นนทบุรี ปทุมธานี นครนายก ฉะเชิงเทรา และกรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ทุ่งรับน้ำทั้งฝั่งตะวันตกและตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา รวม 12 ทุ่งมีพื้นที่รวม 1.15 ล้านไร่ สามารถตัดยอดน้ำได้ 1,500 ล้านลูกบาศก์เมตร

พื้นที่ทุ่งรับน้ำหลักของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยาครอบคลุมอำเภอบางบาล อำเภอผักไห่ อำเภอเสนา และอำเภอบางไทร โดยมีคลองชลประทานแนวขวางที่เชื่อมกับระบบชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนล่างที่สำคัญ ได้แก่ คลองเจ้าเจ็ดบางยี่หนเชื่อมแม่น้ำน้อยในอำเภอผักไห่กับแม่น้ำสุพรรณในจังหวัดสุพรรณบุรี และคลองพระยาบันลือเชื่อมแม่น้ำเจ้าพระยาในอำเภอบางไทรกับแม่น้ำท่าจีนในจังหวัดสุพรรณบุรี (ฉลองและชัยวัฒน์, 2536) แสดงใน Fig.1A ภายใต้แผนบรรเทาอุทกภัยลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง คลองพระยาบันลือรับผิดชอบในการควบคุมการระบายน้ำของทุ่งรับน้ำเจ้าเจ็ด (พื้นที่ระหว่างคลองเจ้าเจ็ดบางยี่หนกับคลองพระยาบันลือฝั่งทิศเหนือ) กับทุ่งรับน้ำพระยาบันลือ (พื้นที่ระหว่างคลองพระยาบันลือฝั่งทิศใต้กับคลองพระพิมลในอำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี)

(ภัทราภรณ์และกีรติการ, 2560) คลองพระยาบันลือจึงเป็นคลองใต้สุดของพระนครศรีอยุธยาในการควบคุมระดับน้ำก่อนการระบายผ่านประตูน้ำในอำเภอลาดบัวหลวงของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาเข้าสู่จังหวัดนนทบุรี ปทุมธานี กรุงเทพมหานคร และออกสู่อ่าวไทยที่สมุทรสาคร

แม้ว่าโครงการบรรเทาอุทกภัยโดยวิธีธรรมชาติจะช่วยบริหารจัดการน้ำเพื่อบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างได้อย่างมีประสิทธิภาพในการลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจของเขตเมืองและนิคมอุตสาหกรรมของจังหวัดในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาเมื่อเปรียบเทียบกับปี 2554 ระดับความสูงและระยะเวลาที่น้ำท่วมขังทำให้ราษฎรในพื้นที่ทุ่งรับน้ำและนอกแนวคันกั้นน้ำมีวิถีชีวิตที่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมาก เนื่องจากมีระยะเวลาที่น้ำค้างอยู่ในทุ่งรับน้ำนานขึ้นจากวิถีชีวิตเดิมก่อนโครงการบรรเทาอุทกภัยขนาดใหญ่และอาจยาวนานถึง 3 เดือน เนื่องจากน้ำยังคงขังอยู่จนถึงธันวาคม การบริหารจัดการพนังกั้นน้ำระหว่างการระบายน้ำระหว่างแม่น้ำท่าจีนกับแม่น้ำเจ้าพระยาผ่านคลองพระยาบันลือบริเวณอำเภอลาดบัวหลวงระหว่างเดือนตุลาคมและพฤศจิกายนซึ่งน้ำในคลองสูงกว่าระดับถนนทั้งในปี 2564 และ 2565 กรมชลประทานได้ดำเนินการการเสริมความแข็งแรงของพนังกั้นน้ำโดยใช้คันดินประมาณเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงเวลาที่น้ำระบายเข้าทุ่งเจ้าเจ็ด (Fig.2B) ในกรณีที่น้ำจากคลองพระยาบันลือสูงกว่าระดับถนนและรั่วซึมเข้าชุมชน ซึ่งมักจะเกิดขึ้นช่วงเดือนตุลาคมจนถึงต้นเดือนธันวาคม องค์การบริหารส่วนตำบลได้จัดสรรงบประมาณในการทำกระสอบทรายและค่าน้ำมันเชื้อเพลิงในการสูบน้ำออกเพื่อทางสัญจรภายในชุมชน (ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ใหญ่บ้านและผู้นำชุมชนระหว่างตุลาคมถึงธันวาคม 2565)

(A)



(B)

Fig.1 Chao Chet water-retention area under the NBS projects for flood mitigation during flood relief procedure in October and November: (A) transverse canal Phraya Bunlue diverting the water between Chao Phraya River and Tha Chin River; (B) dike reinforcement using soil. The photo was taken on 6 November 2021.

ในการเยียวยาผู้ประสบอุทกภัยในปี 2564 และ 2565 ซึ่งเหตุการณ์ลานีญามีความรุนแรงและอุทกภัยที่เกิดขึ้นมีผลกระทบสูงทั่วประเทศ คณะรัฐมนตรีมีมติอนุมัติงบประมาณสำหรับเขตพื้นที่ประสบสาธารณภัยในช่วงฤดูฝน โดยกำหนดระยะเวลาที่เกิดสาธารณภัย หลักเกณฑ์ เงื่อนไข และวิธีการจ่ายเงินช่วยเหลือ สำหรับกรณีอุทกภัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อที่อยู่อาศัย เช่น น้ำท่วมโดยฉับพลัน น้ำหลาก น้ำล้นตลิ่ง รวมถึงผลจากการระบายน้ำที่ทำให้ราษฎรไม่สามารถดำรงชีวิตได้ โดยกระทรวงมหาดไทยจะจ่ายเงินช่วยเหลือปีละหนึ่งครั้งเมื่อผ่านการตรวจสอบโดยผู้ใหญ่บ้านผู้บริหารท้องถิ่น ร่วมกับผู้นำชุมชน ตามจำนวนวันที่ถูกน้ำท่วมในช่วงเวลาที่ประกาศ สำหรับเกษตรกรที่ได้ขึ้นทะเบียนเกษตรกร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์จะดำเนินการช่วยเหลือเป็นเงินสำหรับพื้นที่เพาะปลูกที่เสียหายจนไม่สามารถฟื้นฟูหรือเยียวยาให้กลับสู่สภาพเดิมตามพื้นที่เพาะปลูก ประมง และปศุสัตว์ที่เสียหายจริง โดยกำหนดพื้นที่เกษตรกรรมสูงสุดที่จะชดเชยและจำนวนเงินชดเชย ซึ่งขึ้นกับชนิดของพืชหรือสัตว์ที่ได้รับความเสียหาย แต่ถึงกระนั้น หลักเกณฑ์ระยะเวลาที่

เกิดสาธารณภัยและมาตรการการช่วยเหลือทางการเงินในแต่ละปียังคงมีความแตกต่างกันและน้อยกว่าค่าซ่อมแซมความเสียหายจริง (ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ใหญ่บ้านและผู้นำชุมชนระหว่างตุลาคมถึงพฤศจิกายน 2565)

ผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่ามาตรการช่วยเหลือของรัฐที่ได้ดำเนินการอยู่ในช่วงระยะเวลาสองปีของการระบายน้ำเข้าทุ่งรับน้ำด้านทิศตะวันตกของพระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นที่ดินส่วนบุคคลในการทำเกษตรกรรมโดยเกษตรกรเจ้าของพื้นที่รายย่อย หรือเกษตรกรผู้เช่าพื้นที่ ยังไม่ได้รวมแผนความช่วยเหลือในการจัดการระบายน้ำออกจากทุ่งเข้าสู่ระบบชลประทานหลักที่จะผลักดันน้ำให้ออกสู่แม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำท่าจีนหลังพ้นกำหนดช่วงฤดูฝนเดือนตุลาคมตามที่ประกาศพื้นที่สาธารณภัย ทำให้ระยะเวลาที่น้ำท่วมขังตามบ้านเรือนที่อยู่อาศัยและทางสัญจรนานกว่าวิถีชีวิตปกติ นอกจากนั้นเกษตรกรเจ้าของพื้นที่ในทุ่งรับน้ำ ยังต้องรับภาระค่าใช้จ่ายในสูบน้ำส่วนเกินออกจากพื้นที่ทำเกษตรกรรมเข้าสู่ระบบชลประทานหลักเพื่อเตรียมพื้นที่ในการทำนาปรังในเดือนธันวาคมก่อนที่จะเสียโอกาสในการมีรายได้ไปหนึ่งรอบของการเพาะปลูกข้าวนาปรังในพื้นที่ชลประทาน

ภูมิหลังและความยืดหยุ่นของชุมชนเกษตรกรรมต่อภัยแล้งและน้ำท่วมในตำบลสิงหนาท ตำบลคลองพระยาบันลือ และตำบลพระยาบันลือ อำเภอลาดบัวหลวง

กลางปีพ.ศ.2558 จนถึงต้นปี 2559 เป็นช่วงที่เกิดเหตุการณ์ ENSO ในประเทศไทย ถนนเลียบคันคลองพระยาบันลือขนาดกว้าง 8 เมตร ซึ่งตั้งอยู่บริเวณหมู่ 3 ตำบลสิงหนาท อำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เกิดการทรุดตัวเป็นแนวยาวกว่า 80 เมตร และลึกประมาณ 3 เมตร (ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้นำชุมชนและเกษตรกรในเดือนพฤษภาคม 2559) เกษตรกรไม่สามารถทำนาได้ 2 รอบการเพาะปลูกในปี 2559 ภายใต้ภัยแล้งเกษตรกรในพื้นที่อำเภอลาดบัวหลวงได้การปรับเปลี่ยนวิธีการทำเกษตรและมีการรวมกลุ่มเพื่อรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ยกตัวอย่างเช่น การปลูกเมลอนของเกษตรกรเพื่อลดความเสี่ยงจากการทำนาเนื่องจากเมลอนเป็นพืชที่ใช้น้ำน้อย เกษตรกรสามารถปลูกเมลอนทั้งแบบมีโรงเรือนมิดชิดและแบบไม่มีโรงเรือน มีการให้น้ำแบบระบบน้ำหยดตั้งแต่ปี 2558 – 2559 (ณัฐวุฒิและพหลศักดิ์, 2560) นอกจากนั้นเกษตรกรในตำบลสิงหนาทยังมีการรวมตัวจัดตั้งกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพื่อปลูกผักปลอดภัยภายใต้มาตรฐาน Good Agricultural Practice (GAP) รวบรวมผลผลิตและจำหน่ายบริษัทผู้ส่งออก (ดุษฎี, 2558) ซึ่งยังคงดำเนินการอยู่ในปัจจุบันในรูปแบบของเกษตรแปลงใหญ่ (clustered farm) และการแปรรูปเป็นน้ำพริกแกง (ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เกษตรกรระหว่างพฤศจิกายน 2565)

พื้นที่เกษตรกรรมของพระนครศรีอยุธยา 883,024 ไร่นั้น มีพื้นที่ที่ได้รับการรับรองมาตรฐานสินค้าปลอดภัยประเภท GAP รวม 2,297.75 ไร่ ด้านประมงพื้นที่ 3,012.29 ตารางเมตร และด้านปศุสัตว์ จำนวน 79 ฟาร์ม มีพื้นที่ทำการเกษตรอินทรีย์ 37 ไร่ ที่ตำบลคลองพระยาบันลือ อำเภอลาดบัวหลวงซึ่งเป็นแปลงเดียวของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่ได้รับการรับรองมาตรฐานอินทรีย์ มกษ.9000 เล่ม 1–2552 กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Organic Thailand) (สำนักงานจังหวัดพระนครศรีอยุธยา, 2564)

ชุมชนเกษตรกรรมในตำบลสิงหนาท ตำบลคลองพระยาบันลือ และตำบลพระยาบันลือได้สะสมและพัฒนาความเข้มแข็งของชุมชนเพื่อความอยู่รอด ปรับแผนการเพาะปลูก ปรับเปลี่ยนกิจกรรมเพาะปลูกเข้าสู่เกษตรกรรมยั่งยืนและมีการรวมกลุ่มในพื้นที่ที่ต้องเผชิญทั้งฝนแล้งและน้ำท่วมจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกในช่วง 6 ปีที่ผ่านมา รวมทั้งรับมือจากผลกระทบจากโครงการบรรเทาอุทกภัยลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างของภาครัฐ ความเข้มแข็งและความยืดหยุ่นของเกษตรกรในพื้นที่เกิดจากแนวคิดและความต้องการของชุมชนเป็นหลัก และได้รับการสนับสนุนจากองค์การปกครองส่วนท้องถิ่นในการสนับสนุนกลุ่มอาชีพและวิสาหกิจชุมชน รวมทั้งเมล็ดพันธุ์ แนวทางในการอารักขาพืช การฟื้นฟูไม้ผลหลังน้ำท่วม การผลิตและการใช้สารชีวภัณฑ์ในการปรับปรุงดิน กำจัดแมลงและโรคพืช การฝึกอบรมด้านวิชาการ

และการสร้างเครือข่ายของเกษตรกรร่วมกับฝ่ายวิชาการจากสำนักงานเกษตรอำเภอลาดบัวหลวงและสำนักงานเกษตรจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เกษตรกร ปี 2564 และ 2565)

เกษตรกรรมยั่งยืนและการประเมินประสิทธิผลของเกษตรกรรมเชิงนิเวศ

ในประเทศไทย เกษตรกรรมยั่งยืน (sustainable agriculture) เป็นทางเลือกในการดำรงชีวิตและประกอบอาชีพของเกษตรกรรายย่อยตามศักยภาพและความเหมาะสมของสภาพแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ ร่วมกับการตัดสินใจเลือกประเภทของการทำเกษตรกรรมยั่งยืนตามฐานความรู้ ภูมิปัญญา และการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ร่วมกันของเกษตรกร ภาครัฐได้ทำการกำหนดนโยบายและโครงการสนับสนุนให้มีการปรับเปลี่ยนการทำเกษตรกรรมแบบดั้งเดิมโดยใช้วิถีเกษตรกรรมยั่งยืนในการพัฒนาท้องถิ่นทั้งในระดับจังหวัดและระดับประเทศ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการผลักดันด้านความปลอดภัยของสินค้าเกษตรและการเพิ่มผลิตภัณฑ์มวลรวมในสาขาเกษตร

จากการสำรวจพื้นที่และประมวลการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศในพื้นที่ของเกษตรกรในตำบลสิงหนาท ซึ่งเริ่มมีการจัดการพื้นที่โดยใช้หลักการตามแนวเกษตรทฤษฎีใหม่ (new theory agriculture) ที่พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตรได้พระราชทานแนวทางในการจัดการภูมิทัศน์และสัดส่วนพื้นที่โดยให้มีแหล่งเก็บน้ำ: นาข้าว: ไม้ยืนต้น: ที่อยู่อาศัยและปศุสัตว์ 30:30:30:10 ร่วมกับการหยุดใช้สารเคมีเพื่อฟื้นฟูคุณภาพดินและน้ำและการปรับภูมิทัศน์ตามวิถีเกษตรอินทรีย์ (KNN field) จากในพื้นที่ที่เคยทำนาปีละ 3 ครั้ง (Rice field) หรือปลูกป่ายูคาลิปตัสเชิงเดี่ยว (Eucalyptus field) โดยใช้ปุ๋ยเคมีและสารเคมีกำจัดศัตรูพืชและไม่มีการปลูกพืชหมุนเวียน แสดงใน Fig.2A พบว่า ในระยะเวลา 6 ปีตั้งแต่ปี 2559 (ค.ศ.2016) จนถึงปี 2564 (ค.ศ.2021) เกษตรกรได้เลือกปลูกพืชที่มีความเข้ากันได้ ทนน้ำท่วมขัง และทนแล้ง ทั้งที่เป็นไม้เศรษฐกิจและไม้ผลบนโคกและคันสวน เช่น จามจุรี ทองหลางลาย ประดู่ป่า ขี้เหล็ก พะยูง ชิงชัน มะกล่ำต้น มะฮอกกานี ชมพูพรรณทิพย์ สะเดา อินทนิลน้ำ เสลา ยางเหียง ยางนา ไผ่กิมซุง ไผ่รวกหว้า พิลังกาสา มะขาม มะขามป้อม มะม่วงแก้วขมิ้น มะม่วงอกร่อง มะม่วงน้ำดอกไม้ ขนุนทองประเสริฐ ขนุนทวายปีเดียว ขนุนแดงสุริยา กล้วยน้ำว้า กล้วยหอมคาเวนดิช กล้วยหอมทอง กล้วยเล็บมือนาง สละอินโด มะปราง มะกรูด (Table 1) เกษตรกรเริ่มมีรายได้จากกล้วยในปีที่ 2 และการปรับปรุงภูมิทัศน์ตามแนวเกษตรทฤษฎีใหม่ช่วยให้เกษตรกรมีน้ำฝนขังไว้ในทุ่งสำหรับหมุนเวียนระหว่างรอบการทำนาปรังตามวิถีเกษตรอินทรีย์

ความหลากหลายทางชีวภาพ (biodiversity) ในพื้นที่ KNN Field มีมากขึ้น สังเกตจากการปรากฏของพืชดั้งเดิมในพื้นที่ เช่น ผักแว่น เห็ดตับเต่า เพราะสภาพแวดล้อม ดิน และน้ำ มีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้นในปีที่ 6 ของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมเพาะปลูก อย่างไรก็ตามการสะสมคาร์บอนในพืช (Fig.2B) และการคายระเหยน้ำของพืช (Fig.2C) ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกในแต่ละปี ($p < 0.05$) โดยที่การแทรกแซงกิจกรรมเพาะปลูกด้วยวิถีเกษตรกรรมธรรมชาติในแปลง KNN Field ตั้งแต่ปี 2559 (ค.ศ. 2016) ยังไม่เห็นผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) อาจเกิดจากการที่ไม้ป่าเศรษฐกิจยังมีอายุน้อย

การสนับสนุนงบประมาณปรับปรุงภูมิทัศน์จากภาครัฐผ่านโครงการโคก หนอง นา ซึ่งเป็นโครงการเงินกู้เพื่อฟื้นฟูเศรษฐกิจและสังคมที่ได้รับผลกระทบจากสถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ระหว่างปีงบประมาณ 2563 ถึง 2565 รับผิดชอบโดยกรมพัฒนาชุมชน กระทรวงมหาดไทยในการสร้างกลุ่มแกนนำขับเคลื่อน โดยการน้อมนำปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงและเกษตรทฤษฎีใหม่ในการพัฒนาคุณภาพชีวิตของชุมชน อาจช่วยขยายผลในการทำเกษตรกรรมยั่งยืนให้ก้าวกระโดด กระนั้น ผู้วิจัยมีความเห็นว่า มหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยยังสามารถมีบทบาทในการเพิ่มขีดความสามารถของเกษตรกรในระบบอาหารท้องถิ่นที่ใช้เกษตรกรรมเชิงนิเวศดังกล่าว ภายหลังการเก็บเกี่ยวพืชผล

ทางการเกษตรเพื่อเสริมสร้างความเข้มแข็งของชุมชนเกษตรกรรมต่อไปโดยการสร้างมูลค่าเพิ่มของสินค้าเกษตร เช่น การรักษาความสดใหม่ของผลผลิต การจัดการห่วงโซ่ความเย็นและการบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพ การแปรรูปอาหารในชุมชนโดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละชุมชนหรือตำบลสำหรับตลาดสีเขียว (green market) มุ่งเน้นความปลอดภัยและการตรวจสอบย้อนกลับของสินค้าเกษตรและอาหาร เป็นต้น

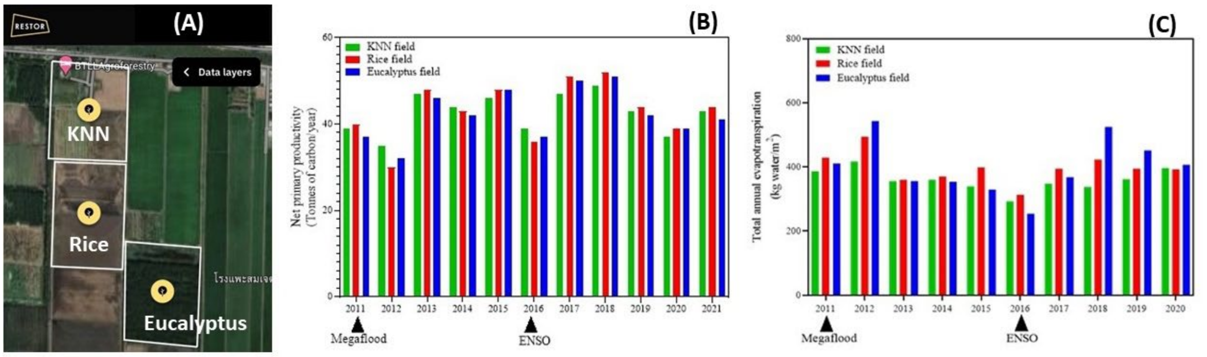


Fig. 2 (A) The satellite image of KNN, Rice, and Eucalyptus fields taken on 10 January 2021; (B) net primary carbon productivity and (C) evapotranspiration in each field. Geospatial data were obtained from Restor.eco platform.

Table 1 Plant biodiversity in the KNN field (last explored in November 2022)

Cultivated woody trees: *Samanea saman(Jacq.) Merr., Erythrina variegata Linn., Pterocarpus macrocarpus, Senna siamea, Dalbergia cochinchinensis, Dalbergia oliveri, Adenanthera pavonine, Swietenia macrophylla, Tabebuia rosea, Azadirachta indica, Lagerstroemia speciosa (L.) Pers, Lagerstroemia loudonii, Dipterocarpus obtusifolius, Dipterocarpus alatus*
Cultivated fruit trees: *Tamarindus indica, Phyllanthus emblica, Mangifera indica, Artocarpus heterophyllus, Musa spp. , Bambusa spp. , Salacca magnifica, Syzygium cumini, Bouea macrophylla, Citrus hystrix, Ardisia polycephala (Wall)*
Cultivate field crops, vegetables and medicinal plants: *Talinum paniculatum(Jacq.) Gaertn, Dioscorea spp., Clitroria ternatea, Kaempferia parviflora, Curcuma longa L., Zingiber montanum, Hibiscus sabdariffa, Diplazium esculentum, Ipomoea batatas, Pennisetum purpureum, Cymbopogon citratus, Nelumbo nucifera*
Local weeds: *Sesbania javanica, Ipomoea aquatica Forssk, Neptunia oleracea, Monochoria hastata (L.) Solms., Merremia hederacea, Passiflora foetida, Alternanthera sessilis, Pistia stratiotes, Cleome rutidosperma, Gymnopetalum scabrum, Euphorbia prostrata, Macroptilium lathyroides, Leucaena leucocephala, Ludwigia octovalvis, Brachiaria reptans (Linn.) Gard et Hubb., Brachiaria mutica, Typha angustifolia, Arundo donax*
Species observed in the KNN field but not in the original rice field or eucalyptus field for over 10 years: *Marsilea crenata, Thaeogyroporus porentosus*

Note: *Oryza sativa* was harvested in September 2022 before the field was filled up with floodwater

สรุป

งานวิจัยนี้พบว่าชุมชนเกษตรกรรมในอำเภอลาดบัวหลวงมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนการทำเกษตรเป็นเกษตรกรรมยั่งยืน ด้วยการประสานงานระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในระบบอาหารท้องถิ่น ได้แก่ เกษตรกร ชุมชน ผู้นำชุมชน ผู้นำเกษตรกร ปราชญ์ชาวบ้าน หมอดินอาสา องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น และเจ้าหน้าที่ระดับปฏิบัติของภาครัฐในการส่งเสริมการเกษตรและพัฒนาชุมชน จากการแทรกแซงระดับนโยบายและและโครงการของภาครัฐและความร่วมมือกับองค์กรและมูลนิธิเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม การเชื่อมโยงระบบอาหารท้องถิ่นกับธุรกิจและอุตสาหกรรมอาหารของประเทศยังต้องได้รับการพัฒนาหรือแทรกแซงในระดับนโยบายเพิ่มเติม เพื่อกระตุ้นการลงทุนและการระดมทุนในตลาด

หลักทรัพย์ของธุรกิจและอุตสาหกรรมอาหารที่ใช้แนวคิดด้านสิ่งแวดล้อม-สังคม-การกำกับดูแลของธุรกิจ (Environment-Social-Governance, ESG model) ในการบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนที่มากขึ้นกว่าปัจจุบันต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอบคุณผู้นำชุมชน ผู้ใหญ่บ้าน คณาจารย์โรงเรียนสังกัด สพฐ. ในตำบลสิงหนาทและตำบลคลองพระยาบันลือ เจ้าของที่ดิน และเกษตรกรที่ได้ให้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับความเป็นมาของพื้นที่และวิถีชีวิตของราษฎรในตำบลพระยาบันลือ ตำบลสิงหนาท และตำบลคลองพระยาบันลือในการให้สัมภาษณ์ ขอบคุณ Dr. Phillip G. Kodela จาก Australian Biological Resources Study (ABRS), Parks Australia Division, Department of Agriculture, Water and the Environment, Australian National Botanic Gardens ประเทศออสเตรเลีย ในการระบุชนิดวัชพืชที่พบในปี 2562 และ Restor.eco platform (Restor Foundation, Switzerland) สำหรับ geospatial monitoring data และทุนสนับสนุนค่าเดินทางกรุงเทพ – อำเภอลาดบัวหลวง ในปี 2559 จากโครงการวิจัยเรื่อง การใช้ประโยชน์ด้านสุขภาพในการขับเคลื่อนการเพิ่มมูลค่าตลอดห่วงโซ่อุตสาหกรรมข้าวและผลิตภัณฑ์ (พ.ศ. 2558–2559) ภายใต้โครงการร่วมกองทุนนิวตัน – สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่เป็นแรงบันดาลใจในการศึกษาต่อเนื่องนี้

เอกสารอ้างอิง

ฉลอง เกิดพิทักษ์, ชัยวัฒน์ ขยันการนาวี 2536. การศึกษาการใช้น้ำโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนล่าง วิศวกรรมสาร มก. 20: 33–50.

ณัฐวุฒิ จั่นทอง, พหลศักดิ์ คะทัศน์ 2560. การยอมรับการปลูกเมลอนสู้ภัยแล้งของเกษตรกรในอำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา วารสารเกษตร. 33(3): 405–414.

ดุษฎี พรหมทัต. 2558. พฤติกรรมการผลิตผักปลอดภัยของเกษตรกร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา วารสารวิจัยสหวิทยาการไทย. 10: 9–16

ภัทราภรณ์ เมฆพฤกษาวงศ์, กีรติการ นาคีสินธ์ 2560. แผนการบรรเทาอุทกภัยพื้นที่เจ้าพระยาตอนล่าง. ใน The 11th THAICID National Symposium: Innovative and Sustainable Agri-water Management: Alternative Strategies for Irrigation Infrastructure Development 20 มิถุนายน 2561 ณ โรงแรมริชมอนด์ จังหวัดนนทบุรี. หน้า 1–11. https://www.rid.go.th/thaicid/_5_article/11symposium/article-01.pdf

สำนักงานจังหวัดพระนครศรีอยุธยา 2564. แผนพัฒนาจังหวัดพระนครศรีอยุธยา พ.ศ.2566–2570. 304 หน้า http://www.ayutthaya.go.th/strategic/FileData/pdf/new_280322110057.pdf

Kennedy, E., Webb, P., Block, S. A., Griffin, T., Mozaffarian, D. Kyte, R. 2021. Transforming Food Systems: The missing pieces needed to make them work. Cur. Dev. Nutr. 5. doi.org/10.1093/cdn/nzaa177

Sandberg, H., Alnoor, A., Tiberius, V. 2022. Environmental, social, and governance ratings and financial performance: Evidence from the European food industry. Bus. Strat. Env: 1–19. doi.org/10.1002/bse.3259

ผลของผงใบกัญชงพันธุ์ Charlotte's Angel (*Cannabis sativa* L.subsp. *sativa*) ต่อคุณภาพขนมชั้น

Effect of hemp leaf powder of Charlotte's Angel (*Cannabis sativa* L.subsp. *sativa*) on the qualities of Khanom Chan

ณิชามาส เกียรติพรโอภาส[a], **กมลวรรณ แจ้งชัด**[a,*], **อนุวัตร แจ้งชัด**[a], **ธานี ศรีวงศ์ชัย**[b]

Nichamas Kiarttiporn-opas[a], Kamolwan Jangchud[a,*], Anuvat Jangchud[a], Tanee Sreewongchai[b]

[a]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of product development, Faculty of Agroindustry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagikwj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ใบกัญชงมีองค์ประกอบสำคัญที่สามารถนำมาเป็นส่วนผสมในอาหารเพื่อเพิ่มคุณภาพทางโภชนาการ เช่น โปรตีน ใยอาหาร และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของส่วนประกอบของกัญชงพันธุ์ Charlotte's Angel และศึกษาผลของผงใบกัญชงต่อคุณภาพทางกาย เคมี และประสาทสัมผัสของขนมชั้น จากการศึกษาพบว่าใบกัญชงแห้งมีโปรตีนร้อยละ 23.67 และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 16.90 mg GAE/g มีค่าความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP มากกว่าในรากและลำต้น จากผลของปริมาณผงใบกัญชงที่ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 ต่อคุณภาพขนมชั้น พบว่าเมื่อปริมาณผงใบกัญชงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนมชั้นมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และค่าการยึดเกาะพื้นผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากการปรับปรุงสูตร พบว่าปริมาณผงใบกัญชงที่เหมาะสมสำหรับการทำขนมชั้น คือ ร้อยละ 0.4 ขนมชั้นมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 21.23 mg GAE/ตัวอย่าง 100 กรัม สูงกว่าขนมชั้นสูตรควบคุม มีคะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (7.4)

คำสำคัญ: กัญชง, ขนมชั้น, พันธุ์ Charlotte's Angel, ใยอาหาร, สารต้านออกซิเดชัน

Abstract

Hemp leaves contain important compositions that can be used as food ingredients to increase their nutritional value such as protein, fiber and total phenolic content. Therefore, the objectives of this research were to study the chemical composition of Charlotte's Angel variety and to study the effects of hemp leaf powder on the qualities of physical, chemistry and sensory of Khanom Chan. The study found that hemp leaf powder contained 23.67% protein and 16.90 mg GAE/g of total phenolic content. The DPPH, ABTS and FRAP antioxidant capacity of hemp leaves were higher than those from roots and stems. The effect of hemp leaf powder at 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7% on the quality of Khanom Chan was found that increasing of hemp leaf powder significantly ($p \leq 0.05$) increased hardness and decreased adhesiveness. The optimum content of hemp leaf powder from formulation improvement for making Khanom Chan was 0.4%. Khanom Chan had total phenolic content of 21.23 mg GAE/100 g sample which was higher than the control. The average overall liking score was rated as "moderately like" (7.4).

Keywords: antioxidant, charlotte's angel variety, fiber, hemp, Khanom Chan

คำนำ

กัญชง และกัญชาเป็นพืชที่รู้จักกันในสารกลุ่มแคนนาบินอยด์สามารถออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบมากบริเวณดอกเพศเมียซึ่งมีสารสำคัญ คือ delta-9-tetrahydrocannabinol (THC) ซึ่งออกฤทธิ์ต่อจิตประสาทและอารมณ์ และ cannabidiol (CBD) ไม่เป็นสารออกฤทธิ์ต่อจิตประสาท ทั้ง THC และ CBD เป็นสารสำคัญที่ทางการแพทย์ต้องการเพื่อรักษาโรค (Knezevic et al., 2021) นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ ของต้นกัญชง และกัญชา ได้แก่ ใบ ราก และลำต้นที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ รัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมและพัฒนากัญชาและกัญชงเป็นพืชเศรษฐกิจและเป็นภูมิปัญญาไทย โดยผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนประกอบของส่วนของกัญชาหรือกัญชงที่แสดงในฉลากอาหารมีสาร THC และ CBD ไม่เกิน 1.6 และ 1.41 มิลลิกรัมต่อหน่วยบรรจุ (กระทรวงสาธารณสุข, 2564) และปริมาณสาร THC ไม่เกินร้อยละ 1.0 ต่อน้ำหนักแห้ง (กระทรวงสาธารณสุข, 2560) กัญชงพันธุ์ Charlotte's Angel (*Cannabis sativa* L.subsp. *sativa*) มีปริมาณสาร THC ไม่เกินร้อยละ 1.0 ต่อน้ำหนักแห้ง (ธานี และ สุตเขตต์, 2564) นอกจากนี้ยังพบสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันในกัญชง ขนมชั้นเป็นขนมไทยโบราณมีลักษณะเป็นชั้น ๆ แป้งแต่ละชั้นสามารถลอกออกจากกันได้ มีรสชาติหวานมัน และเนื้อสัมผัสเหนียวนุ่ม (อรวสุ, 2542; กมลวรรณ, 2550) สีของขนมชั้นมีส่วนผสมของวัตถุดิบพืชจากธรรมชาติ เช่น สีเขียวจากใบเตย สีฟ้าจากดอกอัญชัน จากการศึกษาของ Chumkaew and Punfujinda (2019) ได้ผสมน้ำใบย่านางลงไปในขนมชั้น คือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่านอกจากให้สีเขียวแล้วยังเป็นแหล่งของแคลเซียมอีกด้วย สำหรับใบกัญชงซึ่งมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ทั้งยังมีสารอาหารโปรตีน และใยอาหาร จึงน่าสนใจเพิ่มการใช้ประโยชน์จากใบกัญชงในผลิตภัณฑ์อาหารไทย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของส่วนประกอบของกัญชงพันธุ์ Charlotte's Angel และศึกษาผลของใบกัญชงต่อคุณภาพทางกาย เคมี และประสาทสัมผัสของขนมชั้นเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่ให้แก่ผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียม และวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบ

1.1. การเตรียมตัวอย่างผงกัญชง

นำส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ใบ ราก และลำต้น ของกัญชงพันธุ์ Charlotte's Angel ที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมในการปลูกและเก็บเกี่ยวมาตากแห้งในห้องปิดทึบแสงที่อุณหภูมิ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ประมาณ 10-14 วัน จนได้ความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 จากนั้นนำส่วนประกอบกัญชงที่แห้งแล้วไปบดให้เป็นผงละเอียด และร่อนผ่านตะแกรง 40 เมช นำมาบรรจุในถุงอลูมิเนียมเคลือบพลาสติกเก็บไว้ในที่มืด และวิเคราะห์คุณภาพ

1.2. การวิเคราะห์คุณภาพ

1.2.1. องค์ประกอบเคมีโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหารทั้งหมด และคาร์โบไฮเดรตตามวิธีการของ AOAC (2000) โดยวัดค่า 3 ซ้ำ

1.2.2. ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content; TPC) ดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์จาก Vongsak et al. (2015) วิธีเตรียมสารสกัดดัดแปลงจากวิธีการของ Tepsongkroh et al. (2019) ด้วยการนำกัญชงผง 3 กรัม ละลายในเอทานอลร้อยละ 80 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สกัดด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่งโมงที่อุณหภูมิ 35°C และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5,000 g ระยะเวลา 20 นาที ทำการสกัด 2 ครั้ง รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักตัวอย่างกรัมโดยน้ำหนักแห้ง (mg of GAE/g of sample) วัดค่า 3 ซ้ำ

1.2.3. ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

1) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity (DPPH) ดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์จาก Ayoola et al. (2008) วิธีเตรียมสารสกัดผงกัญชงและรายงานผลตามวิธีข้อ 1.2.2.

2) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ABTS radical scavenging activity (ABTS) ดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์จาก Dorkbuakaew et al. (2016) และ Vongsak et al. (2015) วิธีเตรียมสารสกัดผงกัญชงและรายงานผลตามวิธีข้อ 1.2.2.

3) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) ดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์จาก Dorkbuakaew et al. (2016) และ Vongsak et al. (2015) วิธีเตรียมสารสกัดผงกัญชงตามวิธีข้อ 1.2.2. รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดเฟอรัสซัลเฟตต่อน้ำหนักตัวอย่างกรัมโดยน้ำหนักแห้ง (mM of Fe^{2+}/g of sample) วัดค่า 3 ซ้ำ

1.2.4. วัดค่าสีระบบ CIE L* a* b* โดยใช้เครื่องวัดค่าสี UltraScan Pro Hunter lab บันทึกค่า L*, a* และ b* โดยค่าความสว่าง L* มีค่า 0-100 โดย 0 หมายถึงตัวอย่างมีสีดำ และ 100 หมายถึง ตัวอย่างมีสีขาว ค่าสี a* เป็นบวก หมายถึงตัวอย่างมีสีแดง ค่าเป็นลบ หมายถึงตัวอย่างมีสีเขียว และค่าสี b* เป็นบวก หมายถึงตัวอย่างมีสีเหลือง ค่าเป็นลบ หมายถึงตัวอย่างมีสีน้ำเงิน โดยวัดค่า 3 ซ้ำ

2. การศึกษาผลของผงใบกัญชงต่อคุณภาพขนมชั้น

ศึกษาผลของปริมาณผงใบกัญชงต่อคุณภาพขนมชั้น โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ผสมผงใบกัญชงลงในสูตรขนมชั้น 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 โดยน้ำหนัก โดยขนมชั้นประกอบด้วยแป้งผสมร้อยละ 18 (แป้งมันสำปะหลัง, แป้งข้าวเจ้า, แป้งท้าวยายม่อม) กะทิร้อยละ 44 และน้ำตาลทรายร้อยละ 26 ดัดแปลงสูตรจาก ธัญนันท์ (2555) กระบวนการผลิตเริ่มจากละลายน้ำตาลทรายในน้ำกะทิจนเข้ากัน และผสมผงใบกัญชงลงไป จากนั้นผสมแป้งด้วยตะกร้อกับส่วนผสมของน้ำกะทิให้เข้ากัน เทส่วนผสมชั้นที่ 1 ปริมาณ 70 กรัม ใส่แม่พิมพ์ถาดอลูมิเนียมขนาด 5x5x2 นิ้ว นึ่งในลังถึงที่มีน้ำเดือดจนแป้งสุกประมาณ 7-8 นาที แล้วจึงเทส่วนผสมชั้นต่อไปทำทั้งหมด 5 ชั้น และพักไว้ให้เย็น จากนั้นนำขนมชั้นผสมใบกัญชงผงที่ได้ตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม ขนาด 3x3x2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

2.1. คุณภาพทางกายภาพ วัดค่าสีระบบ CIE L* a* b* ตามวิธีการข้อ 1.2.4. และวัดค่าเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT. plus ยี่ห้อ Stable Micro System โปรแกรมการวัดแบบ Texture profile analysis (TPA) โดยใช้หัวกดแบบ cylinder probe ขนาด 75 มม. (P/75) กำหนดให้ค่าความเร็วในช่วงก่อนทดสอบเท่ากับ 2 มม./วินาที ค่าความเร็วขณะทดสอบเท่ากับ 1 มม./วินาที ค่าความเร็วในช่วงหลังการทดสอบเท่ากับ 10 มม./วินาที และระยะทางที่กดลงบนตัวอย่างคือร้อยละ 50 รายงานค่า hardness, adhesiveness, springiness และ cohesiveness วัดค่า 10 ซ้ำ

2.2. คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการให้คะแนนความชอบ 1-9 คะแนน (9-point hedonic scale) และการให้คะแนนความพอดี (Just about right, JAR) มีคะแนนมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 หมายถึงคุณลักษณะนั้นพอดีไม่ต้องปรับ หากคะแนน JAR ไม่ถึงร้อยละ 70 จะใช้วิธี Net score เพื่อคำนวณทิศทางการปรับปรุงคุณลักษณะ ถ้า Net score อยู่ในช่วงร้อยละ -20 ถึง 20 หมายถึงไม่จำเป็นต้องปรับคุณลักษณะนั้น ถ้า Net score มากกว่าร้อยละ 20 หมายถึงควรปรับลดคุณลักษณะลง ถ้าน้อยกว่าร้อยละ -20 หมายถึงควรปรับเพิ่มคุณลักษณะนั้น ทำการประเมินโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน

3. การวิเคราะห์คุณภาพขนมชั้นผสมผงใบกัญชงที่พัฒนาขึ้น

นำขนมชั้นทั้ง 2 ตัวอย่าง ได้แก่ สูตรควบคุมและสูตรผสมผงใบกัญชงที่พัฒนาได้มาวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

3.1. คุณภาพทางกายภาพ วัดค่าสีระบบ CIE L* a* b* และวัดค่าเนื้อสัมผัสตามวิธีการข้อ 2.1.

3.2. คุณภาพทางเคมี วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีโดยประมาณ ตามวิธีการข้อ 1.2.1

3.3. ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds; TPC) ตามวิธีการข้อ 1.2.2.

3.4. ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ตามวิธีการข้อ 1.2.3.

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ANOVA ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS For window 19 version (SPSS Thailand Co., Ltd) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 และทดสอบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan’s multiple-range test (DMRT)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณภาพวัตถุดิบ

จากการสังเกตผงกัญชงจากส่วนต่าง ๆ ของต้นกัญชง พบว่าส่วนของใบมีสีเขียวอมเหลือง ส่วนของรากมีสีเหลืองนวล และส่วนของลำต้นมีสีเหลืองออกน้ำตาล เมื่อนำไปวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี พบว่าผงใบกัญชงมีค่า L* a* b* เท่ากับ 43.51, -1.13 และ 18.23 ตามลำดับ ผงรากกัญชงมีค่าเท่ากับ 63.39, 5.53 และ 22.19 ตามลำดับ ผงลำต้นกัญชงมีค่าเท่ากับ 67.27, -0.07 และ 22.19 ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ พบว่าส่วนของใบ รากและลำต้นมีความชื้นโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับร้อยละ 11.94, 8.12 และ 9.14 ตามลำดับ โดยส่วนของใบมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 26.87 และในส่วนของราก และลำต้นมีปริมาณของเส้นใยร้อยละ 53.49 และ 48.15 ตามลำดับ สูงกว่าส่วนของใบประมาณ 5 เท่า จากการรายงานของ Audu et al. (2014) พบว่าโปรตีนของผงใบกัญชามีปริมาณร้อยละ 23.78 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ จากการวิเคราะห์พบว่ามีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 16.90 mg GAE/g และมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันวิธี DPPH, ABTS และ FRAP เท่ากับ 9.20 mg GAE/g, 8.19 mg GAE/g และ 0.28 mg $FeSO_4$/g ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1 จากงานวิจัยของ Aazza (2021) พบว่าผงใบกัญชามีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 21.03 mg GAE/g และความสามารถในการต้านออกซิเดชันวิธี DPPH และ FRAP มีค่าเท่ากับร้อยละ 51.90 และ 45.08 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของส่วนต่าง ๆ ของกัญชง พบว่าส่วนของใบมีโปรตีน เส้นใยหยาบ ฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงกว่ารากและลำต้น จึงเลือกส่วนใบมาเป็นส่วนผสมสำหรับการผลิตขนมชั้นและได้ส่งผงใบกัญชงวิเคราะห์ปริมาณ THC และ CBD โดยใช้เครื่องโครมาโตกราฟีที่บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด พบว่ามีค่าร้อยละ 0.12 และ 2.81 น้ำหนัก/น้ำหนัก ตามลำดับ

Table 1 Color, proximate composition, total phenolic content, and antioxidant activity of hemp powder

Quality	Hemp components		
	Leaf	Root	Stem
Color			
L*	43.51±0.03[c]	63.39±0.57[b]	67.27±0.20[a]
a*	-1.13±0.09[c]	5.53±0.04[a]	-0.07±0.03[b]
b*	18.23±0.03[b]	22.19±0.38[a]	22.19±0.38[a]
Proximate composition (% dry basis)			
Protein	26.87±0.91[a]	8.07±1.21[c]	10.93±0.56[b]
Fat	8.03±0.10[a]	0.23±0.02[c]	0.65±0.02[b]
Crude Fiber	11.44±0.40[c]	58.22±0.82[a]	52.99±1.13[b]
Carbohydrate	38.22±0.58[a]	32.18±0.45[b]	29.19±1.05[c]
Ash	15.43±0.06[a]	3.15±0.01[c]	9.09±0.15[b]
Total phenolic content (mg GAE/g)	16.90±0.01[a]	0.71±0.04[b]	0.97±0.06[b]
DPPH (mg GAE /g)	9.20±0.02[a]	0.10±0.08[b]	0.25±0.01[b]
ABTS (mg GAE /g)	8.19±0.02[a]	1.05±0.32[b]	0.46±0.02[b]
FRAP (mg $FeSO_4$/g)	0.28±0.00[a]	0.00±0.02[b]	0.00±0.01[b]

[a-c]Means with different superscript letters within each row are significantly different ($p \leq 0.05$)

การศึกษาผลของปริมาณผงใบกัญชงต่อคุณภาพขนมชั้น

จากการศึกษาคุณภาพของขนมชั้นที่ปริมาณผงใบกัญชงแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 พบว่า ขนมชั้นมีค่าสี L*, a* และ b* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 2 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงใบกัญชงส่งผลให้ L* ลดลง ค่า a* เพิ่มขึ้น ค่า b* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อปริมาณผงใบกัญชงเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความสว่างลดลง ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น และค่าความเป็นสีเหลืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของขนมชั้นผสมผงใบกัญชงทั้ง 4 ระดับ พบว่ามีผลต่อค่าความแข็ง ค่าการเกาะติดกัน และค่าการเกาะติดผิววัสดุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อค่าการคืนตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงใน Table 2 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงใบกัญชงจะทำให้ค่าความแข็งของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น และค่าความเกาะติดผิววัสดุลดลง ทั้งนี้น่าจะมาจากปริมาณเส้นใยหยาบที่เพิ่มขึ้นทำให้ดูดน้ำมากขึ้น และค่าความหนืดลดลงจึงส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และค่าความเกาะติดกันลดลง ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Yildiz et al. (2013) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยของมะนาว และแอปเปิ้ลลงในแป้งข้าวสาลีทำให้ค่าความแข็งของเจลแป้งสาลีเพิ่มขึ้น และค่าการยึดเกาะของเจลแป้งมีค่าลดลง และจากการวิจัยของ จาริณี และ เอกพันธ์ (2560) พบว่าใยอาหารมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช โดยทำให้เจลสตาร์ชมีความแข็งเพิ่มขึ้นแต่มีค่าความเกาะติดผิดวัสดุของเจลสตาร์ชลดลง

Table 2 Color and texture of Khanom Chan with hemp leaf powder added at 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7%

Quality	Hemp leaf powder (%)			
	0.1	0.3	0.5	0.7
Color				
L*	41.79±0.50[a]	29.63±1.33[b]	25.16±0.65[c]	18.78±0.57[d]
a*	-1.36±0.23[d]	0.74±0.30[c]	2.93±0.69[b]	6.8±0.82[a]
b*	13.12±0.62[d]	26.89±1.17[c]	38.42±0.81[a]	31.91±0.93[b]
Hardness (g)	2094.19±149.24[b]	2473.39±524.72[ab]	2565.31±211.36[a]	2618.74±492.20[a]
Cohesiveness	0.84±0.02[a]	0.80±0.02[b]	0.81±0.01[b]	0.83±0.02[ab]
Adhesiveness (g.s)	-189.65±44.76[a]	-138.78±12.78[b]	-122.91±15.37[b]	-117±10.12[b]
Springiness (mm)[ns]	0.95±0.02	0.94±0.01	0.95±0.01	0.96±0.01

[a-d]Means with different superscript letters within each row are significantly different ($p \leq 0.05$)

[ns]Means with the same superscript letters within each row are not significantly different ($p > 0.05$)

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าปริมาณผงใบกัญชงมีผลต่อลักษณะ สี กลิ่นรสใบกัญชง ความยืดหยุ่น และความชอบโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านกลิ่นโดยรวม รสหวาน และการลอกเป็นชั้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดง Table 3 เมื่อปริมาณผงใบกัญชงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.3 และ 0.5 ทำให้คะแนนความชอบด้านสี และกลิ่นรสใบกัญชงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.7 ส่งผลให้ค่าคะแนนความชอบด้านสี และกลิ่นรสใบกัญชงลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสีเขียวขี้ม้าของใบกัญชงที่เข้มมากเกินไป และมีกลิ่นรสเขียวเหมือนพืชมากจนเกินไปส่งผลให้ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบลดลง สำหรับด้านเนื้อสัมผัส (ความเหนียว) พบว่าขนมชั้นที่มีปริมาณผงใบกัญชงร้อยละ 0.1, 0.3 และ 0.5 มีคะแนนความชอบด้านความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ดัง Table 3 อยู่ในระดับความชอบปานกลาง แต่เมื่อใส่ผงใบกัญชงร้อยละ 0.7 ทำให้คะแนนความชอบด้านความยืดหยุ่นน้อยกว่าที่ผงกัญชงร้อยละ 0.1 เพราะปริมาณผงใบกัญชงเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของขนมชั้นเพิ่มขึ้น และมีความยืดหยุ่นน้อยลง สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสของขนมชั้น ที่มีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น และค่าความเกาะติดวัสดุลดลง ขนมชั้นที่มีผงใบกัญชงร้อยละ 0.1 มีคะแนนความชอบโดยรวมน้อยที่สุด (6.2) น่าจะเนื่องจากคุณลักษณะทางด้านสีเขียว และกลิ่นรสใบกัญชงที่น้อยเกินไป และเมื่อเพิ่มปริมาณผงใบกัญชงจากร้อยละ 0.3 เป็นร้อยละ 0.5 และ 0.7 ส่งผลให้คะแนนความชอบโดยรวมมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสีเขียวของผงกัญชง และกลิ่นของใบกัญชงที่มากเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Chumkaew and Punfujinda (2019) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำใบย่านางมากขึ้นทำให้การยอมรับของผู้ทดสอบลดลง สาเหตุหลักเกิดจากสีเขียวเข้มของน้ำใบย่านางที่มีมากเกินไป และกลิ่นของน้ำใบย่านางที่ไม่พึ่งประสงค์

เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบแต่ละคุณลักษณะและความชอบโดยรวม พบว่าขนมชั้นผสมผงใบกัญชงที่ร้อยละ 0.3, 0.5 และ 0.7 มีคะแนนทุกคุณลักษณะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงอยู่ในระดับความชอบปานกลาง จากการพิจารณาให้คะแนนความพอดีด้านกลิ่นรสใบกัญชง รสหวาน เนื้อสัมผัส (ความเหนียว) และการลอกเป็นชั้น พบว่าทุกสูตรมีคะแนนความชอบด้านรสหวาน และเนื้อสัมผัสมากกว่าร้อยละ 70 จึงไม่ต้องปรับปรุง และจากการพิจารณาให้คะแนนความพอดีด้านกลิ่นรสใบกัญชงที่ร้อยละ 0.1 และ 0.3 มีค่า Net score ต่ำกว่า -20 จึงต้องปรับเพิ่มปริมาณผงใบกัญชง สำหรับที่ร้อยละ 0.5 และ 0.7 มีค่า Net score มากกว่า 20 จึงต้องปรับลดปริมาณผงใบกัญชงลง ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่มีปริมาณผงใบกัญชงร้อยละ 0.3 มาปรับเพิ่มปริมาณผงใบกัญชงเป็นร้อยละ 0.4 ตามผลที่ได้จากคะแนนความพอดี และข้อเสนอแนะที่ได้จากผู้ทดสอบ

Table 3 Sensory evaluation of Khanom Chan with hemp leaf powder added at 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7%

Attributes	Hemp leaf powder (%)			
	0.1	0.3	0.5	0.7
Color	5.6±1.3^{c}	6.7±1.1^{ab}	7.1±1.0^{a}	6.4±1.4^{b}
Odor^{ns}	6.6±1.3	7.0±0.8	6.9±1.1	6.7±1.2
Hemp flavor	5.9±1.4^{b}	6.5±0.9^{ab}	6.6±1.4^{a}	6.2±1.5^{ab}
Sweetness^{ns}	6.6±1.6	6.8±1.2	6.4±1.4	6.8±1.2
Texture (Stickiness)	7.3±0.8^{a}	7.0±1.3^{ab}	7.2±1.1^{ab}	6.8±1.4^{b}
Separate into layer^{ns}	6.3±1.7	6.4±1.4	6.3±1.5	6.1±1.8
Overall liking	6.2±1.4^{b}	6.9±0.9^{a}	6.7±1.0^{ab}	6.5±1.2^{ab}

$^{a-d}$Means with different superscript letters within each row are significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns}Means with the same superscript letters within each row are not significantly different ($p > 0.05$)

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมชั้นที่ปรับปริมาณผงใบกัญชงเป็นร้อยละ 0.4 พบว่าคะแนนความชอบเฉลี่ยด้านสีเท่ากับ 6.9 กลิ่นเท่ากับ 7.1 และกลิ่นรสใบกัญชงเท่ากับ 6.9 มีคะแนนใกล้เคียงก่อนปรับปรุงปริมาณใบกัญชง ส่วนคะแนนความชอบทางด้านรสหวานเท่ากับ 7.5 ด้านเนื้อสัมผัส (ความเหนียว) เท่ากับ 7.6 การลอกออกเป็นชั้นมีค่าเท่ากับ 7.1 มีคะแนนเพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงปริมาณ ส่งผลให้ความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับชอบปานกลางเท่ากับ 7.4 เมื่อพิจารณาการให้คะแนนความพอดี ทุกคุณลักษณะมีความพอดีมากกว่าร้อยละ 70 จึงไม่ต้องปรับปรุง ดังนั้นปริมาณผงใบกัญชงที่เหมาะสมสำหรับทำขนมชั้นคือร้อยละ 0.4 ดังแสดงใน Fig. 1

การวิเคราะห์คุณภาพขนมชั้นผสมใบกัญชงผงที่พัฒนาขึ้น

ขนมชั้นที่ผสมผงใบกัญชงมีสีเขียวมีค่าสี L*, a* และ b* เท่ากับ 33.27, -1.15 และ 21.66 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับขนมชั้นที่ไม่ใส่ผงใบกัญชงที่มีสีใสมีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 53.20, -0.64 และ 5.68 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส พบว่าขนมชั้นผสมใบกัญชงมีค่าความแข็งมากกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ค่าการเกาะติดกัน ค่าการเกาะพื้นผิววัสดุ และค่าการคืนตัวไม่แตกต่างอย่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

Fig. 1 Khanom Chan with added hemp leaf powder

Table 4 Color, texture, proximate composition, total phenolic content and antioxidant activity of Khanom Chan with hemp leaf powder and control.

Quantity	Khanom chan	
	Control	Added hemp leaf powder
Color		
L*	53.20±0.47[a]	33.27±1.15[b]
a*	-0.64±0.16[b]	-1.15±0.08[a]
b*	5.68±0.11[b]	21.66±0.39[a]
Hardness (g)	2614.81±96.88[b]	2841.16±90.80[a]
Cohesiveness[ns]	0.83±0.01	0.85±0.04
Adhesiveness (g.s)[ns]	-191.29±14.31	-185.33±9.77
Springiness (mm)[ns]	0.96±0.01	0.96±0.00
Proximate composition (% dry basis)		
Protein[ns]	2.19±0.12	1.97±0.04
Fat	4.02±0.21[a]	3.42±0.15[b]
Crude Fiber	9.03±0.50[b]	11.00±0.65[a]
Carbohydrate[ns]	84.29±0.00	83.11±0.00
Ash[ns]	0.47±0.05	0.50±0.09
Total phenolic content (mg GAE/100 g)	13.14±0.51[b]	21.23±1.40[a]
DPPH (mg GAE /100 g)	2.08±0.04[b]	2.72±0.03[a]
ABTS (mg GAE /100 g)	0.09±0.00[b]	0.22±0.00[a]
FRAP (mg $FeSO_4$/100 g)	0.04±0.01[b]	0.06±0.01[a]

[a-b]Means with different superscript letters within each row are significantly different ($p \leq 0.05$)

[ns]Means with the same superscript letters within each row are not significantly different ($p > 0.05$)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าขนมชั้นสูตรควบคุม และขนมชั้นผสมผงใบกัญชงมีความชื้นร้อยละ 37.84 และ 39.83 ตามลำดับ ขนมชั้นผสมผงใบกัญชงมีปริมาณไขมันน้อยกว่าขนมชั้นสูตรควบคุม เพราะมีการทดแทนน้ำกะทิที่ร้อยละ 14.93 ด้วยน้ำผสมผงใบกัญชง แต่เส้นใยหยาบเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม มีค่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงกว่าของขนมชั้นสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 4 โดยขนมชั้นผสมผงใบกัญชงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด, DPPH, ABTS และ FRAP เท่ากับ 21.23, 2.72, 0.22 mg GAE /100 g และ 0.06 mg $FeSO_4$ /100 g ตามลำดับ จากการคำนวณปริมาณ THC และ CBD ที่วิเคราะห์ได้ในวัตถุดิบใบกัญชง พบว่าถ้ารับประทานขนมชั้นผสมผงใบกัญชง 50 กรัม (1 หน่วยบริโภค) จะได้รับปริมาณ THC และ CBD เท่ากับ 0.0003 mg และ 0.0080 mg ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินปริมาณที่กำหนดไว้ในกระทรวงสาธารณสุข (2564)

สรุป

จากการศึกษา พบว่าส่วนของใบกัญชงพันธุ์ Charlotte's Angel มีปริมาณโปรตีน สารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านออกซิเดชันมากกว่าส่วนของรากและลำต้น การเพิ่มปริมาณผงใบกัญชงทำให้ขนมชั้นมีความแข็งเพิ่มขึ้น และค่าการเกาะพื้นผิววัสดุลดลง ขนมชั้นผสมผงใบกัญชงร้อยละ 0.4 มีคะแนนความชอบเฉลี่ยในระดับชอบปานกลาง มีปริมาณเส้นใยหยาบ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันมากกว่าขนมชั้นสูตร

ควบคุม ดังนั้นขนมชั้นที่ได้จากการศึกษานี้ จึงเป็นต้นแบบของการพัฒนาขนมไทยโดยใช้ประโยชน์จากใบกัญชง และสอดคล้องกับนโยบายของภาครัฐบาลที่ให้ใช้ประโยชน์จากส่วนประกอบของกัญชงและกัญชา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กมลวรรณ แจ้งชัด. 2550. ขนมไทย: เอกลักษณ์และคุณภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ บริษัท เท็ก แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด. กรุงเทพฯ.

กระทรวงสาธารณสุข. 2563. ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนประกอบของส่วนของกัญชาหรือกัญชง. พระราชบัญญัติอาหาร. http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2564/E/168/T_0022.PDF, 6 สิงหาคม 2563.

กระทรวงสาธารณสุข. 2560. การขออนุญาตและการอนุญาตผลิต จำหน่าย หรือมีไว้ในครอบครอง ซึ่งยาเสพติดให้โทษในประเภท 5 เฉพาะเฮมพ์ พ.ศ. 2559. http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER3/DRAWER091/GENERAL/DATA0001/00001901.PDF, 20 พฤศจิกายน 2565.

จาริณี พยัคฆชาติ, เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 2560. ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังและการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมชั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ธัญนันท์ อบถม. 2555. ขนมหวานไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. อมรินทร์ Cuisine. กรุงเทพฯ.

ธานี ศรีวงศ์ชัย, สุตเขตต์ นาคะเสถียร. 2564. การปลูกกัญชาในระบบปิด (indoor) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วารสารเคหการเกษตร. 45(6): 121–124.

อรวสุ นพพรรค์. 2542. ขนมไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.

Aazza, S. 2021. Application of Multivariate Optimization for Phenolic Compounds and Antioxidants Extraction from Moroccan Cannabis sativa Waste. J. Chemistry. 2021: 9738656. doi.org/10.1155/2021/9738656

Association of Official Analytical Chemists. 2000. Official Methods of Analysis, 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, MD, USA.

Audu, B. S., Ofojekwu, P. C., Ujah, A., Ajima, M. N. O. 2014. Phytochemical, proximate composition, amino acid profile and characterization of Marijuana (Cannabis sativa L.). J. Phytopharmacology. 3(1): 35–43. doi.org/10.31254/phyto.2014.3106

Ayoola, G. A., Coker, H. A. B., Adesegun, S. A., Adepoju-Bello, A. A., Obaweya, K., Ezennia, E. C., Atangbayila, T. O. 2008. Phytochemical Screening and Antioxidant Activities of Some Selected Medicinal Plants Used for Malaria Therapy in Southwestern Nigeria. Tropical Journal of Pharmaceutical Research. 7(3): 1019–1024. doi.org/10.4314/tjpr.v7i3.14686

Chumkaew, K., Punfujinda, C. 2019. Effect ofTiliacora triandraleaf juiceon qualitiesof Thai layereddessert. Science, Engineering and Health Studies. 13(3): 133–142. doi.org/10.14456/sehs.2019.14

Dorkbuakaew, N., Ruengnet, P., Pradmeeteekul, P., Nimkamnerd, J., Nantitanon, W., Thitipramote, N. 2016. Bioactive compounds and antioxidant activities of Camellia sinensis var. assamica in different leave maturity from Northern Thailand. Int. Food Res. J. 23(5): 2291–2295.

Knezevic, F., Nikolai, A., Marchart, R., Sosa, S., Tubaro, A. 2021. Residues of herbal hemp leaf teas – How much of the cannabinoids remain?. Food Contral. 127: 108146. doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108146

Vongsak, B., Kongkiatpaiboon, S., Jaisamut, S., Machana, S., Pattarapanich, C. 2015. In vitro alpha glucosidase inhibition and free-radical scavenging activity of propolis from Thai stingless bees in mangosteen orchard. Rev. Bras. Farmacogn. 25(5): 445–450. doi.org/10.1016/j.bjp.2015.07.004

Tepsongkroh, B., Jangchud, K., Jangchud, A., Charunuch, C., Prinyawiwatkul, W. 2019. Healthy brown rice-based extrudates containing straw mushrooms: Effect of feed moisture and mushroom powder contents. J. Food Process. Preserv. 43(9): 14089. doi.org/10.1111/jfpp.14089

Yildiz, O., Yurt, B., Basturk, A., Toker, O.S., Yilmaz, M.T., Karaman, S., Daglıoglu O. 2013. Pasting properties, texture profile and stress–relaxation behavior of wheat starch/dietary fiber systems. Food Res. Int. 53: 278–290. doi.org/10.1016/j.foodres.2013.04.018

การศึกษาผิวสัมผัสผ้าที่มีผลต่อพฤติกรรมของแมวสายพันธุ์ไทย

The study of fabric textures affected to Thai domestic cat behaviour

กลอยทิพย์ สุทธิสารรณกร[a], **พิธาลัย ผู้พัฒน์**[a,*], **ศุฐฐิวีร์ เจิมประไพ**[b], **ปวริน ตันตริยานนท์**[a],
พรรณภัทร พรหมเพ็ญ[a]

Kloytip Sudhisanronakorn[a], Pithalai Phoophat[a,*], Suttiwee Chermprapai[b], Pawarin Tuntariyanond[a],
Phannaphat Phromphen[a]

[a]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาเวชศาสตร์คลินิกสัตว์เลี้ยง คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Companion Animals Clinical Sciences, Faculty of Veterinary Medicine, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pithalai.p@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาผิวสัมผัสผ้าที่มีผลต่อพฤติกรรมแมวสายพันธุ์ไทยโดยดำเนินการสัมภาษณ์เชิงลึกในกลุ่มผู้เลี้ยงแมว เพื่อสำรวจถึงทัศนคติของผู้เลี้ยงแมวที่มีต่อ ผลิตภัณฑ์สำหรับแมวและผิวสัมผัสผ้าที่มีผลต่อแมว แล้วนำมาวิเคราะห์ผล เพื่อหาลักษณะของตัวอย่างผ้าที่คาดว่าแมวจะมีพฤติกรรมตอบสนอง และประเมินสมบัติโดยการทดสอบด้วยเครื่อง KES (Kawabata's Evaluation System) ได้แก่ การทดสอบ Compression, Surface และ Qmax เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของผ้าแต่ละชนิด จากนั้นนำไปทดลองในกลุ่มแมวตัวอย่างที่อยู่ในสถานพักพิง Catster by Kingdom of Tigers โดยการทำชิ้นผ้าตัวอย่างในรูปแบบของที่นอนแมว นำไปวางไว้และบันทึกภาพเคลื่อนไหวและนำมาแปลผลในรูปของระยะเวลาที่แมวมีปฏิสัมพันธ์ ระยะเวลาต่อแมวหนึ่งตัวต่อหนึ่งครั้งที่แมวมีปฏิสัมพันธ์ และความถี่ที่แมวมีปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่างแต่ละชนิด พบว่าผ้าที่แมวมีปฏิสัมพันธ์มากที่สุดคือผ้าพอลิเอสเตอร์ที่มีโครงสร้างการทอที่ให้ผิวสัมผัสที่ขรุขระเล็กน้อย
คำสำคัญ: การประเมินทางผิวสัมผัส, โครงสร้างผ้า, พฤติกรรมแมว, แมวสายพันธุ์ไทย

Abstract

The study of the effect of fabric textures to the behaviour of Thai domestic cat, conducted by in-depth interview with cat owners to investigate cat owners' attitude to cat products and fabric texture. Afterwards, fabric samples were selected according to an in-depth interview result and they were measured their properties by KES (Kawabata's Evaluation System); Compression, Surface and Qmax. Then the fabric samples in the form of cat mattresses were brought to the experiment with a group of cat samples and performed at a cat shelter, Catster by Kingdom of Tigers, recorded by video recording. The result was interpreted in terms of interaction duration, interaction frequency and duration per interaction. It was founded that the cat prefer the polyester woven fabric with a little rough texture.
Keywords: fabric structure, feline behaviour, sensory evaluation, Thai domestic cat

คำนำ

ในปัจจุบันความนิยมเลี้ยงแมวเพิ่มมากขึ้นทั้งในและต่างประเทศ มีผู้เลี้ยงแมวจำนวนมาก นับแมวเป็นหนึ่งในสมาชิกครอบครัวที่ไม่ใช่เป็นเพียงแค่สัตว์เลี้ยง (Farnworth, 2015; June McNicholas, 2005; McNicholas, 2014) แมวยังสามารถมีส่วนช่วยในการรักษาเยียวยาจิตใจเจ้าของ โดยเฉพาะในผู้สูงวัย จะพบได้ว่าผู้ที่เลี้ยงสัตว์เลี้ยงมีอัตราการเข้าพบแพทย์ต่ำกว่าผู้ที่ไม่ได้เลี้ยงสัตว์เลี้ยง (McNicholas, 2014) จึงมีการพยายามทำความเข้าใจ ศึกษาวิถีชีวิตของแมวและการตอบสนองความต้องการของแมวที่มากกว่าความต้องการขั้นพื้นฐานในหลากหลายแง่มุม อาทิเช่น การประเมินสิ่งกระตุ้นเพื่อลดความเครียดในแมวที่กำลังเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล (Stoneburner et al., 2021) การประเมินโครงสร้างในกรงและของเล่น และการบริหารจัดการเวลาของแมวที่เพิ่งถูกรับเข้ามายังสถานพักพิง (Moore & Bain, 2013) ผลของการจัดการพื้นที่เฟอร์นิเจอร์ต่อพฤติกรรมของแมวบ้านที่ถูกเลี้ยงเป็นกลุ่ม (Desforges et al., 2016) ผลของการจัดหากล่องซ่อนหรือชั้นวางต่อพฤติกรรมและอุจจาระสารกลูโคคอร์ติคอยด์ของแมวที่มีนิสัยกล้าหาญและขี้อายที่อยู่ในกรงเดี่ยว (Ellis et al., 2021) เป็นต้น ในทางกลับกัน ด้านศึกษาความต้องการของแมวที่มีต่อสิ่งทอยังพบได้น้อย Rossi et al. (2021) ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกาของแมวต่อผ้าบุเฟอร์นิเจอร์ ในขณะที่ตลาดยังคงมีความต้องการผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่สร้างความพึงพอใจให้กับแมวอย่างต่อเนื่อง รวมถึงผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ผู้เลี้ยงแมวใช้และแมวมีปฏิสัมพันธ์ด้วย จึงควรมีการศึกษาเรื่องผิวสัมผัสของสิ่งทอต่อปฏิสัมพันธ์ของแมวเพิ่มยิ่งขึ้น

โดยปกติทั่วไปแล้วการทดสอบทางผิวสัมผัสจะเกิดขึ้นในการทดสอบกับคน (Subjective Evaluation) เป็นหลัก (Bishop, 1996) และมีการใช้ระบบการทดสอบผิวสัมผัสทางสิ่งทอโดยใช้เครื่องมือ (Objective Evaluation) คือ Kawabata’s Evaluation System (KES) (Sueo Kawabata, 1995) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกลและเชิงประจักษ์สำหรับผิวสัมผัสในสิ่งทอ ได้แก่ การทดสอบแรงกด (Compression) ความโค้งงอ (Bending) แรงดึง (Tensile) แรงเฉือน (Shearing) และพื้นผิว (Surface) (Das et al., 2021) และมีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบโดยคนและโดยเครื่องมือ (R. Postle, 1989) อย่างไรก็ตามการทดสอบผิวสัมผัสของสิ่งทอที่มีความสัมพันธ์กับสัตว์เลี้ยงยังพบได้น้อยมาก

จากประเด็นดังกล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญของการศึกษาผิวสัมผัสผ้าต่อแมวจากทัศนคติของผู้เลี้ยงแมว เพื่อหาลักษณะของผ้าที่เข้าใกล้ความพึงพอใจของแมวมากที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผิวสัมผัสผ้าที่มีผลต่อพฤติกรรมของแมวสายพันธุ์ไทย โดยการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของแมวกับผิวสัมผัสผ้าที่มีความแตกต่างกัน ควบคู่ไปกับ การประเมินสมบัติเชิงกลของผ้าด้วยการทดสอบ KES-F ร่วมด้วย โดยผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นของการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์สำหรับแมวได้ต่อไปในอนาคต

วิธีการวิจัย

การสำรวจทัศนคติผู้เลี้ยงแมว

ทำการสัมภาษณ์เชิงลึก ผู้เลี้ยงแมว 8 คน อายุระหว่าง 21–47 ปี เป็นเพศชาย 4 คน และเพศหญิง 4 คน อาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีประสบการณ์เลี้ยงแมวมาแล้วไม่ต่ำกว่า 6 เดือน ทำการสัมภาษณ์แบบกึ่งมีโครงสร้าง โดยแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปและการปฏิบัติต่อแมว ผลิตภัณฑ์สำหรับแมวโดยเฉพาะคุณสมบัติของผ้าที่ใช้กับแมวและทัศนคติต่อเนื้อผ้า โดยใช้ประเด็นคำถามดังเช่น ลักษณะของผลิตภัณฑ์สำหรับแมวที่ซื้อ ส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นผ้าเลือกจากอะไรบ้าง คิดว่าแมวชอบหรือไม่ เพราะอะไร และคิดว่าแมวชอบผ้าลักษณะแบบใด เพราะอะไร เป็นต้น จากนั้น

นำมาวิเคราะห์ผลการสัมภาษณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกตัวอย่างผ้า เช่น โครงสร้างและความหนาแน่นของผ้า

ตัวอย่างผ้า

ทำการเลือกตัวอย่างผ้าจำนวน 8 ผืน ตามผลการสัมภาษณ์เชิงลึก โดยผ้าส่วนใหญ่มีโครงสร้างการทอ ที่มีลายแตกต่างกัน เช่น ลายขัด ลายสอง และลายต่วน ส่วนผ้าตัวอย่างที่ 3 มีโครงสร้างเป็นการถักขนลูปขนาดเล็ก และตัวอย่างที่ 8 เป็นผ้าขนสองด้าน น้ำหนักผ้าทั้ง 8 ผืนอยู่ในช่วง 90–326 กรัมต่อตารางเมตร และมีความหนาอยู่ในช่วง 0.025 ถึง 0.110 มม. เส้นใยส่วนใหญ่ทำมาจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ มีผ้าตัวอย่างที่ 7 เป็นผ้าฝ้าย ผ้าตัวอย่างที่ 1 ผสมระหว่างเส้นใยฝ้ายและลินิน ผ้าตัวอย่างที่ 4 ผสมระหว่างเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และฝ้าย และตัวอย่างที่ 3 เป็นฝ้ายที่มีการตกแต่งสำเร็จด้วยพอลิยูรีเทนที่ทำให้ผิวสัมผัสฝืดคล้ายหนังกลับ

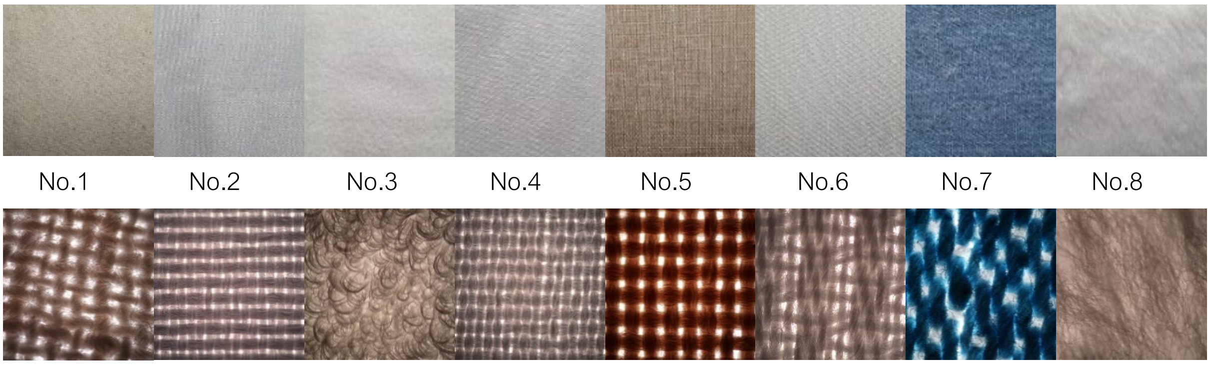


Fig 1. Picture of the fabric samples took by camera (top) and microscope (bottom).

Table 1 Fabric samples properties and cat sensory evaluation experiment results

Sample No.	Fabric Structure	Weight (g/m^2)	Thickness (mm)	Fiber Type
1	Plain weave	143.85	0.045	Cotton + linen
2	Satin weave	90.10	0.025	Polyester
3	Loop knit	225.50	0.060	Cotton with Polyurethane finishing
4	Plain weave	100.05	0.030	Polyester + Cotton
5	Plain weave	149.60	0.035	Polyester
6	Derivative plain weave	117.95	0.035	Polyester
7	Twill weave	251.05	0.065	Cotton
8	Double side fur (weave)	326.25	0.110	Polyester

การประเมินสมบัติด้วยเครื่องมือ KES-F

การประเมินสมบัติเชิงกลโดย KES-S ภายใต้เงื่อนไขการวัดมาตรฐาน (Brojeswari Das*, 2017) อุณหภูมิ 20°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 65% RH ได้แก่การทดสอบแรงกด (compression) โดย KES-FB3 เพื่อวิเคราะห์ค่า linearity of pressure-thickness curve (LC), Compression energy (WC), Compression Resilience (RC) ทดสอบพื้นผิว (surface) โดย KES-FB4 เพื่อวิเคราะห์ค่า Coefficient of friction (MIU), Mean variation of MIU (MMD), Geometrical

roughness (SMD) และ ทดสอบอุณหภูมิสัมผัส (Qmax) โดย KES-FB7 ตัวอย่างผ้าตัดขนาด 20x20 ซม. ทำการทดสอบสมบัติดังกล่าวตัวอย่างละ 3 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย

การทดสอบผิวสัมผัสผ้ากับพฤติกรรมแมว

ในการทดลองกับแมวและผ้าตัวอย่าง ทำการทดลองกับแมวสายพันธุ์ไทย (Thai domestic cat) 17 ตัว ได้จัดทำขึ้นโดยแบ่งเป็นทั้งหมด 3 รอบการทดลอง รอบการทดลองละ 90 นาที ในรูปแบบของที่นอนแมว ขนาด 35x60 เซนติเมตร จำนวน 2 ชุด (รวมเป็น 16 ชิ้น) ต่อรอบการทดลอง โดยเปลี่ยนชุดที่นอนตัวอย่างใหม่ในทุกรอบการทดลอง ภายในห้องปิดที่เปิดเครื่องปรับอากาศ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยมีการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นทุก 10 นาที ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิตอล รุ่น FLUKE 971 บันทึกวิดีโอคลิปด้วยกล้องดิจิตอล Samsung NX Mini และมีการเปลี่ยนตำแหน่งที่นอนโดยการสุ่มตำแหน่งรอบละ 1 ครั้ง แปลผลในทั้งหมด 3 ประเด็น ได้แก่ ระยะเวลาที่แมวมีปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่างแต่ละชนิด (Interaction duration) ระยะเวลาต่อแมวหนึ่งตัวที่มีปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่างแต่ละชนิดต่อหนึ่งครั้ง (Time per cat) และความถี่ที่แมวมีปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่างแต่ละชนิด (Frequency per cat) (Rossi et al., 2021) จากนั้นนำค่าทั้ง 3 รอบมาหาค่าเฉลี่ย โดยความพึงพอใจต่อผิวสัมผัสผ้าของแมว ประเมินจากระยะเวลาและความถี่ในการปฏิสัมพันธ์กับผ้า (ค่ามากหมายถึงพึงพอใจมาก)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้เลี้ยงแมว

จากผลการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างผู้เลี้ยงแมว พบว่าผู้เลี้ยงแมวจะอาศัยอยู่ในบ้านเดี่ยวหรือทาวน์เฮ้าส์ ภายในพื้นที่อยู่อาศัยจะเปิดเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 24-26 องศาเซลเซียส โดยห้องนอนจะเป็นห้องที่เปิดเครื่องปรับอากาศตลอดเวลาในช่วงกลางคืน ส่วนบริเวณอื่น ๆ ของบ้านจะมีการเปิดเครื่องปรับอากาศตามโอกาสและความจำเป็นที่แตกต่างกันออกไป และผู้ลี้ยงแมวตัดสินใจเลี้ยงแมวจากความชอบและความพร้อมส่วนตัวเป็นหลัก วิธีการและมุมมองในการเลี้ยงแมว สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่เลี้ยงแมวโดยมีเจ้าของเป็นศูนย์กลาง โดยเจ้าของแมวจะทำการฝึกฝนและสร้างระเบียบวินัยและวิถีชีวิตให้กับแมวที่เป็นไปตามความต้องการของเจ้าของแมว เช่น การจำกัดพื้นที่ในบ้าน การกำหนดเวลาและสถานที่นอน เป็นต้น และกลุ่มที่เลี้ยงแมวโดยมีแมวเป็นศูนย์กลาง โดยเจ้าของแมวจะปรับตัวและปรับวิธีการเลี้ยงให้เข้ากับความต้องการของแมว โดยอาศัยการศึกษาและสังเกตพฤติกรรมและทำความเข้าใจ เมื่อสอบถามเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ที่จะได้รับความชื่นชอบและผลตอบรับที่ดีจากแมวเสมอ เจ้าของแมวส่วนใหญ่มีคำตอบไปในทิศทางเดียวกันคือผลิตภัณฑ์ “ไม้ตกแมว” (ไม้แท่งยาวเรียบคล้ายไม้เสียบลูกโป่ง ตรงปลายห้อยด้วยของเล่นชิ้นเล็กๆต่อกับเชือก) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่จะได้รับความชื่นชอบและผลตอบรับที่ดีจากแมวเพราะสามารถกระตุ้นพฤติกรรมของแมวและทำให้เจ้าของรู้สึกมีส่วนร่วมกับการได้เล่นกับแมวของตนเอง ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ที่นอนแมว คอนโดแมว จะได้รับผลตอบรับจากแมวที่แตกต่างกัน ทั้งให้ความสนใจและไม่ให้ความสนใจ

เมื่อสอบถามเกี่ยวกับลักษณะผิวสัมผัสผ้าที่มีต่อความชอบของแมว เจ้าของแมวได้กล่าวถึงผ้าประเภทต่างๆ ที่ได้สังเกตว่าแมวของตัวเองมีความชอบ จากผลการสัมภาษณ์ดังกล่าว จะสามารถแบ่งผ้าที่แมวชอบออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) ผ้าเรียบ เป็นผ้าที่ใช้ในการผลิตเครื่องนอน มีผิวสัมผัสเรียบ ลื่น นุ่ม ทั้งจับแล้วรู้สึกเย็นและไม่รู้สึกเย็น ถูกกล่าวถึงในสถานการณ์เมื่อเจ้าของอยู่ภายในห้องนอน และแมวมีพฤติกรรมที่คล้ายกับการบ่งบอกถึงการต้องการแสดงความเป็นเจ้าของร่วมกันกับเจ้าของแมว

2) ผ้าหยาบ เป็นผ้าที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ใช้งานนอกบ้านหรือเฟอร์นิเจอร์ มีผิวสัมผัสที่ค่อนข้างหยาบและหนา เช่น พรมเช็ดเท้าสำหรับวางหน้าประตู หรือสิ่งทอสำหรับแคมป์ปิง เป็นต้น

3) ผ้าขน เป็นผ้าที่ใช้ในการประดับตกแต่งหรือไม่มีการใช้งานที่ชัดเจน พบมากในผลิตภัณฑ์สำหรับแมวในท้องตลาด แม้ว่าจะเป็นกลุ่มสิ่งทอที่ผู้ให้สัมภาษณ์กล่าวถึงไม่มาก เมื่อเทียบกับสองกลุ่มแรก แต่จากผลการสัมภาษณ์พบว่าแมวให้การตอบรับที่ดี

ผลการศึกษาลักษณะผิวสัมผัสของผ้าต่อพฤติกรรมของแมว

จากผลการสัมภาษณ์เจ้าของแมว ทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการคัดเลือกผ้าตัวอย่างจำนวน 8 ผืน โดยมีทั้งผ้าเรียบ ผ้าหยาบ และ ผ้าขน สมบัติทางกายภาพ และ ผลของการทดสอบการมีปฏิสัมพันธ์ของแมวกับผ้าแสดงใน Fig 2.

จากผลการทดลองพบว่าแมวจะมีการเดินสำรวจ ดม และเลือกที่จะนอนหรือไม่นอน หากเลือกที่จะไม่นอน จะมีระยะเวลาที่ใช้กับผ้าตัวอย่างนั้นไม่เกิน 10 วินาที และ หากว่าแมวเลือกที่จะนอนก็จะใช้เวลาแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของผ้าที่ใช้ในการทดลอง โดยผ้าตัวอย่างที่ 6 เป็นผ้าที่แมวมีระยะเวลาปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่าง มีระยะเวลาที่แมวหนึ่งตัวมีปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่างต่อหนึ่งครั้ง และมีความถี่ที่แมวมีปฏิสัมพันธ์กับผ้ามีค่าสูงสุดทั้ง 3 ค่า เมื่อเทียบการมีปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่างผืนอื่นๆ ซึ่งค่ามากนี้อาจจะหมายถึงแมวมีความพึงพอใจมากที่สุดกับผ้าตัวอย่างนี้ ซึ่งผ้าตัวอย่างที่ 6 นี้เป็นผ้าพอลิเอสเตอร์ ที่ทอด้วยโครงสร้างลายขัดดัดแปลง มีน้ำหนักอยู่ที่ 117.95 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งอยู่ในระดับกลางค่อนไปทางเบา และมีความหนา 0.035 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในระดับหนาปานกลาง ผ้าตัวอย่างที่ 5 ซึ่งเป็นผ้าพอลิเอสเตอร์ทอลายขัด และมีน้ำหนักและความหนาอยู่ในระดับกลาง เป็นผ้าที่แมวมีระยะเวลาปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่าง และมีความถี่ที่แมวมีปฏิสัมพันธ์กับผ้ามีค่าสูงสุดเป็นอันดับที่ 2 ส่วนผ้าตัวอย่างที่ 8 เป็นผ้าพอลิเอสเตอร์ที่เป็นขนสองด้าน มีระยะเวลาที่แมวหนึ่งตัวมีปฏิสัมพันธ์กับผ้าตัวอย่างต่อหนึ่งครั้งเป็นอันดับที่ 2 และผ้าตัวอย่างที่ 7 และตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเป็นผ้าจากเส้นใยธรรมชาติจะมีค่าที่แมวปฏิสัมพันธ์ทั้ง 3 ค่า อยู่ในอันดับที่ 3 หรือ 4 ในทางกลับกันผ้าที่แมวค่อนข้างมีปฏิสัมพันธ์ต่ำได้แก่ ผ้าตัวอย่างที่ 2 และ 4 ที่เป็นผ้ามีน้ำหนักเบา มีความบาง ทอด้วยลายที่มีความเรียบได้แก่ลายต่วนและลายขัด นอกจากนี้ยังมีผ้าตัวอย่างที่ 3 ที่เป็นผ้าฝ้ายถักขนสั้น ตกแต่งสำเร็จด้วยพอลิยูรีเทนที่ทำให้ผิวสัมผัสฝืดคล้ายหนังกลับที่แมวค่อนข้างมีปฏิสัมพันธ์ต่ำ

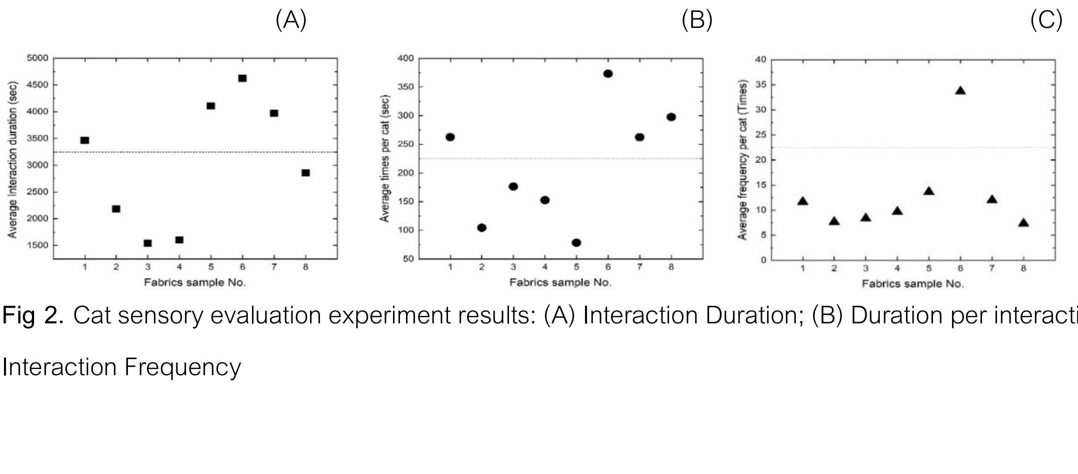


Fig 2. Cat sensory evaluation experiment results: (A) Interaction Duration; (B) Duration per interaction; and (C) Interaction Frequency

จากการประเมินสมบัติของเนื้อผ้าด้วยวิธี Kawabata's Evaluation System ผลของแรงกด การต้านทางผิวสัมผัส และอุณหภูมิสัมผัส แสดงดัง Table 2

จากผลการทดสอบแรงกดของผ้าตัวอย่างทั้ง 7 ตัวอย่าง ค่า LC จะมีความใกล้เคียงกันทุกผืน ส่วนค่า WC จะมีความแตกต่างกัน โดยผ้าตัวอย่างที่ 7 จะมีค่า WC สูงที่สุด ซึ่งถือว่ามีแรงที่ใช้ในการบีบอัดสูง หรือผ้าค่อนข้างแข็ง ไม่นุ่มฟู ซึ่งเป็นผ้าฝ้ายทอลายสอง ที่มีความหนาและน้ำหนักค่อนข้างมากกว่าผ้าตัวอย่างอื่น และผ้าตัวอย่างที่ 4 มีค่า WC ต่ำที่สุด แสดงว่าแรงที่ใช้ในการบีบอัดต่ำ ส่วนผ้าตัวอย่างที่ 3 มีค่า RC ค่อนข้างสูง แสดงว่าเมื่อถูกแรงกด ผ้าจะมีค่าความคืนตัวได้สูง ในส่วนของการทดสอบผิวสัมผัส ผ้าตัวอย่างที่ 2,1, 7 และ 6 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (MIU) ค่อนข้างต่ำ หมายความว่าผ้ามีความลื่น ในขณะเดียวกันผ้าตัวอย่างที่ 8, 5 และ 3 มี MIU ค่อนข้างสูงในทั้งทิศทางเส้นยืนและเส้นพุ่ง ส่วนค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยความหยาบ (SMD) ของผ้าตัวอย่างที่ 5 มีค่าสูงที่สุด แสดงว่าผ้ามีความขรุขระสูงที่สุด รองลงมาคือตัวอย่าง 1 และ 6 ตามลำดับ และผ้าตัวอย่างที่ 8 มีค่า SMD ต่ำที่สุดทางเส้นยืน และตัวอย่างที่ 3 และ 2 มีความขรุขระน้อยทั้งทางเส้นยืนและเส้นพุ่ง ในส่วนของอุอุณหภูมิสัมผัส (Qmax) ไม่ชัดเจนสำหรับความแตกต่างของผ้าแต่ละผืน

เมื่อเปรียบเทียบผลการบันทึกสถิติปฏิกิริยาของแมวที่มีต่อผ้าแต่ละชนิดกับผลการทดสอบ KES จะเห็นได้ว่าผ้าที่แมวมีปฏิสัมพันธ์มากที่สุดคือผ้าตัวอย่างที่ 6 และรองลงมาคือผ้าตัวอย่างที่ 5 ซึ่งผ้าสองตัวอย่างนี้มีค่า SMD ค่อนข้างสูง มีความเป็นไปได้ที่แมวจะมีแนวโน้มพึงพอใจในผ้าหยาบ ซึ่งถ้าวิเคราะห์จากลายทอ พบว่าเป็นผ้าตัวอย่างที่ 6 เป็นผ้าชนิดเดียวที่มีลายทอที่แตกต่าง ซึ่งเป็นลายขัดดัดแปลง ซึ่งมีความเรียบค่อนข้างต่ำ และผ้าตัวอย่างที่ 5 เป็นโครงสร้างลายขัดที่เส้นใยใหญ่ และมีความหนาแน่นในการทอต่ำ ดังภาพ Fig. 1 ดังนั้นในส่วนของโครงสร้างการทอจึงอาจมีผลต่อการประเมินความพึงพอใจของแมวในการทดลองนี้ ในด้านของชนิดเส้นใย พบว่าผ้าตัวอย่างที่มีสถิติสูงสุด 3 อันดับแรก (Fig. 2) มีแนวโน้มไปในทิศทางของผ้าจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์มากกว่าเส้นใยชนิดอื่น ดังนั้นชนิดของเส้นใยอาจมีผลต่อความพึงพอใจของแมว

Table 2 Kawabata's Evaluation System (KES) testing results

Fabric Sample No.	KES Compression			KES Surface						KES Qmax (kPa* s/m)
	LC	WC (gf^2/cm^2)	RC (%)	MIU (warp)	MIU (weft)	MMD (warp)	MMD (weft)	SMD (warp) (μm)	SMD (weft) (μm)	
1	0.368	0.361	38.203	1.98	1.99	5.57	2.17	9.12	6.13	0.116
2	0.333	0.228	38.973	1.66	1.90	0.83	1.54	3.13	2.19	0.152
3	0.313	0.337	44.597	3.19	3.20	0.82	0.76	2.24	2.47	0.126
4	0.378	0.070	32.860	2.55	4.79	1.04	1.65	5.26	2.89	0.190
5	0.293	0.124	41.283	3.72	3.12	2.7	8.13	12.84	11.02	0.177
6	0.263	0.201	31.513	2.75	1.81	1.63	1.06	5.83	7.90	0.130
7	0.282	0.414	26.723	2.04	2.04	1.41	3.00	3.00	5.53	0.119
8	-	-	-	3.98	3.75	0.72	1.53	1.16	5.67	-

*Due to the limitation of KES-F Auto machine, the fabric 8 could not be tested the compression and Qmax in this machine. The fabric 8 was two-side fur synthetic (polyester) fabric with 5 mm long, both side of the fabric was no different. The fur was soft and smooth without any tangle.

สรุป

จากผลการสัมภาษณ์ผู้เลี้ยงแมวพบว่าทัศนติของผู้เลี้ยงแมวที่มีต่อผิวสัมผัสผ้าที่คาดว่าแมวจะชอบ โดยมากไปในทิศทางของผ้าที่มีผิวเรียบมากกว่าผ้าที่มีผิวสัมผัสอื่น ผู้วิจัยจึงทำการเลือกผ้าตัวอย่างที่มีแนวโน้มไปในทิศทางของผ้าที่มีผิวเรียบในลักษณะที่แตกต่างกันไป ผ้าขนที่มักพบได้ในผลิตภัณฑ์สำหรับแมวในท้องตลาด และผ้าที่มีความหนาและขรุขระมากขึ้น เมื่อทำการทดลองผิวสัมผัสผ้าที่มีผลต่อพฤติกรรมแมวจากชุดผ้าตัวอย่างที่เลือกมาในรูปแบบของที่นอนแมวแล้ว พบว่าผ้าผืนที่แมวมีพฤติกรรมตอบสนองมากที่สุดคือผ้าตัวอย่างที่ผลิตจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และทอด้วยโครงสร้างการทอที่ให้ผิวสัมผัสที่ขรุขระเล็กน้อย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนการนำเสนอผลงานในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Bishop, D. P. 1996. Fabrics: Sensory and mechanical properties. Text. Prog. 26(3): 1–62. doi.org/10.1080/00405169608688866

Brojeswari Das, N. V. P., Jagannathan K, B. Hubballi, Subhas V. N. 2017. Studies on handle behaviour of eri silk / wool blended fabrics developed for winter wear application. Procedia Eng. 200: 53–60. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.009

Das, B., Padaki, N. V., Jaganathan, K., Ashoka, H. M. 2021. Comparative studies on thermal comfort properties of eri silk, mulberry silk, wool and linen fibres. J. Inst. Eng. 102(1): 145–154. doi.org/10.1007/s40034-021-00208-2

Desforges, E. J., Moesta, A., Farnworth, M. J. 2016. Effect of a shelf-furnished screen on space utilisation and social behaviour of indoor group-housed cats (Felis silvestris catus). Appl. Anim. Behav. Sci. 178. 60–68. doi.org/10.1016/j.applanim.2016.03.006

Ellis, J. J., Stryhn, H., Cockram, M. S. 2021. Effects of the provision of a hiding box or shelf on the behaviour and faecal glucocorticoid metabolites of bold and shy cats housed in single cages. Appl. Anim. Behav. Sci. 236. doi.org/10.1016/j.applanim.2021.105221

Farnworth, M. J. 2015. Cats have many lives: Applying behaviour to explore the cat-human relationship. Appl. Anim. Behav. Sci. 173: 1–2. doi.org/10.1016/j.applanim.2015.08.029

June McNicholas, A. G., Rennie, A., Ahmedzai, S., Dono, J.-A., Ormerod, E. 2005. Pet ownership and human health: a brief review of evidence and issues. Education and debate. 331: 1252–1254.

McNicholas, J. 2014. The role of pets in the lives of older people: A review. Work. Older People. 18(3), 128–133. doi.org/10.1108/wwop-06-2014-0014

Moore, A. M., Bain, M. J. 2013. Evaluation of the addition of in-cage hiding structures and toys and timing of administration of behavioral assessments with newly relinquished shelter cats. J Vet Behav. 8(6): 450–457. doi.org/10.1016/j.jveb.2011.10.003

Postle, R., Dhingra. R. C. 1989. Mesuring and interpreting low-stress fabric mechanical and surface properties, Part III: optimization of fabric properties for men’s suiting materials. Tex. Res. J. 59: 448-459

Rossi, A. P., Dos Santos, C. R. C., Maia, C. M., Terzian, C. C. B., Predebon, D. F., de Queiroz, J. S. C., …Correa, T. M. 2021. Rescued cats prefer to scratch fabrics commonly used to cover upholstered furniture. J Appl Anim Welf Sci: 1–12. doi.org/10.1080/10888705.2021.1949595

Stoneburner, R. M., Naughton, B., Sherman, B., Mathews, K. G. 2021. Evaluation of a stimulus attenuation strategy to reduce stress in hospitalized cats. J Vet Behav. 41: 33–38. doi.org/10.1016/j.jveb.2020.07.008

Sueo Kawabata, M. N. 1995. In modern textile characterization methods (1st ed., pp. 329–354). Marcel Dekker Inc. https://doi.org/10.1201/9780203746684

ผลของใยอาหารจากส้มต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืช

Effect of citrus fiber on the physiochemical properties of plant-based meat analog burgers

ปภาวริน หล่อลีฬหา, **ปิติพร ฤทธิเรืองเดช***, **นันทวัน เทอดไทย**

Papawarin Lowleraha, Pitiporn Ritthiruangdej*, Nantawan Therdthai

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pitiporn.r@ku.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสนใจผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช (PBMA) ซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารจากพืชมากขึ้น ความท้าทายในงานวิจัยเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ PBMA คือการทำให้มีความคล้ายกับผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ และทำให้ผลิตภัณฑ์ PBMA ตัวใหม่ช่วยเพิ่มการบริโภคใยอาหาร ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของเบอร์เกอร์ PBMA ที่มีส่วนผสมของใยอาหารจากส้ม (CF) และโปรตีนเกษตร (TSP) ทางการค้า 4 อัตราส่วน (0:100, 5:95, 10:90, 15:85) ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ TSP ด้วย CF สามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการได้ว่าเบอร์เกอร์ PBMA มี "ใยอาหารสูง" (> 6 กรัมต่อ 100 กรัม) และยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการอบได้แก่ moisture retention และ baking yield นอกจากนี้เมื่อปริมาณของ CF เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า pH, L*, hardness, cohesiveness, และspringiness เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า CF สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืช เพื่อเสริมเส้นใยและลดไขมัน และปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสให้แก่ผลิตภัณฑ์
คำสำคัญ: เนื้อเทียมจากพืช, เบอร์เกอร์, ใยอาหารจากส้ม

Abstract

Nowadays, consumers are increasingly interested in plant-based meat analogs (PBMA), one of the plant-based food products. The challenge in research on PBMA products is to make them similar to meat products, and a new generation of PBMA attempts to boost dietary fiber consumption. The present study investigated the physicochemical characteristics of fibrous PBMA burgers comprised of citrus fiber (CF) and textured soy protein (TSP) with four ratios (0:100, 5:95, 10:90, 15:85). The results reviewed that replacing TSP with CF is enough to justify a “high fiber” nutrition claim (> 6g per 100g) in PBMA burgers. Baking properties such as moisture retention and baking yield also improved. Furthermore, as the percentage of CF increased, pH, L*, hardness, cohesiveness, and springiness of PBMA burgers significantly increased ($p < 0.05$). This research indicated that CF could be used as an ingredient in PBMA burgers to enhance fiber, reduce fat content and improve texture quality.
Keywords: burgers, citrus fiber, plant-based meat analog

คำนำ

เนื้อเทียมจากพืช (Plant-based meat analogs, PBMA) เป็นจุดเปลี่ยนที่สำคัญของวงการอุตสาหกรรมอาหารในปัจจุบันอย่างมาก จากการใช้วัตถุดิบจากพืชที่มีโปรตีนสูงแทนเนื้อสัตว์เพื่อตอบโจทย์วิถีชีวิตของผู้บริโภคที่หันมาให้ความสำคัญกับสุขภาพและสิ่งแวดล้อม รวมถึงโรคอุบัติใหม่ในสัตว์มากขึ้น โดยใช้กระบวนการแปรรูปพืชให้มีความใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์ทั้งผิวสัมผัสและรสชาติ มีคุณสมบัติที่สำคัญคือไม่ใส่สารเคมี มีส่วนประกอบของพืช ลดมัน ลดเค็ม ลดหวาน มีความหลากหลาย สะดวกพร้อมรับประทาน และดีต่อสุขภาพของผู้บริโภค ในตลาดอาหารของไทยนำเนื้อเทียมจากพืชมาเป็นส่วนผสมในการทำแฮมเบอร์เกอร์ โบโลน่า นักเก็ต เนื้อสับ และเนื้อปรุงรส (รสสุคนธ์, 2564)

ตลาดเนื้อเบอร์เกอร์จากพืชคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณ โดยมีอัตราการเติบโตต่อปีมากกว่า 22% ในระหว่างปี ค.ศ. 2020 ถึง 2030 (FMI, 2020) แม้ว่าตลาดเบอร์เกอร์จากพืชทั่วโลกนั้นเริ่มต้นจากกลุ่มเป้าหมายที่เฉพาะกลุ่ม เช่น มังสวิรัติ และมังสวิรัติแบบยืดหยุ่น แต่ ณ ปัจจุบันเริ่มเติบโตเป็นอุตสาหกรรมกระแสหลักที่เพิ่มการยอมรับจากผู้ที่บริโภคทั้งพืชและเนื้อสัตว์ โดยเนื้อเบอร์เกอร์จากพืชต้องได้รับการออกแบบให้มีคุณสมบัติทั้งทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัส ให้ใกล้เคียงกับเนื้อเบอร์เกอร์ดั้งเดิม หมายความว่าผลิตภัณฑ์นี้ควรเลียนแบบรูปลักษณ์ เนื้อสัมผัส ความรู้สึกภายในปาก รสชาติ ของเนื้อเบอร์เกอร์ดั้งเดิม (He et al., 2020; Lee et al., 2020) ซึ่งเนื้อเบอร์เกอร์จากพืชเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่ทำมาจากส่วนประกอบหลัก คือ โปรตีน เช่น โปรตีนเกษตร ถั่วเหลือง ถั่ว เป็นต้น (Hoek et al., 2011) โปรตีนจากพืชถูกใช้เป็นส่วนประกอบหลักสำหรับทำเนื้อเบอร์เกอร์จากพืช และโปรตีนถั่วเหลืองเป็นโปรตีนที่ใช้บ่อยที่สุด (Pietsch et al., 2019) มีคุณสมบัติการเกิดเจลที่ดีทำให้เกิดเมทริกซ์โครงสร้างที่สอดประสานกันเป็นเส้นใย (Schreuders et al., 2019) และยังมีสมบัติเชิงหน้าที่อื่นๆ อีก เช่น การเกิดฟอง การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน การดูดซับน้ำและน้ำมัน และความสามารถในการกระจายความหนืด (Li et al., 2020) อย่างไรก็ตามโปรตีนจากถั่วเหลืองยังมีข้อจำกัดอยู่ คือ กลิ่นถั่วที่ไม่พึงประสงค์ มีสารก่อภูมิแพ้สูง และมีเมทไธโอนีนที่เป็นกรดอะมิโนที่จำกัด จึงจำเป็นต้องมีการทดแทนโปรตีนถั่วเหลืองบางส่วนหรือทั้งหมดด้วยวัตถุดิบอย่างอื่น เพื่อให้ได้รสชาติที่อ่อนลง หรือเผ็ดขึ้น รวมถึงสารที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดีขึ้น (Lu et al., 2022)

สภาวะสังคมในปัจจุบันมีการขยายตัวในด้านของเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมมากขึ้น ส่งผลให้ประชากรดำเนินชีวิตด้วยความเร่งรีบมีการแข่งขันสูง ความนิยมในการบริโภคอาหารแบบตะวันตกมากขึ้นเพราะให้ความสะดวกสบาย รับประทานง่าย และรสชาติถูกปาก จึงส่งผลให้ได้รับสารอาหารที่มีคุณค่าต่อร่างกายไม่เพียงพอตามข้อแนะนำของ Thai Recommended Daily Intake (Thai RDI) ซึ่งกำหนดว่าควรบริโภคใยอาหารในปริมาณ 25-30 กรัมต่อวัน (สำนักคณะกรรมการอาหารและยา, 2001) ซึ่งการบริโภคใยอาหารมีบทบาทสำคัญในการป้องกันการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคท้องผูก ภาวะไขมันในเลือดสูง โรคหลอดเลือดหัวใจ และโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ โดยแหล่งอาหารที่มีปริมาณใยอาหารสูง คือ เมล็ดธัญพืช ผัก และผลไม้ เป็นต้น

ใยอาหารที่เริ่มเป็นที่สนใจ คือ ใยอาหารจากเปลือกส้ม (Citrus fiber, CF) เป็นใยอาหารคุณภาพสูงที่สกัดมาจากเปลือกส้มประกอบด้วยเส้นใยที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ฟลาโวนอยด์ โพลีฟีนอล และวิตามินซี ในปัจจุบันเริ่มมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำ เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ความเป็นเจล การกักเก็บน้ำมัน และการทำให้ข้นหนืด ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับการใช้ใยอาหารจากส้มจะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงคุณลักษณะคุณภาพของเนื้อสัตว์ (Gedikoglu et al., 2019; Petridis et al., 2013)

ความท้าทายในงานวิจัยเกี่ยวกับเนื้อเทียมจากพืช คือ การทำให้มีลักษณะคล้ายกับผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์มากที่สุด และทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชตัวใหม่ช่วยเพิ่มการบริโภคใยอาหารให้แก่ผู้บริโภค ดังนั้นวัตถุประสงค์ของ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างใยอาหารจากส้มและโปรตีนเกษตรทางการค้า 4 อัตราส่วน (0:100, 5:95, 10:90, 15:85) ต่อสมบัติด้านเคมีและสมบัติด้านกายภาพ (สีและเนื้อสัมผัส) ของเนื้อเบอร์เกอร์จากพืช

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

โปรตีนเกษตร (สถาบันวิจัยค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์), ใยอาหารจากเปลือกส้มทางการค้า ได้รับความอนุเคราะห์ให้การสนับสนุนจาก บริษัท DKSH (ประเทศไทย) จำกัด, คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส(กรุงเทพเคมีภัณฑ์), เกลือป่น(บริษัท ปรุงทิพย์ จำกัด), พริกไทยดำ(บริษัท ผึ้งหลวง จำกัด), ผงปรุงรสปาปริก้า(บริษัท อาร์ แอนด์ บี ฟู้ด จำกัด), น้ำมันทานตะวัน(บริษัท ล่ำสูง จำกัด)

การวางแผนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการแทนที่โปรตีนเกษตรด้วยใยอาหารจากส้มทางการค้า (CF) ต่อสมบัติด้านเคมี (ค่า pH และองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ) และสมบัติด้านกายภาพ (สีและเนื้อสัมผัส) ของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืช วางแผนการทดลองแบบ Randomized Completely Block Design (RCBD) โดยกำหนดให้ สิ่งทดลอง (Treatment) คือ ปริมาณ CF ที่ใช้แทนที่โปรตีนเกษตร 4 ระดับ ได้แก่ 0, 5, 10 และ 15% และ บล็อก (Block) คือ ชิ้นเบอร์เกอร์เนื้อเทียมโปรตีนพืช ซึ่งสูตรพื้นฐานของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชมีส่วนประกอบ ดังนี้ โปรตีนเกษตรทางการค้า 25.0 กรัม น้ำ 62.0 กรัม น้ำมันทานตะวัน 9.5 กรัม ผงปาปริก้า 1.5 กรัม คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส 1.0 กรัม เกลือ 0.5 กรัม และพริกไทยดำ 0.5 กรัม ในกระบวนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากนำโปรตีนเกษตรผสมด้วย CF และคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส ให้เข้ากันแล้วเติมน้ำเย็นแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง (20-25 $^{\circ}$C) จากนั้นนำไปปั่นผสมด้วยเครื่องปั่น (Philips, HR 2011, Thailand) ความเร็วระดับสอง เป็นเวลา 60 วินาที แล้วเติมน้ำมันทานตะวัน เกลือ พริกไทยดำ และผงปรุงรสปาปริก้าแล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นขึ้นรูปทรงกลมในแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 98 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร น้ำหนักชิ้นละ 30 กรัม วางบนกระดาษรองอบแล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน (HD4B-B, Kluaynamthai Kitchen, Thailand) ที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 14 นาที (ด้านละ 7 นาที) จากนั้นวางบนตะแกรงที่อุณหภูมิห้อง 30 นาทีแล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

การวิเคราะห์สมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธีการของ AOAC (2000) และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตจาก 100 ลบด้วยผลรวมของปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และปริมาณเส้นใยหยาบ, วิเคราะห์ค่า pH ที่อุณหภูมิห้อง (20–25°C) โดยใช้เครื่อง pH meter (SevenGo, Metler Toledo, Schwerzenbach, Switzerland), วิเคราะห์ค่าสี ระบบ CIE L*a*b* ของเนื้อเบอร์เกอร์จากพืช โดยเครื่อง Spectophotometer (Ultrascan pro, Konica Minolta, United Stage) กำหนดแหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมองในการวัด 10° แล้วบันทึกค่า L* (ค่าความสว่างมีค่าอยู่ระหว่าง 0-100), a* (เครื่องหมาย + แสดงถึงสีแดง และเครื่องหมาย - แสดงถึงสีเขียว) และ b* (เครื่องหมาย + แสดงถึงสีเหลือง และเครื่องหมาย - แสดงถึงสีน้ำเงิน) และวิเคราะห์ด้านเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom) โดยใช้วิธี Texture profile analysis (TPA) และหัววัดแบบ SMP P/75, 25 kg load cell, compressed 30%, head speed 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

บันทึกค่า Hardness (N), Cohesiveness, Springiness (mm) และ Chewiness (Nmm) และวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนด้วยวิธี Shearing test ด้วยเครื่อง (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom) ใช้หัววัดแบบ Wamer-Blazler Blade: HDP/BSW, ความเร็ว 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที, ระยะห่าง 40 มิลลิเมตร บันทึกค่า Shearing force(N)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลค่าสมบัติทางเคมีและกายภาพมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan’s Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของตัวอย่างเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชที่แทนที่โปรตีนเกษตรทางการค้าด้วย CF ในระดับที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาพบว่าการแทนที่โปรตีนเกษตรด้วย CF ส่งผลให้ปริมาณไขมันและปริมาณโปรตีนลดลง ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการแทนที่โปรตีนเกษตรด้วย 15%CF พบว่าเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชมีปริมาณโปรตีน 4.45 กรัม/100กรัม ซึ่งยังอยู่ในช่วงปริมาณโปรตีนของเนื้อเบอร์เกอร์จากพืชทางการค้าที่จำหน่ายทั่วไปในสหราชอาณาจักร (มีค่าอยู่ระหว่าง 3.2–33 กรัม/100กรัม ปริมาณโปรตีนเฉลี่ย 11.1 กรัม/100กรัม) (Alessandrini et al., 2021) โดยทั่วไปเนื้อเบอร์เกอร์จากพืชมีโปรตีนน้อยกว่าเนื้อเบอร์เกอร์ที่มีส่วนผสมของเนื้อสัตว์ ซึ่งผู้บริโภคจำนวนมากมองว่าผลิตภัณฑ์จากพืชเป็นการจำกัดการบริโภคเนื้อสัตว์ (Curtain et al., 2019) ตามรายงานของ EFSANDA Panel (2012) ในยุโรปการบริโภคโปรตีนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.83 กรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัวต่อวัน ในทางกลับกันการบริโภคใยอาหารคาดว่าจะต่ำกว่าปริมาณที่แนะนำ ซึ่งควรบริโภคใยอาหาร 25-35 กรัม/วัน (EFSA, 2010) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 1 พบว่าการแทนที่โปรตีนเกษตรด้วย CF ทำให้เบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชมีปริมาณใยอาหารอยู่ในช่วง 12.90-33.46 กรัม/100 กรัม ดังนั้นเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชที่แทนที่โปรตีนเกษตรทางการค้าด้วย CF จึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ช่วยให้ผู้บริโภคได้รับใยอาหารมากขึ้น ซึ่งปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากสูตรควบคุม (0%CF) จึงสามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการได้ว่าเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชนี้มี "ใยอาหารสูง" (>6 กรัมต่อ 100 กรัม) (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 182, 2541)

Table 1 Chemical compositions (%dry basis) of cooked plant-based meat analog burgers formulated with different levels of citrus fiber (CF).

Chemical composition (%)	0% CF	5% CF	10% CF	15% CF
Moisture	43.95±0.64^{d}	47.09±0.87^{c}	53.35±0.28^{b}	54.83±0.61^{a}
Protein	19.49±0.08^{a}	14.33±0.07^{b}	10.00±0.14^{c}	4.45±0.07^{d}
Fat	10.56±0.42^{a}	7.78±0.16^{b}	5.52±0.39^{c}	4.41±0.03^{d}
Fiber	4.67±0.48^{d}	12.90±0.10^{c}	24.21±0.84^{b}	33.46±0.56^{a}
Ash	3.86±0.11^{a}	3.37±0.07^{b}	2.62±0.07^{c}	2.48±0.20^{c}
Carbohydrate	22.14±0.08^{d}	27.43±0.71^{c}	28.50±0.79^{b}	33.83±0.70^{a}

$^{a-d}$Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

สีเป็นหนึ่งในคุณลักษณะที่สำคัญของอาหาร และมีอิทธิพลต่อการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค (Kamani et al., 2019) จากตารางที่ 2 แสดงค่าการวัดค่าสี L*, a*, b* ของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืช ซึ่งการเติม CF ส่งผลทำให้ค่าสี L* (ค่าความสว่าง) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$) เนื่องจากสีของ CF ที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีสีขาวและเป็นผล

จากการดูดซึมน้ำของเส้นใยในระหว่างกระบวนการ Dehydration (Slowinski et al., 2021) โดยเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชมีค่า L* อยู่ที่ 58.89–61.00 ทั้งนี้การเพิ่ม CF ยังส่งผลให้ค่าสี a* (สีแดง) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$) เนื่องจากการลดปริมาณโปรตีนเกษตรส่งผลทำให้ส่วนผสมของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชมีปริมาณกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์น้อยลง จึงมีโอกาสช่วยลดการเกิดปฏิกิริยา Maillard reaction และ Caramelization (Sabanis et al., 2009)

นักวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้องการให้อาหารที่ทำมาจากพืชมีค่า pH ที่เป็นกรดมากขึ้น เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและป้องกันการเน่าเสีย เนื่องจากค่า pH ใกล้ 7 (เป็นกลาง) ร่วมกับปริมาณความชื้นที่สูงในเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชทำให้เกิดสภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการเติบโตของจุลินทรีย์และการเน่าเสียให้เกิดเร็วขึ้น (Toth et al., 2021) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2 พบว่าการเพิ่มปริมาณ CF ไม่ส่งผลต่อค่า pH ($p > 0.05$) โดยเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชมีค่า pH อยู่ระหว่าง 5.99–6.06 ซึ่งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เนื้อเบอร์เกอร์ที่ทำมาจากเนื้อสัตว์ (pH = 5.50) (De Marchi et al., 2021)

Table 2 Color L*, a*, b* and pH values of cooked plant-based meat analog burgers formulated with different levels of citrus fiber (CF).

Parameters	0% CF	5% CF	10% CF	15% CF
L*	58.89±0.37^{b}	61.74±0.62^{a}	61.72±0.52^{a}	61.00±0.66^{a}
a*	10.30±0.28^{a}	9.49±0.28^{b}	8.72±0.45^{bc}	8.94±0.23^{c}
b*	24.92±0.51^{a}	24.53±0.39^{a}	23.83±1.04^{a}	25.52±1.34^{a}
pH	5.99±0.05^{a}	6.00±0.03^{a}	6.04±0.07^{a}	6.06±0.05^{a}

$^{a-c}$Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

Table 3 Baking yield and texture properties of cooked plant-based meat analog burgers formulated with different levels of citrus fiber (CF).

Parameters	0% CF	5% CF	10% CF	15% CF
Baking yield (%)	67.19±0.18^{d}	68.66±0.30^{c}	75.24±0.21^{b}	77.59±0.18^{a}
Hardness (N)	79.92±7.53^{d}	138.14±16.07^{c}	178.18±34.71^{b}	239.65±16.73^{a}
Cohesiveness	0.65±0.01^{c}	0.69±0.01^{b}	0.69±0.02^{b}	0.73±0.02^{a}
Springiness (mm)	0.72±0.08^{c}	0.78±0.03^{b}	0.81±0.02^{ab}	0.84±0.04^{a}
Chewiness (Nmm)	76.52±10.62^{c}	77.39±10.17^{c}	103.50±24.73^{b}	135.13±40.8^{a}
Shear force (N)	1.56±0.14^{d}	2.25±0.02^{c}	2.76±0.41^{b}	3.45±0.17^{a}

$^{a-d}$Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3 พบว่าการเพิ่ม CF ในสูตรของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของ Baking yield โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 67.19–77.59% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Serdaroglu et al., (2018)) ที่ศึกษาการเสริมใยอาหารในเนื้อเบอร์เกอร์ด้วยใยอาหารจากฟักทอง และเมื่อพิจารณาในส่วนการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างสูตรควบคุม (0% CF) และสูตรที่เพิ่ม CF โดยค่า Hardness, Cohesiveness, Springiness และ Chewiness มีค่าเพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากการจับกันระหว่างเส้นใยอาหารที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการแช่โปรตีนเกษตรและใยอาหารจากส้มในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ เนื่องจากเส้นใยอาหารมีคุณสมบัติดูดซึมน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้ดีจึงส่งผลให้เกิดการพองตัวและเส้นใยประสานกันเกิดเป็นตาข่ายในลักษณะคล้ายเจล (Lundberg et al., 2014) นอกจากนี้การเพิ่ม CF ยังส่งผลให้ค่าแรงเฉือน (Shear force) สูงขึ้น ซึ่งค่านี้บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนียว (Toughness) ของผลิตภัณฑ์ (Novakovi et al., 2017)

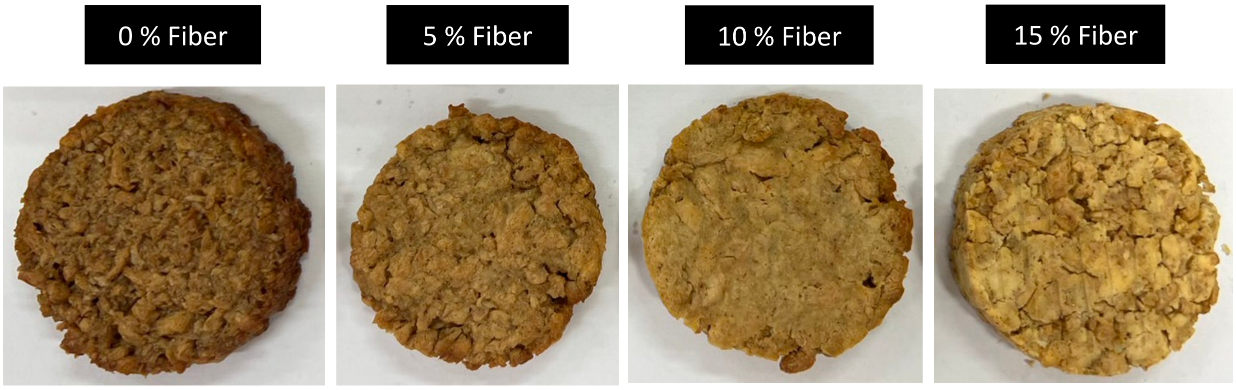


Fig 1. Images of cooked plant-based meat analog burgers formulated with different levels of citrus fiber (CF).

สรุป

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า CF สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการ และสมบัติทางเทคโนโลยีของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชได้ โดยส่งผลให้ค่าปริมาณไขมันและปริมาณโปรตีนลดลง ในทางกลับกันปริมาณใยอาหารและคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น ซึ่งการแทนที่โปรตีนเกษตรด้วย CF ยังสามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการได้ว่าเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชมี "ใยอาหารสูง" (> 6 กรัมต่อ 100 กรัม) นอกจากนี้การเพิ่ม CF ยังช่วยเพิ่มสมบัติการอบของเบอร์เกอร์เนื้อเทียมจากพืชโดยเพิ่ม Baking yield และยังส่งผลทำให้ค่า pH, L*, b*, Hardness, Cohesiveness, Springiness และ Chewiness เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า a* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสในด้านความชอบและการยอมรับเพื่อหาระดับที่เหมาะสมในการแทนที่โปรตีนเกษตรด้วย CF

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 61 และขอบคุณบริษัท DKSH (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ใยอาหารจากส้มทางการค้าในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ. 2541 เรื่อง ฉลากโภชนาการ. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 115 ตอนที่ 47 ง (ลงวันที่ 11 มิถุนายน 2541).

รสสุคนธ์ ศึกษานภาพัฒน์, พรทิพย์ ติ๊บศรี, ดวงทิพย์ ศิริกาญจนารักษ์. 2564. Plant-based Meat เทรนด์อาหารโลกยกระดับอุตสาหกรรมอาหารภูมิภาค. บทความเศรษฐกิจภูมิภาค ธนาคารแห่งประเทศไทย.

หยาดฝน ทนงการกิจ. 2557. การใช้ประโยชน์จากเศษผักผลไม้เหลือทิ้งเพื่อผลิตเป็นใยอาหารผง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยสยาม. กรุงเทพมหานคร: 31–38.

สำนักคณะกรรมการอาหารและยา. กระทรวงสาธารณสุข. 2548. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 293).

Alessandrini. R., Brown. M., Pombo-Rodrigues, S., et al. 2021. Nutritional quality of plant-based meat products available in the UK: A cross-sectional survey. Nutrients. 13(4225).

Curtain, F., Grafenauer, S. 2019. Plant-based meat substitutes in the flexitarian age: An audit of products on the supermarket shelves. Nutrients. 11(2603): 1–14.

De Marchi, M., Costa, A., Pozza, M., et al. 2021. Detailed characterization of plant-based burgers. Sci. Rep. 11(1): 1–9.

EFSA. (2010). Scientific opinion on dietary reference values for carbohydrates and dietary fibre.pdf.

Kamani, M., Meera, M., Bhaskar, N., et al. 2019. Partial and total replacement of meat by plant-based proteins in chicken sausage: Evaluation of mechanical, physico-chemical and sensory characteristics. J. Food Sci. Technol. 56(5): 2660–2669.

Martinez. C., Martos. M., Lopez. J., et al. 2022. Development of plant- based burgers using gelled emulsions as fat source and beetroot juice as colorant: Effects on chemical, appearance and sensory characteristics. LWT. (114193).

Novakovi, S., & Tomasevi, I. 2017. A comparison between warner-bratzler shear force measurement and texture profile analysis of meat and meat products: a review A comparison between warner-bratzler shear force measurement and texture profile analysis of meat and meat products. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 85(012063).

Powell, M., Sebranek, J., Prusa, K., et al. 2019. Evaluation of citrus fiber as a natural replacer of sodium phosphate in alternatively-cured all-pork Bologna sausage. Meat Sci.157(107883).

Sabanis, D., Lebesi, D., &Tzia, C. 2009. Effect of dietary fibre enrichment on selected properties of gluten-free bread. LWT- Food Sci. Technol. 42(8): 1330–1389

Serdaroglu, M., Kavusan, H., Ipek, G., et al. 2018. Evaluation of the quality of beef patties formulated with dried pumpkin pulp and seed. Korean J Food Sci Anim Resour. 38(1): 1–13.

Slowinski, M., Miazek, J., Dasiewicz, K., et al. 2021. The effect of the addition of fiber preparations on the cololr medium-grounded pasteurized and sterilized model canned meat products. Molecules. 26(2247).

Toth, A., Dunay, A., Battay, M., et al. 2021. Microbial spoilage of plant-based neat analogues. Appl. Sci. 11(8309).

Twarogowka, A., Droogenbroeck, B., Fraeye, I. 2022. Application of Belgian endive (*Cichorium intybus* var. *foliosum*) dietary fiber concentrate to improve nutritional value and function properties of plant-based burgers. Food Biosci. 48(101825).

Viuda-Martos, M., Ruiz-Navajas, J., Fernandez-Lopez, J., et al. 2010. Effect of added citrus fibre and spice essential oils on quality characteristics and shelf-life of mortadella. Meat Sci. 85(3): 568–576.

Wu, Q., Zang, M., Zhao, B., et al. 2022. Effect of citrus fiber on the phosphate-mediated gel properties of myofibrillar protein and partial replacement of phosphate. Food Sci. Technol. 173(114274).

การศึกษาด้านบุคลิกภาพที่มีผลต่อพฤติกรรมการเลือกรูปแบบการตกแต่ง และกลุ่มสีของชุดผ้าไหมกับกลุ่มผู้บริโภคผู้หญิงเจนเนอเรชั่นวายในเขตกรุงเทพมหานคร

A study of personality factors affecting the selection behavior of decorative patterns and color groups of silk garments with generation Y female consumers in Bangkok

นิชดา ตู้จินดา*, กฤตินี ประเสริฐพร, นนทพร หล่อเรืองศิลป์, เจนจิรา เหลืองวัฒนะ, พรรณภัทร พรหมเพ็ญ, พิธาลัย ผู้พัฒน์

Nichada Tujinda*, Krittinee Prasertporn, Nonatporn Hloreangsil, Janejira Luangwattana, Phannaphat Phromphen, Pithalai Phoophat

ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: nichada.tujin@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาความเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีบุคลิกภาพ 5 องค์ประกอบจากทฤษฎีของคอสตาและแมครกับกลุ่มสีจากทฤษฎีสีโคบายาชิ และเทคนิคการตกแต่งผ้าไหมที่เหมาะสมกับกลุ่มผู้บริโภคผู้หญิงเจนเนอเรชั่นวาย ในเขตกรุงเทพมหานคร โดยใช้แบบสอบถามปลายปิดเพื่อจำแนกบุคลิกภาพ กลุ่มสี และเทคนิคการตกแต่งผ้าไหมของกลุ่มตัวอย่าง 205 คน ข้อมูลที่ได้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้สถิติทั้งเชิงพรรณนาและเชิงอนุมาน จากผลการวิจัยพบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีบุคลิกภาพเปิดรับประสบการณ์ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับสีกลุ่มสมัยใหม่และการตกแต่งแบบแพชเวิร์ค จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับผู้ประกอบการสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อตอบสนองความต้องการกลุ่มผู้บริโภค และเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่ากับผลิตภัณฑ์เครื่องแต่งกายผ้าไหม

คำสำคัญ: กลุ่มสี, เจเนอเรชั่นวาย, เทคนิคการตกแต่ง, บุคลิกภาพ, ผ้าไหม

Abstract

The purpose of this research was to study the relationship between the five-factor model of personality by Costa and McCrae, Kobayashi's color image scale, and silk decoration technique that were suitable for generation Y female consumers in Bangkok. This research was carried out by a closed-end questionnaire in order to identify the personality and the preference of color group and silk decoration techniques from 205 participants. The data was analyzed by the descriptive statistics and the inferential statistics. It was found that most of the participants was the 'Openness to experience' personality and related to the modern color image scale of Kobayashi's theory and patchwork technique. This research might be a preliminary information for entrepreneurs and this is the alternative way to add value to silk apparel products.

Keywords: color image scale, decoration technique, generation y, silk fabric

คำนำ

ในปัจจุบันกลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นวายมีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากมีสัดส่วนมากที่สุดในประเทศเมื่อเทียบกับเจเนอเรชั่นอื่นๆ เป็นเจเนอเรชั่นที่มีความสำคัญ อิทธิพลต่อสังคม และเป็นกลุ่มคนที่มีผลต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เปิดกว้างทางความคิดและวัฒนธรรม กล้าแสดงออก มีความมั่นใจในตนเอง สามารถตัดสินใจเองและมีกำลังซื้อสูง

ทฤษฎีบุคลิกภาพห้าองค์ประกอบของคอสตาและแมคเคร (Five-factor model of personality) (Costa & McCrea, 1992) จะมีลักษณะเป็นกลุ่มของคุณลักษณะประจำตัวของมนุษย์ที่มักจะเกิดด้วยกัน โดยเป็นการให้คำจำกัดความขององค์ประกอบทั้งห้าเป็นความพยายามที่จะอธิบายส่วนสำคัญร่วมกันของคุณลักษณะเหล่านี้มีลักษณะดังต่อไปนี้: (1) บุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์ (Openness) ลักษณะบุคลิกภาพของคนกลุ่มนี้มักจะมีจินตนาการสร้างสรรค์ คิดสิ่งใหม่ ชอบความหลากหลาย; (2) บุคลิกภาพการมุ่งมั่นสู่ความสำเร็จ (Conscientiousness) ลักษณะบุคลิกภาพของคนกลุ่มนี้มักจะมีระบบ ระเบียบ แสวงหาความสำเร็จ และมีวินัยในตนเอง; (3) บุคลิกภาพแสดงตัว (Extraversion) ลักษณะบุคลิกภาพของคนกลุ่มนี้จะเป็นคน รักสนุก กระฉับกระเฉง กระตือรือร้น และชอบการเข้าสังคม; (4) บุคลิกภาพการเข้ากับผู้อื่นได้ดี (Agreeableness) ลักษณะบุคลิกภาพของคนกลุ่มนี้จะช่างฝัน มีเมตา มักเห็นตามผู้อื่นและปฏิบัติตามธรรมเนียมที่สืบต่อกันมา ชอบจับเล็กผสมน้อย; และ (5) บุคลิกภาพความอ่อนไหวทางอารมณ์ (Neuroticism) ลักษณะบุคลิกภาพของคนกลุ่มนี้มักไว้วางใจผู้อื่น อ่อนน้อมถ่อมตน และไม่ค่อยมีความเชื่อมั่นในตนเอง ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นได้มีนักการตลาดใช้จุดเด่นของแต่บุคลิกภาพเพื่อทำการสื่อสารการตลาดให้ครงกับลูกค้ากลุ่มเป้าหมาย (ถวัลรัตน์ กัลชาญกิจ และธาตรี ใต้ฟ้าพูล, 2016)

ทฤษฎีสีโคบายาชิ (Kobayashi’s color image scale) เป็นการจัดกลุ่มสีเพื่อเป็นตัวแทนสีของภาพนั้น สามารถแสดงอารมณ์ ความรู้สึกของภาพที่ซับซ้อนและละเอียดอ่อนได้ดีกว่าการใช้ตัวแทนสีเดียว เพื่อใช้เทียบชุดสีกับค่าสีในตารางเพื่อทราบความหมายของสีในเชิงจิตวิทยาสีกับความรู้สึก (คณากาญจน์ และคณะ, 2563) โดยจะบัญญัติคำศัพท์ที่สื่อความหมายที่แสดงแทนบุคลิกภาพ อารมณ์ และความรู้สึก เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับงานออกแบบซึ่งมีการแบ่งหมวดหมู่ของสีที่เหมาะสมกับบุคลิกภาพ 8 บุคลิกภาพหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แก่: (1) บุคลิกภาพชวนฝัน (Romantic); (2) บุคลิกภาพสมัยใหม่ (Modern); (3) บุคลิกภาพเลอเลิศ (Dandy); (4)บุคลิกภาพคลาสสิก (Classic); (5)บุคลิกภาพสบายๆ (Casual); (6)บุคลิกภาพความเป็นธรรมชาติ (Natural); (7)บุคลิกภาพสง่างาม (Elegant); และ (8)บุคลิกภาพแบบทันสมัย (Chic) ดังแสดงใน Fig. 1 นอกจากนี้ยังมีการแบ่งรูปแบบการใช้ชีวิตของมนุษย์ (Life Style) ออกเป็น 15 หมวด โดยแต่ละหมวดจะแยกย่อยลงไปอีกรวมทั้งหมด 180 คำ ซึ่งมีตัวอย่างการนำเอาการจัดกลุ่มสีไปใช้ในงานออกแบบเพื่อสื่อดิจิทัลใช้กับสินค้าหมวดสำหรับเพศหญิงและเพศชาย เป็นต้น (กณิกนันต์ อุดมสิน, 2560)

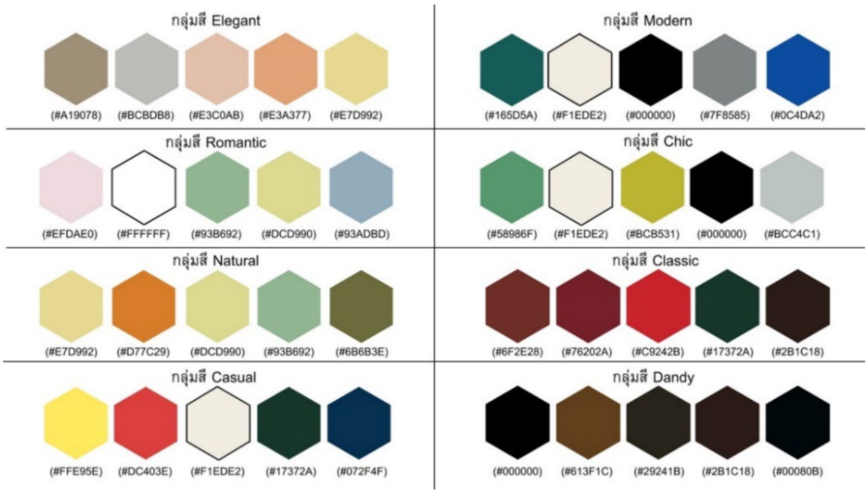


Fig. 1 Examples of color groups in the questionnaire.

การตกแต่งผ้า คือ วิธีการในรูปแบบต่างๆที่ทำกับผ้า โดยสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบของผ้าผืนและชิ้นส่วนของเครื่องแต่งกาย มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสวยงาม ฟังก์ชันการใช้งานนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าและผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ตัวอย่างรูปแบบการตกแต่ง ได้แก่ การเย็บ Patchwork, Quilt, Silky grooves, การมัดย้อม, การพิมพ์, ผ้าไหมพื้น 2 เส้น, ผ้าไหมพื้น 4 เส้น, การเย็บเทปตกแต่ง, การอัดพลีท, เย็บSmock, เย็บเกร็ด, เย็บปัก, การฉลุ (กรมส่งเสริมวัฒนธรรม ,2563)

กลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นวาย คือ กลุ่มคนที่เกิดในช่วงพ.ศ. 2524–2543 ซึ่งมีสัดส่วนมากที่สุดในประเทศเมื่อเทียบกับเจเนอเรชั่นอื่นๆ เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่มีความสำคัญ มีอิทธิพลต่อสังคม และเป็นกลุ่มคนที่มีผลต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ มีแนวคิดเปิดกว้างทางความคิดและวัฒนธรรม กล้าแสดงออก มีความมั่นใจในตนเอง สามารถตัดสินใจเองและมีกำลังซื้อสูง (Economic Intelligence Center, 2557)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการหาความเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีบุคลิกภาพ 5 องค์ประกอบกับกลุ่มสีจากทฤษฎีสีโคบายาชิ และเทคนิคการตกแต่งผ้าไหมที่มีเหมาะสมกับกลุ่มผู้บริโภคผู้หญิงเจนเนอเรชั่นวาย ในเขตกรุงเทพมหานครเพื่อนำข้อมูลมาเป็นแนวทางในการออกแบบชุดที่มีความเหมาะสมกับผู้หญิงในแต่ละกลุ่มที่มีบุคลิกภาพที่แตกต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลครั้งนี้ คือ แบบสอบถามที่สร้างมาจากการทบทวนวรรณกรรมเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มาปรับใช้ในแบบสอบถามซึ่งมีลักษณะเป็นคำถามปลายปิด ซึ่งในแต่ละชุดจะประกอบไปด้วยแบบสอบถามซึ่งประกอบด้วยข้อคำถามด้านข้อมูลทั่วไป การแบ่งบุคลิกภาพ 5 องค์ประกอบ ทฤษฎีสีโคบายาชิ และความชื่นชอบต่อเทคนิคการตกแต่งผ้าไหม 13 รูปแบบ ดังแสดงใน Fig. 2

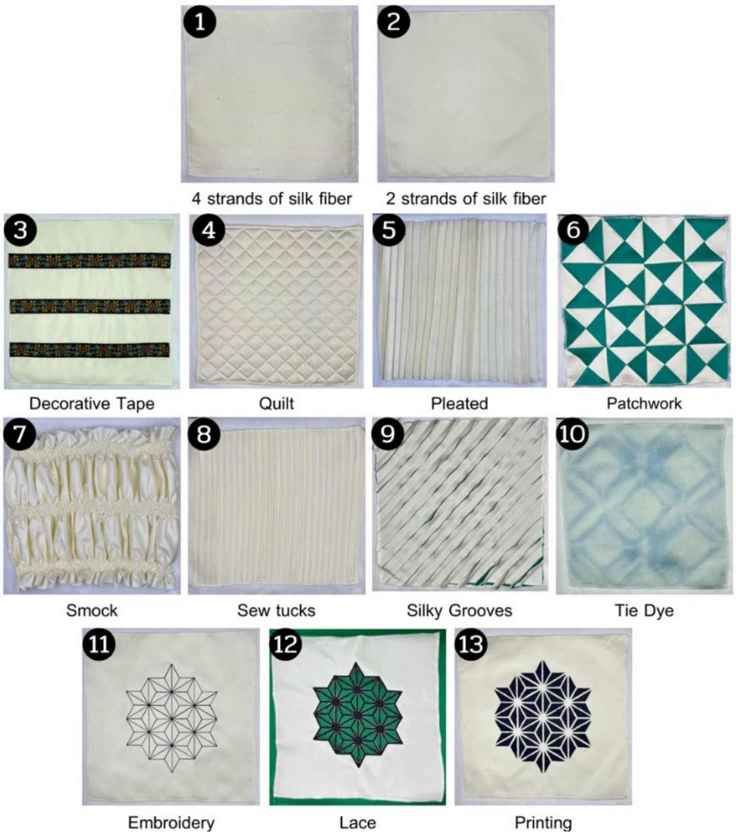


Fig. 2 Examples of 13 decorating techniques

จากข้อมูลจำนวนประชากรผู้หญิงอายุตั้งแต่ 21–40 ปี ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร พบว่ามีประมาณ 659,945 คน (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2563) เมื่อคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างตามวิธีของทาโร่ ยามาเน่ (Taro Yamane) จะได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างจำนวน 204.0813 คน ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดกลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูล 205 คน

การวัดค่าตัวแปรและเกณฑ์ในการให้ค่าคะแนนในแบบสอบถามวัดบุคลิกภาพ โดยจะให้ผู้ตอบแบบสอบถามประเมินบุคลิกภาพตนเองออกเป็น 5 ระดับจากคำอธิบาย และจะทำการวัดค่าตัวแปรโดย การให้คะแนนมาตราวัดแบบ Likert scale ซึ่งกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนไว้ ดังนี้ ตรง = 5 คะแนน ค่อนข้างตรง = 4 คะแนน ไม่แน่ใจ = 3 คะแนน ค่อนข้างไม่ตรง = 2 คะแนน และ ไม่ตรง = 1 คะแนน ผู้วิจัยนำผลรวมของคะแนนที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับการแปลความหมายค่าคะแนนได้ ดังนี้ 4.21–5.00 = คำอธิบายตรงกับลักษณะบุคลิกภาพ, 3.41–4.20 = คำอธิบายค่อนข้างตรงกับลักษณะบุคลิกภาพ, ไม่แน่ใจในคำอธิบายลักษณะบุคลิกภาพ = 2.61–3.40, คำอธิบายค่อนข้างไม่ตรงกับลักษณะบุคลิกภาพ = 1.81–2.60 และ คำอธิบายไม่ตรงกับลักษณะบุคลิกภาพ = 1.00–1.80

การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาโดยแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยนำเสนอข้อมูลใน รูปแบบตารางเชิงสถิตเพื่ออธิบายข้อมูลเบื้องต้น และการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงอนุมานโดยใช้สถิติสหสัมพันธ์แบบเพียรสัน (Pearson's Correlation Coefficient) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลสำเร็จรูป เพื่อนำไปคำนวณหาระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ได้แก่ บุคลิกภาพ 5 องค์ประกอบ กับ ทฤษฎีสีของโคบายาชิ, บุคลิกภาพ 5 องค์ประกอบ กับ เทคนิคการตกแต่ง 13 แบบ เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่าง บุคลิกภาพ 5 องค์ประกอบ กับ ทฤษฎีสีของโคบายาชิ และ เทคนิค การตกแต่งแล้วจะนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบชุดสำหรับกลุ่มผู้บริโภคผู้หญิงเจนเนอเรชั่นวายในเขตกรุงเทพมหานคร

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากกลุ่มตัวอย่างเพศหญิงในกรุงเทพมหานครจำนวน 205 คน พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีระดับการศึกษาในช่วงปริญญาตรี ร้อยละ 80 มีรายได้อยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10,000 บาท ร้อยละ 30 มีรายได้ในช่วง 10,001–20,000 บาท และ 20,001–30,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 20 โดยมีอาชีพนักเรียน/นักศึกษา ร้อยละ 42 กลุ่มผู้ทำอาชีพพนักงานบริษัทเอกชน ร้อยละ 23

เมื่อกลุ่มตัวอย่างได้ทำแบบสอบถามเกี่ยวกับบุคลิกภาพของผู้บริโภคได้ใช้คำถามอธิบายถึงลักษณะ บุคลิกภาพในบุคลิกภาพ 5 องค์ประกอบ โดยคละข้อความที่อธิบายลักษณะบุคลิกภาพ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 The Five-factor model of personality of the sample

Personality Factors	Very Likely (%)	Likely (%)	Neutral (%)	Unlikely (%)	Very Unlikely (%)	$\bar{x}$	S.D.	Interpreting
Openness to experience	33.9	10.75	33.55	16.83	5.03	3.51	1.25	Likely
Conscientiousness	28.05	16.2	42.63	11.98	3.40	3.53	1.10	Likely
Agreeableness	11.45	13.78	50.60	29.13	4.98	3.07	0.98	Neutral
Extraversion	12.7	15.13	49.28	16.95	5.98	3.11	1.02	Neutral
Neuroticism	7.70	6.35	25.10	25.88	35.00	2.25	1.18	Unlikely

The significance level for hypothesis testing ** is the .01 level and * is the .05 level.

จาก Table 1 พบว่าลักษณะบุคลิกภาพที่ตรงกับกลุ่มตัวอย่างมากที่สุด คือ บุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างตรง โดยมีค่าเฉลี่ย 3.517 ลำดับที่สองบุคลิกภาพการมุ่งมั่นสู่ความสำเร็จอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างตรง โดยมีค่าเฉลี่ย 3.535 ลำดับที่สามบุคลิกภาพ การเข้ากับผู้อื่นได้ดีอยู่ในเกณฑ์ไม่แน่ใจ โดยมีค่าเฉลี่ย 3.076 ลำดับที่สี่บุคลิกภาพ การแสดงตัวอยู่ในเกณฑ์ไม่แน่ใจ โดยมีค่าเฉลี่ย 3.116 และลำดับสุดท้ายบุคลิกภาพ ความอ่อนไหวทางอารมณ์อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างไม่ตรง โดยมีค่าเฉลี่ย 2.259 ดังนั้นกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่อยู่ในบุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์ เนื่องจากลักษณะบุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์มีความสอดคล้องกับปัจจัยหลายๆอย่าง ในปัจจุบัน เช่น ความก้าวหน้าของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ความหลากหลายทางสังคม วัฒนธรรม และการเมือง การเปิดกว้างทางสังคม ที่จะส่งผลถึงรูปแบบการใช้ชีวิต พฤติกรรม ความคิด และบุคลิกภาพ กับกลุ่มผู้บริโภคส่วนใหญ่ โดยบุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์เป็นบุคคลที่ชีวิตไปด้วยจินตนาการ และ ความฝัน มีความคิดสร้างสรรค์ภายในตนเอง ชื่นชอบความงดงามในศิลปะและบทกวี เป็นผู้ที่รับรู้อารมณ์ และความรู้สึกภายในตนเอง เป็นผู้ที่พร้อมที่จะลองทำกิจกรรมใหม่ ๆ ชอบความแปลกใหม่หลากหลาย กว่าความเคยชินที่ปฏิบัติอยู่ การมีความคิดที่จะเปิดรับเหตุการณ์หรือเรื่องใหม่ๆ การมีความพร้อม ที่จะตรวจสอบค่านิยมต่าง ๆ เช่นค่านิยมทางสังคม การเมือง และศาสนา

เมื่อนำข้อมูลความชอบต่อกลุ่มสีมาหาความสัมพันธ์โดยการทดสอบสมมติฐานโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติวิเคราะห์เชิงอนุมาน ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Relationship between Five-factor model of personality and Kobayashi's color image scale

	Openness to experience	Conscientiousness	Agreeableness	Extraversion	Neuroticism
Elegant	-.165*	-.083	.553**	-.015	-.007
Modern	.745**	-.414**	-.200	-.241	.181*
Romantic	-.227*	-.0128	-.139	-.236*	.506**
Chic	0.078	-.038	.042	.021	.019
Natural	0.071	0.055	.081	.039	.137*
Classic	0.095	0.033	.042	.077	.033
Casual	-.246**	-0.174**	-.093	.421**	-.095
Dandy	-.383**	.719**	-.144*	.119	-.116

The significance level for hypothesis testing ** is the .01 level and * is the .05 level.

จาก Table 2 พบว่าความสัมพันธ์ของบุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์กับกลุ่มสีสมัยใหม่ โดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับ 0.745 ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในระดับสูง ความสัมพันธ์ของบุคลิกภาพการมุ่งมั่นสู่ความสำเร็จกับกลุ่มสีเลอเลิศ โดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับ 0.719 ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในระดับสูง ความสัมพันธ์บุคลิกภาพการเข้ากับผู้อื่นได้ดีกับกลุ่มสีสง่างาม โดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับ 0.553 ซึ่งค่าสหสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง บุคลิกภาพการแสดงตัวกับกลุ่มสีสบายๆโดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับ 0.488 ซึ่งค่าสหสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง และ ความสัมพันธ์ของบุคลิกภาพความอ่อนไหวกับกลุ่มสีชวนฝัน โดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับ 0.506 ซึ่งค่าสหสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มบุคลิกภาพกับเทคนิคการตกแต่งผ้าไหม โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติวิเคราะห์เชิงอนุมาน ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Relationship between Five-factor model of personality and decorating techniques

Decorating techniques	Openness to experience	Conscientiousness	Agreeableness	Extraversion	Neuroticism
4 Ply Thai Silk	.064	.127	0	0	0
2 Ply Thai Silk	.103	2.016	0	0	.222
Embroidery Trim	0	0	0	0	0
Quilt	1.821	.079	.036	0	1.667
Pleat	.154	1.683	2.250	1.263	.111
Patchwork	2.141	.063	.179	0	.333
Smock	.155	.175	1.500	.316	2.222
Sew tucks	.090	.032	0	.053	0
Silky grooves	1.128	.095	.393	2.00	.111
Tie Dye	.115	1.444	.143	0.526	.222
Embroidery	.064	.206	1.429	1.316	1.00
Lace	.090	.032	.071	.316	.111
Printing	.077	.016	0	.211	0

The significance level for hypothesis testing ** is the .01 level and * is the .05 level.

จาก Table 3 พบว่าความชื่นชอบเทคนิคการตกแต่ง 3 อันดับแรกของแต่ละกลุ่มบุคลิกภาพ พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่มีบุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์ส่วนมากชอบการเย็บ Patchwork การเย็บ Quilt และ การเย็บ Silky grooves ตามลำดับโดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับสูงมาก กลุ่มตัวอย่างที่มีบุคลิกภาพการมุ่งมั่นสู่ความสำเร็จมีความชื่น

ชอบผ้าไหมพื้น 2 เส้น การอัดพลีท และ การมัดย้อมซึ่งพบว่าทั้ง 3 เทคนิคมีความสัมพันธ์ในระดับสูงมาก กลุ่มตัวอย่างที่มีบุคลิกภาพการเข้ากับผู้อื่นได้ดีส่วนมากมีความชื่นชอบเทคนิคการอัดพลีท การเย็บ Smock และการเย็บปัก ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับสูงมาก กลุ่มตัวอย่างที่มีบุคลิกภาพการแสดงตัวมีความชื่นชอบเทคนิคการตกแต่งแบบการเย็บ Silky groove การเย็บปัก และการอัดพลีท ตามลำดับซึ่งมีความสัมพันธ์ในระดับสูงมาก ส่วนกลุ่มตัวอย่างที่มีบุคลิกภาพความอ่อนไหวทางอารมณ์มีความชื่นชอบเทคนิคการเย็บ Smock การเย็บ Quilt และการเย็บปัก ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ในระดับสูงมาก

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถได้แนวทางในการออกแบบเครื่องแต่งกายสำหรับสตรีเพศหญิง โดยแบ่งตามกลุ่มบุคลิกภาพ ความชอบต่อกลุ่มสี และ เทคนิคการตกแต่งผ้าไหม ได้เป็น 5 กลุ่ม ดังแสดงใน Fig. 3

Fig. 3 Costume design guidelines for female generation Y women in Bangkok

สรุป

จากการทำแบบสอบถามกลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคผู้หญิงเจนเนอเรชั่นวาย ในเขตกรุงเทพมหานคร จำนวน 205 คน พบว่าส่วนใหญ่กลุ่มตัวอย่างมีบุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์ นอกจากนั้นพบว่าบุคลิกภาพมีความเชื่อมโยงกับกลุ่มสี 5 กลุ่มสี โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีบุคลิกภาพการเปิดรับประสบการณ์มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีสมัยใหม่ และบุคลิกภาพการมุ่งมั่นสู่ความสำเร็จมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีเลอเลิศ มีความสัมพันธ์ในระดับสูง ส่วนบุคลิกภาพการแสดงตัวมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีสบายๆ บุคลิกภาพการเข้ากับผู้อื่นได้ดีมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีสง่างาม และ บุคลิกภาพอ่อนไหวทางอารมณ์นั้นมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีชวนฝัน ในระดับปานกลาง เมื่อพิจารณาการจากเทคนิคการตกแต่งผ้าไหมพบว่าแต่ละกลุ่มบุคลิกภาพมีความชื่นชอบเทคนิคการตกแต่งที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางให้กับผู้ประกอบการที่จะผลิตสินค้าให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคผู้หญิงเจนเนอเรชั่นวาย ในเขตกรุงเทพมหานคร

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนการนำเสนอผลงานในครั้งนี้และขอขอบคุณกลุ่มตัวอย่างทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถามเพื่อให้ผู้วิจัยได้นำไปใช้ในการวิจัยเพื่อทำให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กณิกนันต์ อุดมสิน. 2560. การวิเคราะห์ข้อมูลสีที่มีอิทธิพลเชิงจิตวิทยาต่องานออกแบบสื่อดิจิทัล. สถาบันเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น.

กรมส่งเสริมวัฒนธรรม. 2563. Thai Textiles Trend Book Spring/Summer 2022. http://book.culture.go.th/TTT/mobile/index.html#p=1, 12 มีนาคม 2565.

คณากาญจน์ รักไพฑูรย์, เกษม ทิพย์ธาราจันทร์, ฐิติพร เลิศรัตน์เดชากุล. (2563). การประยุกต์และวิเคราะห์ข้อมูลสีด้วยการประมวลผลภาพถ่ายสถานที่ท่องเที่ยวเพื่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ของที่ระลึก. วารสารวิทยาการและเทคโนโลยีสารสนเทศ. 10(1): 48–58

จิรัชญาวัน จันทร์. 2011. การแต่งกายตามบุคลิกภาพ. ศิลปกรรมสาร. 6(1): 55–70

ณัชชาภัทร เวียงแสง. 2559. ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ผ้าไหมของผู้บริโภคในเขต เทศบาลนครขอนแก่น. วารสารวิชาการธรรมทรรศน์. 16(3): 133–142

ณัฐสุภา เจริญยิ่งวัฒนา. 2017. อัตลักษณ์การออกแบบแฟชั่นออนไลน์เพื่อเจนเนอเรชั่นวาย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถวัลรัตน์ กัลชาญกิจ, ธาตรี ใต้ฟ้าพูล. (2016). บุคลิกภาพผู้บริโภคความ เชื่อโชคลางและพฤติกรรมการซื้อเครื่องประดับหินสีมงคล. JPRA-Journal of Public Relations and Advertising. 9(2): 39–61.

นันทิมา นาคาพงศ์ 2559. การสร้างและพัฒนาแบบวัดบุคลิกภาพห้าองค์ประกอบหลักสำหรับนักเรียนชั้นประถมศึกษาและมัธยมศึกษา. วิทยาลัยการศึกษา มหาวิทยาลัยพะเยา.

สุพาดา สิริกุตตา, ไพบูลย์ อาชารุ่งโรจน์. 2553. ค่านิยมและพฤติกรรมการซื้อผ้าไหมไทยของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร.วารสารศรีนครินทรวิโรฒวิจัยและพัฒนาสาขามนุษย์และสังคมศาสตร์. 2(3): 169–179.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2564. สถิติประชากรศาสตร์ ประชากรและเคหะ. http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/01.aspx, 12 มีนาคม 2565.

Economic Intelligence Center. 2557. Insight กลยุทธ์มัดใจผู้บริโภค Gen Y. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร

Economic Intelligence Center. สืบค้นจาก https://www.scbeic.com/th/detail/ file/product/130/ dzi68owq5l/8372_20141112161337.pdf

Horiguchi S., Iwamatsu, K. 2018. From Munsell Color System to a new color psychology system. Wiley 2018: 1–13. doi.org/10.1002/col.22286

Combined use of methyl cellulose, k-carrageenan, and calcium salt on enhancing meat-liked texture and good appearance in plant-based chicken breast

Thitirat Sirichan*, Natcha Wongthongdee

Nutrition and Nutraceutical, Life Science Department, Ashland (Thailand) Co., Ltd., Bangkok 10500, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thitirat.sirichan@ashland.com

Abstract

The effect of high gel strength methyl cellulose (MC), k-carrageenan (k-CGN) and calcium salt as texturizers on improving desirable chicken meat-liked texture and appearance in plant-based chicken breast (PBC) was evaluated. PBC made from various base ingredients (wheat gluten, soy protein with and without young jackfruit) containing different hydrocolloids (MC alone and in combination with k-CGN and salt) were compared with control (conventional chicken meat-CCM). The PBC without jackfruit adding MC alone at 3% (w/w) had springiness, gumminess, chewiness, and adhesiveness comparable to CCM. Whereas its hardness was 40% lower than that of control, cross section from digital microscope also showed less fibrous texture than that of CCM. Accordingly, a further study was conducted to enhance hardness and fibrous texture inside the reconstructed PBC by adding 14% (w/w) texturized plant base material (jackfruit) and using combination of 3% (w/w) hot gelling agent-MC, 0.6% (w/w) cold gelling agent-k-CGN and 0.6% (w/w) calcium salt. It has been found that, jackfruit provides muscle-like structure. The combined use of two hydrocolloids with calcium cation salt increased the hardness, springiness, gumminess, and chewiness of PBC close to CCM at warm and cold bite as well as improved the sensory liking.

Keywords: Boiled young jackfruit, Meat alternatives, Meat-liked texture, Methyl cellulose, Plant-based chicken breast

Introduction

Plant-based foods are increasingly popular as meat alternatives. Motivations for seeking plant-based alternatives include many reasons such as seeking a diet with greater variety, concerns for animal welfare, avoidance of allergens and healthy lifestyle diet. However, creating meat-like, chicken-like texture and a pleasant appearance when replacing animal-based protein with plant-based proteins is challenging for formulators (Kyriakopoulou et. al., 2021; Wongthongdee, 2022). Plant-based proteins perform different binding properties, texture characteristics and functionality as compared to animal proteins. Accordingly, they behave differently at pH and temperatures and cannot be substituted 1:1 for animal proteins. Generally, the formulations of plant-based foods alternatives are made from legumes and pulses (soy, peas, lentils, chickpeas), pseudocereals (quinoa, buckwheat), grains (wheat gluten), rice, sorghum, tubers (potatoes), seeds and nuts to mimic muscle structure and texture (Nasrabadi et. al., 2021). Besides various sources of plant proteins, many types of texturized vegetable proteins are avaiable with very different structures- like crumb, chunks, fibrous, flakes for boardening the products range. Additionally, jackfruit, mycoprotein from microoragnisim and mushroom can be used as ingredeints to mimic the tetxure of meat, chicken and seafood alternatives formulas (Wongthongdee, 2022). Accordingly, using the right hydrocolloids as texturizer and binder help formulators deliver a product with the desired eating quality and texture. Versatile properties of hydrocolloids can help to replicate the bite of a meat-based product, improve moisture retention, improve binding, or replace a binder with known allergies, like egg white powder. This study focusses on combining modified cellulose binder such as methyl cellulose with other gelling agents and divalent cation salt to create customized textures and modify chewiness, elasticity, and/or chicken like texture of plant-based chicken product. The research outcome provides the result in restructuring plant-based chicken from using hot thermal gel and cold thermal gel hydrocolloid together with boiled young jackfruit. This study is expected to deliver this knowledge into food industry and meat alternatives producers for developing good texture quality and sensory of chicken alternative.

Materials and methods

Materials

Methyl cellulose (Benecel™ MX) was produced from Ashland Specialties (Doel-Beveren, Belgium). K-carrageenan (Ricogel 8820) was obtained from W Hydrocolloids, INC. (Taguig City, Philippines). Yeast extract powder (Springalys™ D201/0–PW) was obtained from Biospringer (Guangxi, China). Isolated soy protein powder was provided by Archer Daniels Midland Company (Illinois, USA). Chicken flavor oil was obtained from Questex CO., Ltd (Bangkok, Thailand). Gluten powder, boiled young jackfruit in glass jar (Jackys, Thailand), sunflower oil (Cook, Thailand), calcium lactate gluconate (China), Monosodium glutamate (MSG), pepper powder, garlic powder, salt, and dextrose (China) were purchased from local market.

Sample Preparation

The first formula of plant-based chicken without jackfruit added a single hydrocolloid was prepared by mixing 40.2% methyl cellulose emulsion gel, 7.9% gluten powder, 11% isolated soy protein powder, 12.6% sunflower oil, and 28.3% water in the food processor (Magimix France 18591F, CS 4200 XL Satin, France). Emulsion gel recipe was composed of 8% methyl cellulose powder, 11% sunflower oil and 81% cold water (4-8°C). The methyl cellulose emulsion gel was prepared in the food processor at high speed until obtaining firm and fluffy emulsion gel. After all ingredients were mixed homogeneously, the mixture was formed into shape 7x4x1 cm and frozen at -18 °C for minimum of 30 minutes. After that, plant-based chicken was steamed at 90 °C for 15 minutes or grilled at 180°C for 10 minutes. The second formula of plant-based chicken with jackfruit and two types of hydrocolloids was prepared in the food processor by mixing 33.4% methyl cellulose emulsion gel (same recipe as used in the first formulation), 6.7% gluten powder, 6.7% isolated soy protein powder, 14.3% boiled young jackfruit, 0.6% K carrageenan, 0.6% calcium lactate gluconate, 1.9% dextrose, 0.3% yeast extract, 9.5% sunflower oil, chicken flavor oil, seasonings (salt, msg, pepper powder, garlic powder) and 22.9% water. The conventional chicken breast size 7x4x1 cm was used as a control. The samples were taken pictures by camera (iPhone ProMax 14, Apple, USA) and USB digital microscope camera (Elikliv DM4 1000X, China).

Texture Profile Analysis of Samples

The samples were cooked then left at room temperature until 40 ºC and 25 ºC. The samples were compressed twice to 80% of their original height using a Brookfield CT3 texture analyzer (USA), equipped with 10000 g load cell, and shear blade for products TA-SBA-WB (3 mm) with Fixture Base Table TA-RT-KBI. Hold time between two compressions was set to 0 sec. Analyses were performed with following parameters: pretest speed 1.0 mm/s, test speed: 1.0 mm/sec, return speed 1.0 mm/s, trigger Load 1 g Test type is texture profile analysis (TPA), data rate 10 points/sec. Curves of force against time were obtained.

Texture profile analysis components are presented as follows:

1. Hardness (g), maximum force required to compress a food between the molars.
2. Chewiness (mJ) indicates the energy required to chew a solid food product to a state where it is ready for swallowing.
3. Gumminess (g) indicates the energy required to disintegrate a semi-solid food to a state ready for swallowing. Related to foods with low hardness levels.
4. Springiness (mm) indicates height that the food recovers between the first and the second bites.
5. Adhesiveness (mJ), The amount of work needed to overcome attractive forces of the food to another contact surface.

The obtained data was selected and created a radar chart from excel program.

Statistical analysis

The experiments were repeated twice. Each analysis was repeated at least two times under each formulation. The data were evaluated by using independent samples t test (2 samples t test) with significant tested at $p<0.05$ to determine the significant difference among samples. Statistical analysis was performed using the Minitab software (Free trial version, Minitab, LLC: Pennsylvania, USA).

Results and Discussion

Fig 1 showed the appearance of plant-based grilled chicken made from isolated soy protein, gluten powder and methyl cellulose emulsion gel without jackfruit compared with the conventional chicken breast. Adding 3% Benecel™ MX modified cellulose alone helped to attribute good appearance quality of plant-based chicken (right) such as size, shape retention, and meat like-texture close to the conventional chicken breast (left).

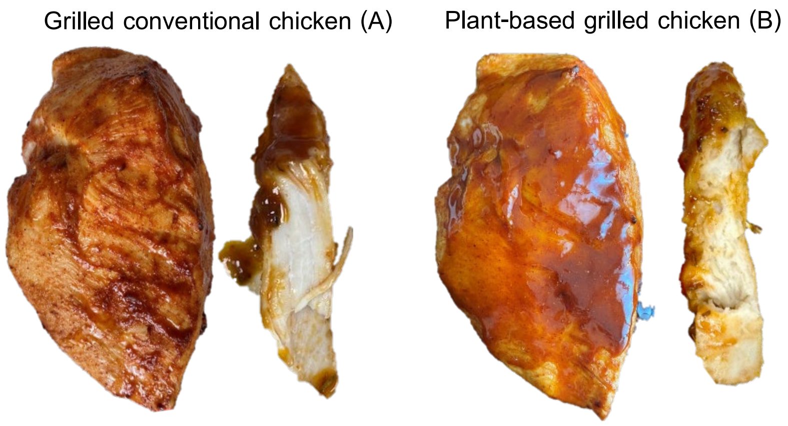


Fig 1 Visual characteristics of grilled conventional chicken breast (A); and plant-based grilled chicken without jackfruit (B) made from a single hydrocolloid (3% methyl cellulose)

Texture characteristics of plant-based chicken without jackfruit that added only 3% methyl cellulose as the binder and texturizer had springiness, gumminess, chewiness, and adhesiveness comparable to the chicken breast (Fig 2). However, its hardness was 40% lower than that of control and digital microscope pictures of the cross section (Fig 3) displayed less fibrous texture than that of the conventional chicken breast notably.

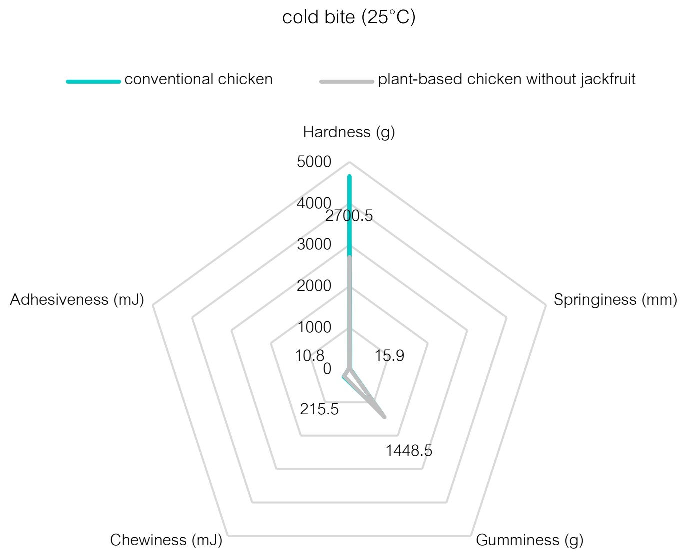


Fig 2 A radar chart of texture profile analysis of plant-based chicken compared to the chicken breast after cooked and left at room temperature until 25°C

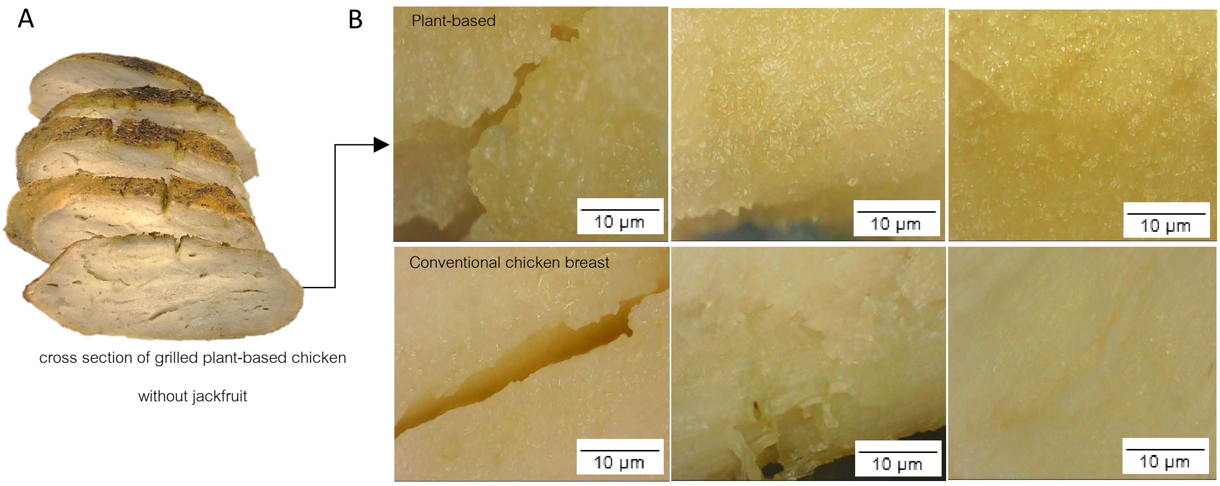
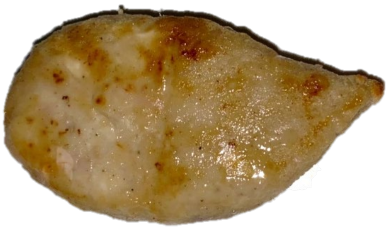


Fig 3 Cross section (A) and digital microscope pictures of surface, 1000x magnification (B) of grilled plant-based chicken with less fibrous texture (top row) and grilled chicken breast with more fibrous texture (bottom row)

The additional study was conducted to improve hardness and fibrous texture inside the reconstructed plant-based chicken by adding 14% texturized plant-base material like jackfruit and using combination of 3% hot gelling agent-methyl cellulose, 0.6% cold gelling agent-K carrageenan and 0.6% calcium salt. After formulation adjustment by incorporating jackfruit, more muscle-like structure could be observed as seen in Fig 4.



Whole cut of cooked plant-based chicken with jackfruit

Slices of cooked plant-based chicken with jackfruit

Fibrous appearance of cooked plant-based chicken with jackfruit

Fig 4 The visual appearance of cooked plant-based chicken with jackfruit adding 3% methyl cellulose and 0.6% carrageenan in combined with 0.6% calcium salt

Combined use of hydrocolloids with cation salt as the new binder blend on textural properties helped improve the hardness, springiness, gumminess, and chewiness levels closer to those of conventional chicken at cold and hot bite.

Moreover, there was no significant difference of hardness and chewiness at cold bite and no significant difference of gumminess and chewiness at hot bite among the conventional chicken and the plant-based chicken products (p < 0.05) as shown in Table 1.

Table 1 Texture profile analysis of plant-based chicken compared to the chicken breast after cooked and left at room temperature until 25°C and 40°C

Eating temperature	Test	Hardness (g)	Springiness (mm)	Gumminess (g)	Chewiness (mJ)	Adhesiveness (mJ)
Cold bite (25°C)	Conventional chicken	5549±246.1 [a]	23.4±0.2 [b]	1445.5±310.4 [a]	330.3±67.4 [a]	19.8±5.0 [b]
	Plant-based chicken with jackfruit	5099±554.4 [a]	31.2±1.5 [a]	1551±326.7 [a]	472.6±77.3 [a]	133.6±1.1 [a]
Hot bite (40°C)	Conventional chicken	7703.5±634.3 [a]	19.3±1.2 [b]	2451±756.6 [a]	467.4±179.6 [a]	25.1±17.8 [b]
	Plant-based chicken with jackfruit	5129.5±415.1 [a]	31.4±0.7 [a]	1642.5±140.7 [a]	506.2±55.1 [a]	159.7±3.1 [a]

Means±SD in the same column of each eating temperature followed by different superscripts are significantly different (p < 0.05).

As expected, the firmness of plant-based chicken and conventional chicken at the hot bite (40°C) was higher than that of cold bite. The leading cause might come from the thermal gelation effect of Benecel™ MX modified cellulose and K-carrageenan with calcium salt containing in plant-based chicken (Blakemore and

Harpel, 2009; Ashland 2022). The toughness and firmness of the conventional chicken breast increased when it was hot and the animal protein was denatured (Mehmood, et al., 2019).

Conclusion

Methyl cellulose emulsion gel could provide the firm bite texture and helped form the good appearance to the plant-based chicken without jackfruit added. After formulation adjustment by adding young jackfruit and two types of hydrocolloids with calcium salt. The positive result of using two kinds of hydrocolloids interacting together to improve meat like texture was obtained. The plant-based chicken with jackfruit added showed significant increase in the hardness, springiness, gumminess, and chewiness close to the conventional chicken at cold bite (25°C). Additionally, the fibrous texture from jackfruit helped satisfy the plant-based chicken mouthfeel and make texture visually appealing when cut or shred. Using 33-40% methyl cellulose emulsion gel binder or 2.6-3% methyl cellulose powder (Benecel™ MX modified cellulose) with 0.6% k-carrageenan and 0.6% calcium salt in final product of plant-based chicken contributed good textural characteristics. The binder blend mimicked chewy chicken liked texture without needing to use the regular chicken meat protein or other animal protein sources in the formula. The effect of this new binder blend is promising to enhance plant-based meat consumer adoption and reduce food formulation challenges in the meat analog industry.

Conflict of interest

All authors declare that they have no conflicts of interest.

Acknowledgement

We would like to thank Life Sciences R&D and Innovation Department, Ashland Global Holdings Inc., USA for financial support.

Reference

Wongthongdee, N. 2022. Getting it right with plant-based alternatives. Asia Pacific Food Industry. July/August: 32–34. https://www.apfoodonline.com/ebook/JulAug2022/html5/index.html?locale=ENG&pn=37

Kyriakopoulou, K., Keppler, J. K., van der Goot, A. J. 2021. Functionality of ingredients and additives in plant-Based Meat Analogues. Foods. 10(3): 1–29.

Nasrabadi, M.N., Doots, A.S., Mezzenga, R. 2021. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. Food Hydrocoll. 118: 106789.

Blakemore, W. R., Harpell, A. R. 2009. Food Stabilizers, Thickeners and Gelling Agents. Wiley-Blackwell Publishing. USA, pp. 73–94.

Ashland. 2022. Benecel™ MX modified cellulose chemistry: cellulosics for plant-based foods, USA. https://www.ashland.com/industries/food-and-beverage/plant-based-proteins/benecel-mx-modified-cellulose, 24 December 2022.

Mehmood, W., Qian, S., Zhang, C., Li, X. 2019. Biophysical properties and volumetric changes in breast meat of broilers and yellow-feathered chicken as affected by cooking process. Int. J. Food Prop. 22(1): 1935–1951.

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติก

Preliminary study of consumer behaviors and needs on synbiotic beverage products

ธนพร สำราญวิริยะ*, **ทานตะวัน พิรักษ์**

Thanaporn Samranviriya*, Tantawan Pirak

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author; E-mail address: thanaporn.sam@ku.th

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่อาศัยการทำงานร่วมกันของโพรไบโอติกและพรีไบโอติก เพื่อปรับสมดุลของแบคทีเรียที่ดีในลำไส้ สามารถช่วยส่งเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหารที่ส่งผลสืบเนื่องในระยะยาวต่อสุขภาวะองค์รวม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรม และความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติก ผลการสำรวจฐานข้อมูล Global New Product Database ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2018–2022 พบผลิตภัณฑ์ซินไบโอติก 64 ผลิตภัณฑ์ เมื่อศึกษาความต้องการของผู้บริโภค โดยการสนทนาแบบกลุ่ม ซึ่งกลุ่มเป้าหมายเป็นผู้ที่เคยรับประทานผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกหรือซินไบโอติก ช่วงอายุ 24–30 ปี จำนวน 8 คน พบว่านิยมบริโภคผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้เพื่อกระตุ้นการขับถ่ายและปรับสมดุลภายในระบบทางเดินอาหาร โดยนมเปรี้ยวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการบริโภคมากที่สุด ความถี่ในการบริโภค 1–2 ครั้งต่อสัปดาห์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อมากที่สุดคือ รสชาติและยี่ห้อ และหากมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำผลไม้ซินไบโอติก พบว่าผู้บริโภคร้อยละ 90 ให้ความสนใจที่จะทดลองและซื้อ

คำสำคัญ: เครื่องดื่ม, ซินไบโอติก, พรีไบโอติก, โพรไบโอติก

Abstract

Synbiotic products are the product that contain probiotics and prebiotics leading to a balance of good bacteria in the intestines. It can help promote the function of the gastrointestinal tract, which has long-term implications for overall well-being. The aim of this research was to study of consumer's behaviors and needs for synbiotic beverage products. A survey of synbiotic products from the Global New Product Database distributed worldwide from 2018–2022 found that there were 64 synbiotic products. Consumer needs was surveyed using focus group discussion with 8 target consumers aged between 24–30 years old, whom consumed prebiotic, probiotic or synbiotic products usually. The results showed that most consumers consumed these products in order to stimulate excretion and promote the balance of gastrointestinal tract. Drinking yogurt was the most preferable product that they regularly consumed 1–2 times per week. The brand and taste were the important factors affecting the purchase of prebiotic, probiotic or synbiotic products. Among all participants, 90% of consumer commented that they will interest to try and purchase the synbiotic beverage product containing fruit juice when it is available in the market.

Keywords: beverage, prebiotic, probiotic, synbiotic

คำนำ

ปัจจุบันแนวโน้มของอาการท้องผูกพบในคนที่อายุน้อยหรือวัยทำงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการใช้ชีวิตที่เร่งรีบและมีพฤติกรรมการบริโภคผักผลไม้ที่ลดลง จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอาการท้องผูก (พูลชัย, 2554; มยุราและคณะ, 2558) ผู้บริโภคจึงได้ตระหนักถึงการบริโภคอาหารและเครื่องดื่มที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ตลาดอาหารและเครื่องดื่มฟังก์ชันเติบโตได้อย่างรวดเร็ว จากตลาดอาหารฟังก์ชันทั้งหมด ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกมีสัดส่วนส่วนใหญ่ในช่วง 60–70% (Aspri et al., 2020) ในกลุ่มเครื่องดื่มฟังก์ชัน (functional drinks) ถูกออกแบบมาเพื่อส่งเสริมความสามารถหรือกลไกในร่างกาย ช่วยดูแลสุขภาพหรือป้องกันโรค โดยการเติมหรือเสริมสารอาหารต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายเข้าไปในผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น การใช้สารให้ความหวานที่ให้พลังงานต่ำ (sweetener) การเสริมสารพฤกษเคมี (phytochemical) โพรไบโอติก (probiotic) และพรีไบโอติก (prebiotic) เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกเป็นการทำงานร่วมกันของโพรไบโอติกและพรีไบโอติก (Kumar et al., 2018) เมื่อบริโภคซินไบโอติกเข้าไปในร่างกายจะได้รับทั้งจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์และอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ โดยที่พรีไบโอติกเป็นแหล่งอาหารและคาร์บอนของโพรไบโอติกในลำไส้ ส่งผลต่อการอยู่รอดของโพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์อาหาร จึงช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตและจำนวนจุลินทรีย์โพรไบโอติก นอกจากนี้ยังช่วยลดจุลินทรีย์ที่อาจก่อให้เกิดโรคในลำไส้ ซึ่งประโยชน์ของเชื้อโพรไบโอติกนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณที่เติมลงในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยที่จุลินทรีย์ต้องอยู่รอดตลอดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์และต้องสามารถอยู่รอดไปถึงระบบทางเดินอาหาร (กัญญรัตน์, 2558) และปริมาณจุลินทรีย์โพรไบโอติกต้องมีชีวิตอยู่คงเหลือไม่น้อยกว่า 10^6 CFU ต่ออาหาร 1 กรัมตลอดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารนั้น (กระทรวงสาธารณสุข, 2554) ดังนั้นเครื่องดื่มซินไบโอติกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของผู้บริโภคที่ต้องการทั้งโพรไบโอติกและพรีไบโอติก เพื่อส่งเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหารและลำไส้ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังทำให้สุขภาพร่างกายของมนุษย์ดีขึ้น แต่มีผู้บริโภคบางกลุ่มไม่สามารถบริโภคผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้ได้ด้วยเหตุผลบางประการเช่น แพ้โปรตีนในนม แพ้แลคโตสในนม และรับประทานมังสวิรัติ เป็นต้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มีนมเป็นส่วนผสมหลัก ความต้องการโพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่นมเพิ่มสูงขึ้น น้ำผลไม้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพราะมีรสชาติสดชื่น มีวิตามินและสารต้านอนุมูลอิสระ (Esmaeilinezhad et al., 2019). นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำผลไม้ซินไบโอติกยังเป็นตลาดเฉพาะจึงไม่ต้องแข่งขันกับตลาดผลิตภัณฑ์นมที่มีอยู่แล้ว จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรม ความคิดเห็นและความต้องการของผู้บริโภคเพื่อนำข้อมูลไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำผลไม้ซินไบโอติกต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

การสำรวจผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติกจากฐานข้อมูลทุติยภูมิที่วางจำหน่ายทั่วโลก

ทำการสำรวจผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติกจากฐานข้อมูล Global New Products Database (GNPD) ของบริษัท Mintel ในระหว่างวันที่ 4–7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565 โดยกำหนดคำสำคัญที่ใช้ในการค้นหาในฐานข้อมูลแต่ละครั้งว่า Synbiotic drink, Prebiotic drink และ Probiotic drink ที่วางจำหน่ายทั่วโลกในระยะเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 ถึงปี พ.ศ. 2565 ทำการค้นหาเพื่อเก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์ เช่น จำนวนผลิตภัณฑ์ ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ชนิดของบรรจุภัณฑ์ รูปแบบการบรรจุ อายุการเก็บรักษา ราคา และส่วนผสม เป็นต้น

การสำรวจผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติกที่วางจำหน่ายในท้องตลาด ประเทศไทย

ทำการสำรวจตลาดในกรุงเทพฯ ที่วางจำหน่ายผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกและซินไบโอติก เช่นเดียวกับที่สำรวจข้อมูล GNPD สถานที่ที่ไปสำรวจได้แก่ ร้านสะดวกซื้อ (เซเว่นอีเลฟเว่น สาขาเจริญกรุง 75) ซุปเปอร์มาร์เก็ต (ท็อปส์ ซุปเปอร์มาเก็ต สาขาโรบินสันบางรัก, กูร์เมตมาร์เก็ต สาขาเดอะมอลล์ท่าพระและฟู้ดแลนด์ซุปเปอร์มาร์เก็ต สาขาจรัญสนิทวงศ์) และไฮเปอร์มาร์เก็ต (โลตัส สาขาพระรามสาม) โดยทำการสุ่มจำนวน 5 แห่ง เก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ในช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2565 ได้แก่ จำนวนผลิตภัณฑ์ ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ชนิดของบรรจุภัณฑ์ อายุการเก็บรักษา ราคา และส่วนผสม เป็นต้น

การสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกโดยการสนทนากลุ่ม (Focus group)

ทำการสำรวจความคิดเห็นความต้องการและทัศนคติของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติก โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม จัดกลุ่มละ 8 คนเพื่อให้ผู้ดำเนินการสนทนา (Moderator) สามารถสร้างบรรยากาศและควบคุมการสนทนากลุ่มให้เป็นธรรมชาติ ไร้ข้อกังวล และสามารถแสดงความคิดเห็นได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีถูกหรือผิด ทำการคัดเลือกกลุ่มเป้าหมายก่อนทำการสนทนากลุ่ม ซึ่งกลุ่มเป้าหมายคือ ผู้บริโภคที่รับประทานผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกหรือซินไบโอติก อายุ 24-30 ปี คำถามในการสนทนากลุ่มแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ คำถามนำ คำถามหลักและคำถามสรุปดังนี้ คำถามส่วนที่ 1 เริ่มการสนทนาโดยการเริ่มจากการพูดคุยเรื่องความรู้และความเข้าใจต่อผลิตภัณฑ์ซินไบโอติก คำถามส่วนที่ 2 เป็นคำถามเกี่ยวกับพฤติกรรมการซื้อและการบริโภคผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกหรือซินไบโอติก คำถามส่วนที่ 3 เป็นคำถามเกี่ยวกับข้อมูลความต้องการของผู้บริโภคเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ซินไบโอติก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากรายงานการตลาดของ Mintel กล่าวว่าในปีค.ศ. 2021–2022 มีการกล่าวอ้างโพรไบโอติก (probiotic) ในผลิตภัณฑ์มากถึง 2354 ผลิตภัณฑ์ คิดเป็น 94.51% รองลงมาคือหน้าที่ด้านระบบทางเดินอาหาร (Functional – Digestive) 26.59% และพรีไบโอติก (prebiotic) 18.01% ซึ่งในบางผลิตภัณฑ์สามารถกล่าวอ้างสรรพคุณได้มากกว่า 1 อย่างและเมื่อทำการสำรวจผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกจากฐานข้อมูล GNPD ของบริษัท Mintel ในระหว่างวันที่ 4–7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565 โดยกำหนดคำที่ใช้ในการค้นหาว่า prebiotic, probiotic และ synbiotic" ซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายทั่วโลกในระยะเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2018–2022 พบว่ามีจำนวนผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก 4098 ผลิตภัณฑ์ โพรไบโอติก 7397 ผลิตภัณฑ์และซินไบโอติก 64 ผลิตภัณฑ์ โดยปีที่มีการวางจำหน่ายมากที่สุดคือปีค.ศ. 2021 จำนวน 17 ผลิตภัณฑ์ ซึ่ง Baby Food เป็นหมวดหมู่ที่มีการวางจำหน่ายมากที่สุด

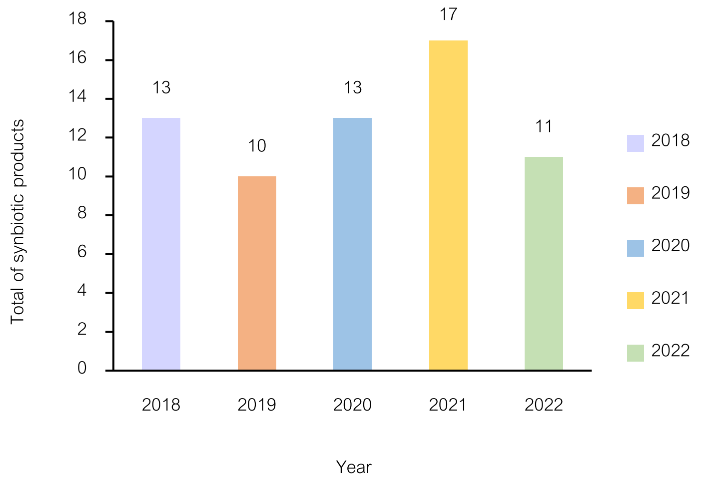


Fig. 1 Total of synbiotic products launched in the global market from 2018 to 2022

Source: GNPD, 2022

เมื่อทำการค้นหาโดยใช้คำสำคัญ “synbiotic drink” และกำหนดข้อจำกัดผลลัพธ์ ตามหมวดหมู่(limit results of category)เป็นอาหารและเครื่องดื่ม และจำกัดผลลัพธ์ของส่วนผสมให้เป็นเฉพาะ “Food Micro-Oraganism” และ “Probiotics” จะพบว่าชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตมากที่สุด 3 อันดับแรกคือ *Bifidobacterium Breve M-16V* (50.0%) Bacteria Culture (25%) Lactic acids bacteria (16.7%) แสดงดังFig. 2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Markowiak และŚliżewska (2017) ได้รายงานว่าชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นโพรไบโอติกมากที่สุดคือสายพันธุ์ที่อยู่ในจำพวก *Bifidobacterium*, *Enterococcus*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Streptococcus* และ *Bacillus* นอกจากนี้เมื่อกำหนดข้อจำกัดผลลัพธ์ของส่วนผสมให้เป็นเฉพาะ “Prebiotic” พบว่าวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้เป็นพรีไบโอติกมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ ฟรุกโตโอลิโกแซ็คคาไรด์ (44.7%) อินนูลิน (40.4%) กาแลคโตโอลิโกแซ็คคาไรด์ (19.3%) โดยประเทศที่มีกำลังในการผลิตผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกจำนวนมากได้แก่ ประเทศจีน ประเทศออสเตรเลีย และประเทศสหรัฐอเมริกา ส่งผลให้เอเชียแปซิฟิคเป็นภูมิภาคที่มีการจำหน่ายมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 90.6 และผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มีการกล่าวอ้างถึงโพรไบโอติก (85.9%) ลดสารก่อภูมิแพ้ (78.1%) อีกทั้งในผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกยังมีการใช้วัตถุใหม่เป็นส่วนผสม เช่น น้ำมันพืชผสม แคลเซียมแลคเตท กรดมาลิก วิตามินบี12 สารสกัดจากเมล็ดกาแฟสด และเมล็ดกาแฟ เป็นต้น

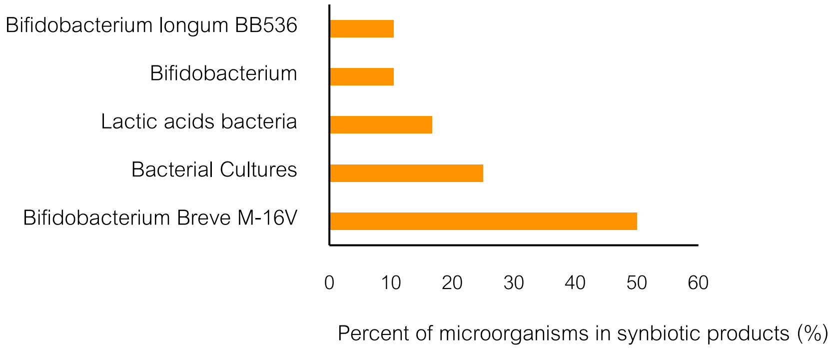


Fig. 2 The types of microorganisms used as a ingredient in synbiotic products ranged from 2018–2022

Source: GNPD, 2022

ผลการสำรวจตลาดผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกและซินไบโอติกที่วางจำหน่ายในเขตกรุงเทพมหานคร โดยทำการสำรวจช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2565 ในร้านสะดวกซื้อ ซุปเปอร์มาร์เก็ต และไฮเปอร์มาร์เก็ต ได้แก่ เซเว่นอีเลฟเว่น (7-eleven) ท็อปส์ซุปเปอร์มาเก็ต (Tops supermarket) กูร์เมตมาร์เก็ต (Gourmet Market) ฟู้ดแลนด์ซุปเปอร์มาร์เก็ต (Foodland Supermarket) และโลตัส (Lotus) พบว่ามีผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายรวมทั้งสิ้น 301 ผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งออกเป็นสามผลิตภัณฑ์หลักได้แก่ นมเปรี้ยว โยเกิร์ตและนมผงสำหรับเด็ก พบว่าจุลินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมมากที่สุดคือ แลคโทบาซิลลัส บัลแกริคัส, และสเตรปโทค็อกคัส เทอร์โมฟิลัส โดยจะมีการกล่าวอ้างทางโภชนาการ เช่น ปราศจากน้ำตาลโดยใช้ซูคราโลสเป็นวัตถุให้ความหวานเพื่อลดปริมาณน้ำตาล และปราศจากไขมันโดยใช้นมผงขาดมันเนยเป็นส่วนผสม และจากการสำรวจด้านบรรจุภัณฑ์พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์แบบที่สัมผัสผลิตภัณฑ์โดยตรงซึ่งชนิดวัสดุของบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ คือ พลาสติก HDPE และพลาสติก PP โดยบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นแบบขวดและแบบถ้วย ผลิตภัณฑ์มีหลากหลายรูปแบบทั้งแบบน้ำ (Liquid) แบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Semi-solid) และแบบผง (Powder) ราคาเริ่มต้นตั้งแต่ 6 ไปจนถึง 2959 บาท ซึ่งผลิตภัณฑ์นมผงสำหรับเด็กเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวที่พบการกล่าวอ้างถึงซินไบโอติกจึงส่งผลให้มีราคาสูง สามารถสรุปได้ดัง Table 1

Table 1 Category of prebiotic, prebiotic and synbiotic products

Category	Percent (%)
Format Type	
- Semi-solid	45.85
- Liquid	40.86
- Powder	11.63
- Bar	1.00
- Solid	0.66
Package Type	
- Tub	45.85
- Bottle	34.22
- Carton	16.94
- Others	1.66
- Pouch	1.33

ผลการสำรวจพฤติกรรม ความคิดเห็น และความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติกจากกลุ่มเป้าหมายจำนวน 8 คน 3 กลุ่ม ช่วงอายุตั้งแต่ 24 ถึง 30 ปี กลุ่มเป้าหมายเป็นผู้ที่เคยบริโภคผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกหรือซินไบโอติก ซึ่งเป็นนิสิตระดับปริญญาตรีและปริญญาโท และบุคคลทั่วไปที่อาศัยหรือทำงานอยู่บริเวณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยจัดการสนทนาแบบกลุ่ม (Focus group) เป็นเครื่องมือในการสำรวจ พบว่าผู้บริโภคส่วนมากยังไม่มีความรู้เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ซินไบโอติก ทราบเพียงว่าบริโภคแล้วได้ประโยชน์ ส่งผลดีต่อสุขภาพของระบบทางเดินอาหาร มีความถี่ในการบริโภคเฉลี่ย 1–2 ครั้งต่อสัปดาห์และปริมาณในการบริโภคต่อหนึ่งครั้งเฉลี่ย 1 ขวด (100 มิลลิลิตร) โดยที่นมเปรี้ยวยี่ห้อยาคูลท์ (Yakult) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการบริโภคมากที่สุด นิยมบริโภคในขณะท้องว่าง แต่สำหรับบางคนนั้นบริโภคหลังจากเกิดอาการท้องผูกและท้องเสีย เนื่องจากต้องการปรับสมดุลภายในลำไส้ให้กลับมาทำงานตามปกติ นอกจากนี้ยังบริโภคเมื่อต้องเดินทางไปต่างจังหวัด เพราะอาจไม่คุ้นชินกับอาหารในสถานที่นั้น ๆ ทำให้ระบบขับถ่ายทำงานผิดปกติ ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์คือ รสชาติและยี่ห้อ เพราะเกิดความเคยชินกับรสชาติเดิมจึงไม่ยอมเปิดใจที่จะลองซื้อยี่ห้ออื่น นอกจากนี้ปัจจัยทางด้านช่องทางการจัดจำหน่ายยังเป็น

อีกปัจจัยหนึ่งที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญเนื่องจากผู้บริโภคต้องการความสะดวกสบาย ใกล้บ้านและหาซื้อง่าย ดังนั้น สถานที่ที่ผู้บริโภคเลือกซื้อผลิตภัณฑ์คือ ร้านสะดวกซื้อ เช่น เซเว่นอีเลฟเว่น (7-eleven) โดยจำนวนการซื้อต่อครั้งน้อยและซื้อขนาดเล็กเพื่อสามารถบริโภคหมดภายในครั้งเดียว อีกทั้งบุคคลที่มีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อคือ ครอบครัว นอกจากนี้ผู้บริโภคยังได้กล่าวว่าปัจจัยด้านอื่น ๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ ราคา ส่วนผสม การส่งเสริมการขาย พรีเซ็นเตอร์ เป็นต้น ไม่มีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกหรือซินไบโอติก

ผู้บริโภคส่วนใหญ่ยังให้ความคิดเห็นว่าหากในอนาคตมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มซินไบโอติก ผู้บริโภคมีความคาดหวังอย่างยิ่งว่าอยากให้มีสรรพคุณในการกระตุ้นการขับถ่าย และช่วยปรับสมดุลของระบบทางเดินอาหาร และอยากให้เพิ่มสารอาหารที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพร่างกายลงไปในผลิตภัณฑ์อีกด้วย เช่น คอลลาเจน สารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น ซึ่งรสชาติที่ผู้บริโภคต้องการคือ แอปเปิล ส้มและฝรั่ง ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือรูปแบบของเหลว มีความใสไม่ข้นหนืด โดยที่บรรจุภัณฑ์ไม่จำเป็นต้องใส่ใจต่อโลก เนื่องจากประสบการณ์ผู้บริโภคเคยพบเจอในผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายง่ายกรณีตัวอย่างเช่น หลอดที่ทำจากกระดาษเกิดการเปื่อยยุ่ยก่อนที่บริโภคหมด จากการสำรวจพบว่าผู้บริโภคร้อยละ 90 ให้ความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำผลไม้ที่มีคุณสมบัติเป็นซินไบโอติก ซึ่งผ่านการทดลองการย่อยในระบบจำลองการย่อยทางเดินอาหารในหลอดทดลองแล้วรับรองว่าเชื้อจุลินทรีย์จะมีชีวิตเหลือรอดไปจนถึงระบบทางเดินอาหาร

สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรม และความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซินไบโอติก โดยการจัดสนทนาแบบกลุ่มจากผู้บริโภคเป้าหมาย พบว่านิยมบริโภคนมเปรี้ยวยี่ห้อยาคูลท์ 1 ขวด ในขณะที่ท้องว่างหรือต้องการกระตุ้นการขับถ่าย แต่สำหรับผู้บริโภคบางคนนั้นบริโภคหลังจากเกิดอาการท้องเสีย เนื่องจากต้องการปรับสมดุลภายในลำไส้ให้กลับมาทำงานตามปกติ ซึ่งความถี่ในการบริโภคเฉลี่ย 1-2 ครั้งต่อสัปดาห์ นิยมซื้อผลิตภัณฑ์จากร้านสะดวกซื้อใกล้ โดยปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์คือ รสชาติและยี่ห้อ นอกจากนี้ช่องทางการจัดจำหน่ายเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญเพราะต้องการความสะดวกสบาย ใกล้บ้านและหาซื้อง่าย ปัจจัยด้านอื่น ๆ ไม่มีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อ เมื่อทำการสำรวจผลิตภัณฑ์พรีไบโอติก โพรไบโอติกและซินไบโอติกที่วางจำหน่ายในเขตกรุงเทพมหานครประเทศไทยพบว่ามีผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายรวมทั้งสิ้น 301 ผลิตภัณฑ์ สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักคือ นมเปรี้ยว โยเกิร์ตและนมผงสำหรับเด็ก และจากฐานข้อมูล GNPD พบว่าผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกที่วางจำหน่ายทั่วโลกมีเพียง 64 ผลิตภัณฑ์ โดยส่วนใหญ่เป็นอาหารเสริมหรือนมผงสำหรับเด็ก ซึ่งทำให้ผู้บริโภคมีทางเลือกน้อยในการเลือกซื้อ อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบผงทำให้เสียเวลา ยุ่งยากต่อการเตรียมเพื่อบริโภค และหากมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำผลไม้ที่มีสรรพคุณเป็นซินไบโอติก โดยมีการกล่าวอ้างว่าเชื้อจุลินทรีย์จะยังคงเหลือรอดไปถึงระบบทางเดินอาหาร พบว่าผู้บริโภคร้อยละ 90 ให้ความสนใจที่จะซื้อ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 61

เอกสารอ้างอิง

กัญญรัตน์ กัญญาคำ. 2558. พรีไบโอติก และโปรไบโอติก. วารสารอาหาร. 45(4): 29–32.

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง การใช้จุลินทรีย์โพรไบโอติกในอาหาร พ.ศ. 2554, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 128 ตอนพิเศษ 86 ง, 2554.

พูลชัย จรัสเจริญวิทยา. 2554. ท้องผูก:ความชุกของโรค. สาขาวิชาโรคระบบทางเดินอาหาร ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล.

มยุรา วัฒนพงศ์ไพศาล และคณะ. 2558. ผลของการบริโภคน้ำผักผลไม้ผสมใยอาหารต่อการ ขับถ่ายอุจจาระในผู้ที่มีภาวะท้องผูก. วารสารสาธารณสุขศาสตร์. 45(2): 210–224

Esmaeilinezhad, Z., Babajafari,S., Sohrabi, Z., Eskandari, M.-H., Amooee, S., Barati-Boldaji R., 2018. Effect of synbiotic pomegranate juice on glycemic, sex hormone profile and anthropometric indices in PCOS: A randomized, triple blind, controlled trial. Nutr Metab Cardiovasc Dis. 29. doi.org/10.1016/j.numecd.2018.07.002.

Kumar C. G., Sripada S., Poornachandra Y. 2018. Status and Future Prospects of Fructooligosaccharides as Nutraceuticals. In Role of Materials Science in Food Bioengineering: Handbook of Food Bioengineering (pp. 451–503). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811448-3.00014-0.

Maria, A., Papademas, P., Tsaltas. D. 2020. "Review on non-dairy probiotics and their use in non-dairy based products" fermentation. 6(1): 30. doi.org/10.3390/fermentation6010030.

Markowiak P., Śliżewska, K. 2017. Effects of Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics on Human Health. Nutrients. 9(9):1021. doi.org/10.3390/nu9091021.

Exploring consumer and non-consumer insight (perspective) towards non-alcoholic beer using focus group discussion

Chantawat Rungserichai*, Tantawan Pirak, Aussama Soontrunnrudrungsri
Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author; E-mail address: chantawat.ru@ku.th

Abstract

This research was aimed to investigate the perspectives of both consumers and non-consumers of beer by conducting market survey and consumer research. The current non-alcoholic beer markets in Thailand. Global New Product Database (GNPD) showed that 133 products were launched in Asia pacific countries which were 4.16 times less than that were launched in European countries in the last five years. Focus group discussion of 4 sessions was performed to understand the perspectives of both beer's consumers and non-consumers. The participants were selected by screening based on the behavior. The discussions were focused on consumer's opinions, insights, and perspectives related with beverage in general, regular beer, and non-alcoholic beer. It was found that the reason that non-consumers refused to consume beer was because of its strong fermenting flavor. They stated that they were more interested in flavored beer than original beer. In the other hand, participant that are beer consumers said that they liked hops flavor of non-alcoholic drink as well as the drunk emotion that occurred from the taste, odor, and flavor of non-alcoholic beer.

Keywords: focus group discussion, non-alcoholic beer, perspective

Introduction

Beer is the well-known, oldest, and most consumed beverage in the world. It is first produced approximately 7,000 BCE (Hornsey, 2016). Beer is described as a beverage produced from fermentation process that contain alcohol, consuming beer will give a unique experiences and flavor, whereas craft beer is described as a beer that have more variety of flavor and produced in a smaller batch. In addition, from Pilarski et al., 2019 and Sohrabvandi et al., 2012, consuming beer in moderate amount can help in health benefits and a source of both minerals and antioxidant. However, after the pandemic, people are seeking for healthier choice for themselves. Beverages are the one of the growing category that expected to increase (Statista, 2022).The healthy beverage are under the interest, which non-alcoholic or zero% beer is one of the popular product, which is healthier when consumed since it reduced the consequences of alcohol intake, where teenagers and older generations are the main persons who interested of non-alcoholic beer due to the age limit and health problem (Piornos et al., 2022). In addition, there are potential of non-alcoholic beer can reduce the addiction of beer (Shield et al., 2013)

This research was done to study the perspective of both consumer and non-consumer toward beer with and without alcohol to understand the reason behind the choice of consumption. Also, research on the current non-alcoholic beer market in Thailand and using Global Product Database (GNPD) online platform. The perspectives were achieved by conducting focus group discussion of both consumer (CS) and non-consumer (NCS) session. In each session, the participants will be asked questions and having activities to understand their point of view that have toward beer, non-alcoholic beer, and craft beer.

Materials

Equipment for conducting focus group discussion such as paper, pen, cups, highlighter, cardboard, index card, video, and voice recorder etc., together with materials that were needed to perform activities during focus group discussion, for example, three different essential oils that brought from Kamakamet and four brands of non-alcoholic beer that brought from Tops Market both at Central World, Bangkok, Thailand.

Methods

1. *The study of current non-alcoholic beer market in Thailand surveyed in onsite and worldwide online market.*

Market research was observed with 30 marketplaces, 15 places of convenience store, 7 places of supermarket and 8 places of hypermarket, that sold non-alcoholic beer in Thailand, and using Global New Product Database (GNPD) within last five complete years and global trends on non-alcoholic beer using “non-alcoholic beer” and “functional non-alcoholic beer” as keywords.

2. *The study of multiple perspective and unfiltered feedback of small groups from consumers and non-consumers using focus group discussion*

Focus group discussion was conducted according to Myrnes-Hansen et al. (2022) with some modifications. The topic in the sessions was the perspectives, experiences, insight, and opinions of the participants toward beer, non-alcoholic beer, and craft beer. There was a total of 26 participants were participating which could be separated into 3 sessions consisted with 20 consumers and a session of 6 non-consumers. All participants were selected by screening based on their drinking behavior. The sessions were held at Agro-industry building 1 start from 11:00 – 12:30 pm. Before the focus group discussion start, participants were asked to read the information of this focus group discussion and sign the consent form that allowed recording the video and the conversation that taking place throughout the session. There were probing questions and intervention activities leading to know more about opinion, insight, and perspectives of the participants. The results were analyzed using content and narrative analysis.

2.1. Intervention activity 1: The study of relationship between emotion and beer of consumers and non-consumers

Participants were given a cup of aroma to use the sense of odor together with sense of hearing when open with music as shown Table1. All participants were given an eye patch and asked to close their eye, smell the aroma, and listen to the music and express how they feel, what kind of image that they saw and did they like it.

Table 1 The set of aromas and music that used in focus group discussion activity

Aromas	Night lotus	White tea	Cedar wood
Music Type	EDM	Classical	Country
Scene that was given	Night club	Restaurant	Street food

2.2. Intervention activity 2: The study of factors affecting purchasing place of consumers and non-consumers.

Participants were given a map that locates most of the marketplace such as convenience store, supermarket and hypermarket that are open in Thailand. All participants were asked to point out which market that they will go to if their house was in each location. The location will be changing three times to understand the reason that they chose the marketplace in each change.

2.3. Intervention activity 3: Product Tasting of non-alcoholic beer.

Participants were given four different brands of non-alcoholic beer that sold in Thailand. Without knowing which brand will be tasted, all participants were asked to select which sample that they like the most and why, before knowing what brand was that sample.

Result and discussion

1. The study of current non-alcoholic beer market in Thailand and in online platform

When searching the keyword "non-alcoholic beer", 133 products were launched in Asia pacific countries (APAC). The number was around 4 times less than that were launched in European countries (EMEA) in the last five years. Indicated the higher consumer interest of non-alcoholic beer. In Thailand, there were only 9 non-alcoholic beers officially launched in the last five years.

When adding the keyword "functional" to the original search of "non-alcoholic beer", there had been only 15 functional non-alcoholic beer were introduced worldwide in the last five years, such as, non-alcoholic beer fortified with fiber from China, immunity boost from Canada and ability to inhibit the absorption of fat and regulate neutral fat level from Japan, etc. (GNPD, 2022).

Table 2 Number of branches that sold non-alcoholic beer in observed Thai marketplace branches

Marketplace		Number of branches that sold non-alcoholic beer
Name	Number of branches observed	
Seven-eleven (SE)	15	0
Family Mart (FM)	1	0
Lawson (LS)	2	1
Tesco Lotus (TL)	2	1
Big C (BC)	2	0
Max Value (MV)	3	0
Tops Market (TM)	5	3
La villa market (LM)	3	2

According to the result in Table 2, there was only 1 branch of LS sold the non-alcoholic beer, indicating low demand of non-alcoholic beer at convenience store. The result shown the same as supermarkets, 2 branches of TL and BC, and 3 branches of MV were observed. There was only 1 TL that sold non-alcoholic beer on the shelf. On the other hand, hypermarket, including the 5 branches of TM, and 3 branches of LM sold alcohol-free beer. The total of 3 branches of TM and 3 branches of LM sold more than 5 brands of non-alcoholic beer. This indicated the demand in these two markets which people tend to buy non-alcoholic beer. Moreover, the locations of these markets were at the center of the Bangkok which have large amount of foreigner as well as the target and the channel of beer business are difference. These were the factors that affected the availability of non-alcoholic beer presented in the markets.

2. The study of multiple perspective and unfiltered feedback of a large group from consumers by focus group discussion

2.1. The study of multiple perspective and unfiltered feedback of non-consumers of beer by focus group discussion

. The result of participant viewpoint indicated the negative perspective of beer. The participants believed that beer was not good for their health. In contrast, craft beer had better look in more customization, various flavors, and special-limiting amount in the market. Hence, these factors drove the liking of consumer to feel like it was the special product for the special occasion. Even though, craft beer was more expensive, they were happy to buy. Moreover, the focus group results also revealed that participants had the health awareness regarding consumption of beer. The high calories and fats from beer consumption can cause liver problem. The positive health effect from beer consumption was to help increase the blood pressure for hypotension. Participants also said that non-alcoholic beer was invented to meet the need of consumers during COVID-19 pandemics since people needed to stay healthy and can't go out for socialize and participate in the celebrations. From the first activity that have been done in the session, this group of consumers preferred classical music together with white tea aromas, they said that it gave relaxing image and a place that they can release stress. However, the other two options gave unconformable feeling. This indicates the environment that has highest potential for non-consumers to drink non-alcoholic beer.

2.1.1. Buying behavior of non-consumers of beer

Participant of NCS gave an interesting idea. The factors influencing beer quality were fermenting places and ingredient used to brew, for example, the beer brewed in German might have higher quality than that brewed in Thailand. Furthermore, some of the participants also said that the packaging of the product as well influence the quality of product in the market.

2.1.2. Non-alcoholic beer tasting for non-beer consumer.

In the discussion session, participants were asked to taste 4 different brands of non-alcoholic beer that were available in the market. Surprisingly, all NCS participants choose the brands that were claimed zero sugar and calories which make this product lighter in taste than normal non-alcoholic beer, adding of flavors may result in consumption since the flavors that added might help to reduce hops and fermenting flavor in the non-alcoholic beer (Fig 1). Moreover, participants were given two sets of pictures containing a glass of beer that have and don't have foam. It seems that everybody agreed that foam was the major attribute that made up "Beer."

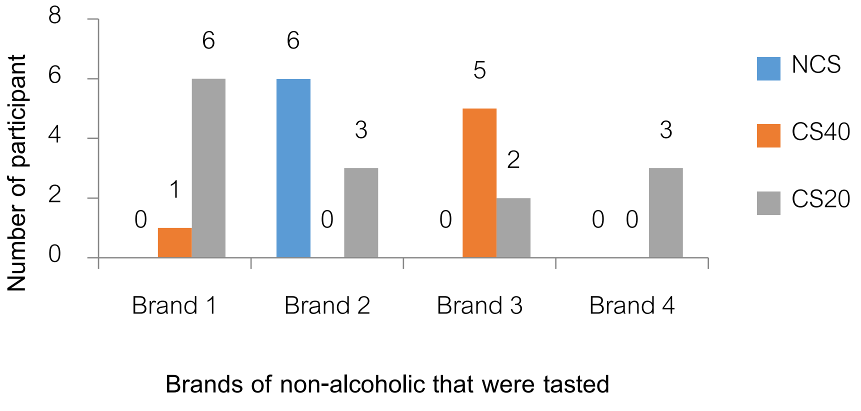


Fig. 1 Most liked brands of non-alcoholic beer

The abbreviation "NCS" stand for non-consumers.

The abbreviation "CS40" stand for Consumers who are above 40 years old.

The abbreviation "CS20" stand for Consumers who are between 20 to 39 years old.

2.2. The study of multiple perspective and unfiltered feedback of beer consumers by focus group discussion

From the study, the definition of beer, non-alcoholic beer and craft beer from participants' viewpoint was "The fermented sparkling beverage, extremely delicious when paired with food. It was also a famous beverage help in socializing."," The product that was invented for those who want to drink beer but does not want alcohol or dislike them.", and "The homemade beverage, produced in a small batch and have more varieties of flavors" respectively. Those consumers with age more than 48 years old don't have the knowledge on beer production, they always think of the consequences of consuming beer. Whereas younger consumers said that it was advantages. Participants also concerned that consume beer will result in bloating and knowing the reason how it causes.

2.2.1. Drinking behavior of beer consumers

For beer consumers, the consumption behavior of beer could be separated into two groups, those who consumed with friends and those who consumed alone. The consumers who consumed beer with friends were consumed at night around 8 p.m. until they got drunk. In the other hand, those who consumed alone tend to drink whenever they want, especially during the mealtime with the side dish or other foods. All participants agreed that they consumed it cold without putting an ice since the ice could make beer lost it taste and flavor. From the first activity it was fascinating that both NCS and CS participants have a same though about the music and aroma that they like and even have the same reason for it.

2.2.2. Buying behavior of beer consumers

They usually selected the product from its brand, country of production and the new brand that was just launched, for them, foam generating and stabilizing of beer is one of the major things that can tell the quality of beer as same as the flavor composition and the after taste of the beer. In addition, 60% of participants saying that they would like to try a new brand of beer and willing to change if they enjoyed the taste, odor and flavor, whereas 30% said that they always changing brand to collect the bottle.

2.2.3. Non-alcoholic beer tasting for beer consumers.

During the tasting of non-alcoholic beer, participants that are CS like the brand of non-alcoholic beer that can mostly simulate original beer with strong flavor of hops as in brand 1 and brand 4 as shown in Fig 1. However, for those who doesn't like hops flavor and odor, they prefer the lightest brand of non-alcoholic beer, brand 2. Unexpectedly, one of them said that drinking non-alcoholic beer made get her felt drunk. This maybe because human body was remembered the taste, odor and flavor of the beer and resembled the emotion and feeling of getting drunk.

3. The relationship between perspective of consumers and non-consumers of beer

From both NCS and CS we could see that NCS likes non-alcoholic beer that were very light and usually looked at the nutritional factor if they had to choose a non-alcoholic beer, while CS like those non-alcoholic beer that have strong hop flavor which could better simulate taste of original beer or beer that contain alcohol. Both NCS and CS were looking at different things when come to quality comparison of non-alcoholic beer. NCS will mostly look at the extrinsic factors such as place of fermentation, materials used or the design of packaging, while CS look at the intrinsic factor, for example like, the dimension of taste, the odor, and flavors. From above result, it seems that NCS preferred and interested in flavored beer as same as CS that like craft beer. This indicated that there is a potential connection between both beer consumers and non-consumers.

Conclusion

The market size of non-alcoholic beer and craft beer was increased steadily since year 2012 to 2022 and forecasted to continually increase further. The immerging of functional non-alcoholic beer can be an opportunity to breweries industry to develop new product that can meet up to consumers' satisfaction. Moreover, the perspectives of both NCS and CS showed the preferred attribute of beer that both consumers and non-consumers liked which designate the connections between them that can be used to develop new idea. It also helped to understand the opinions and insight of both CS and NCS toward breweries industry.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, through an e-Proceedings scholarship.

References

GNPD 2022, Non-alcoholic beer, 2018–2022. https://www.gnpd.com/sinatra/search_results/?search_id=dDojApg1NZ&page=0, 10 December 2022

Hornsey, I. S. 2016. Beer: History and Types, Editor(s): Benjamin Caballero, Paul M. Finglas, Fidel Toldrá, Encyclopedia of Food and Health. Academic Press, Pages 345–354, ISBN 9780123849533.

Myrnes-Hansen, K. V., Skeiseid, H. V. 2022. How to start a Focus Group: Using cartoons in adult focusgroups to discuss consumers feedback expectations in food service settings. Int J Gastron Food Sci. 29: 100582.

Piornos, J. A. Koussissi, E., Balagiannis, D. P., Brouwer, E., Parker, J. K. 2022, Alcohol-free and low-alcohol beers: Aroma chemistry and sensory characteristics. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 22(1): 233-259

Pilarski, D. W., Gerogiorgis, D. I. 2019. Progress and modelling of cold contact fermentation for alcohol-free beer production: A review. J. Food Eng. 273: 109804.

Shield, K. D., Parry, C., Rehm, J. 2013. Chronic diseases and conditions related to alcohol use. Alcohol Research: Current Reviews. 35(2): 155–173

Sohrabvandi, S., Mortazavian, A. M., Rezaei, K. 2012. Healthrelated aspects of beer: A review. Int. J. Food Prop., 15(2): 350–373

Statista 2022 Beer Worldwide – Volume consumption of beer and non-alcoholic beer. https://www.statista.com/outlook/cmo/alcoholic-drinks/beer/worldwide,10 November 2022.

Effect of cooling rate on pasting properties of various starch and flour types

Chayada Bhatpattana, Duanggamol Jullapanya, Pattharasuda Hanucharoenkul, Rungnaphar Pongsawatmanit*
Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: fagiruw@ku.ac.th

Abstract

Cooling is one of processing steps used in food production. Cooling rate may affect starch molecule reassociation leading to changes in pasting properties of the starch-based products. Therefore, the aim of this study was to investigate the pasting properties of different flour types under different cooling rates (2, 6 and 10 °C/min) using a rapid visco-analyzer (RVA). Potato starch (PS), tapioca starch (TS), glutinous rice flour (GRF) and rice flour (RF) were selected to study. The 10% w/w starch/flour dispersions were prepared for RVA measurement. The amylose content in each sample was also determined. The results showed that different starch and flour types and cooling rates showed different RVA pasting profiles. The RVA peak viscosity of PS and TS were higher than those of GRF and RF under heating profile. On cooling profiles of PS, TS and GRF, higher cooling rates enhanced the final viscosity and setback values ($p < 0.05$). However, the highest values of both pasting properties were observed in RF pastes with no significant difference among three cooling rates expected from the high amylose content. The results indicated that cooling rate affected the final viscosity of starch containing amylose content < 30%.

Keywords: cooling rate, pasting properties, potato starch, rice flour, tapioca starch

Introduction

Starch and flour are the ingredients widely used in many food products as a thickener or gelling agent (Li et al., 2014). Starch and flour obtained from different botanical sources could provide different contribution of the starch structure in the systems (Srichuwong et al., 2005) resulting in great variations in properties and quality of the final food product such as pasting properties. Tuber and root starches have unique properties that exhibit considerably high single-stage swelling and high peak viscosity. The granule morphology of potato starch (PS) was reported with a bimodal population consisting of a mixture of large oblong granules and small spherical granules with smooth surfaces (Cisneros et al., 2018; Singh et al., 2016) providing functions as stabilizer, thickener, gelling agent, bulking agent, and water-holding agent. Tapioca starch (TS) obtained from cassava roots with the low fat and protein contents. The granules of TS consist of a mixture of truncated (small granules) and round granules (large granules) (van de Velde et al., 2002; Breuninger et al., 2009). Rice flours (RF) are also widely used in many products, including puddings, salad dressings, beverages, including gluten-free diets. Starch granules of the rice cultivars were found to be small, polyhedral shapes with smooth surfaces (Kraithong et. al 2018). The starch granules of glutinous rice were mainly composed of polyhedral and irregular-shaped granules (Kang et al., 2010). The differences in amylose content and degree of interaction between amylose chains in the amorphous regions of the granule had a substantial influence on the differences in physicochemical properties due to the difference in the granular swelling, amylose leaching, gelatinization characteristics, pasting properties and retrogradation rates (Srichuwong et al., 2005). The glutinous rice flour (GRF) was reported to have poor shear resistance and poor gel-forming ability (Qin et al., 2016). However, RF contains granules small, polyhedral shapes with smooth surfaces (Marcoa and Rosell, 2008) has a soft taste and colorless. Similar to RF, GRF also contains small polyhedral shape starch granules.

Changes in the process conditions especially in heating and cooling steps are important factors that may affect the pasting properties and quality of starch-based products. Cooling process during food preparation plays an important role in the final products regarding retrogradation after gelatinization (Chantaro et al., 2013). The cooling rate may affect the properties and qualities of the starch-based products. A rapid cooling rate decreases the re-crystallization of rice starch gel (Ma et al., 2021) and corn starch gel (Byars et al., 2003). The PS, TS, GRF, and RF are widely used in food products. Therefore, in this study, the PS, TS, GRF, and RF were selected to evaluate the pasting characteristics under different cooling rates using a rapid visco-analyzer (RVA) to reveal the changes in pasting properties of different starch and flour types. The cooling rates at 2 °C/min, 6 °C/min and 10 °C/min were used according to Jullapanya et al. (2021). The findings from the pasting properties of these starch and flour under different cooling rates could be used to modify the quality of starch-based food in product development.

Materials and Methods

Materials

The TS was purchased from Siam Modified Starch (Pathum Thani, Thailand). PS (Mcgarrett®), GRF (Cho Heng, Thailand) and RF (Cho Heng, Thailand) were obtained from the supermarket and used as received without any further purification. The potato amylose (Type III, Sigma Co., St. Louis, USA) was used for determining standard curve. The moisture contents of the PS, TS, GRF and RF were 17.0%, 11.1%, 12.5% and 12.5% w/w (dry basis), respectively, as determined according to AOAC (2000) using hot-air oven at 105 °C. The reports of protein and lipid contents of PS, TS, GRF and RF were [0.06, 0.25, 8.43 and 7.31] and [0.05, 0.15, 0.79, and 0.61], respectively (Swinkels, 1985; Wang et al., 2020).

The amylose contents of starch and flour samples were determined using the method modified from Juliano (1971). The absorbance of the solutions was measured at 620 mm using a spectrophotometer (UV-Vis model 2100, Japan).

Determination of pasting properties using a rapid visco-analyzer

The pasting properties of different starch and flour types (PS, TS, GRF and RF) were evaluated using RVA (4500, Perten Instruments AB; Hägersten, Sweden). The mixtures of 10% w/w of each flour type were prepared according to the method of Pongsawatmanit et al. (2013). For each starch and flour sample, pre-weighed distilled water was added into the RVA canisters. Then, the pre-calculated amounts of each starch or flour were dispersed to achieve a total weight of 28 g for preparing 10% w/w starch mixture. The suspensions were stirred and kept at room temperature for a further 30 min to ensure a complete hydration of the polysaccharide before measurement.

The pasting profiles and pasting properties of the samples were determined at different cooling rates according to the method of Jullapanya et al. (2021). Briefly, this involved: equilibrating the dispersion at 50 °C for 1 min, increasing the temperature to 95 °C at a heating rate of 6 °C/min, holding the temperature at 95 °C for 5 min, decreasing the temperature to 50 °C using cooling rates of 2 °C/min, 6 °C/min and 10 °C/min. Finally, the holding step at 50 °C for 2 min was performed. The total running times of the cooling rates at 2 °C/min, 6 °C/min and 10 °C/min were 38 min, 23 min and 20 min, respectively. The agitation speed of the paddle started at 960 revolutions per minute (rpm) for the first 10 s and then it was kept constant at 160 rpm until the end of the measurement. Pasting profiles (pasting temperature, peak viscosity, final viscosity and setback) were determined in triplicate and the mean values ± SD were reported.

Statistical analyses

All experiments were carried out using three freshly prepared samples. The results were reported as the mean values with standard deviations. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA). Duncan's multiple range test was applied to investigate significant differences of mean values at a test level of $p < 0.05$.

All statistical analyses were performed using the SPSS software (version 12, SPSS (Thailand) Co. Ltd.; Bangkok, Thailand).

Results and Discussion

Amylose content plays an important role in determining the quality of starch-based products. Each type of starch/flour contained different amylose contents as shown in Table 1. The highest amylose content (32.44%) was observed in the RF sample in this study compared to the other flour types (29.41%, 21.71% and 6.25% for PS, TS and GRF, respectively). The differences in the amylose content and the extent of the interaction between amylose chains in the amorphous regions of the granule could affect on the physicochemical properties of starch-based (Srichuwong et al., 2005) because of the difference in the granular swelling, amylose leaching, pasting properties and retrogradation rates (Juhász and Salgó 2008). Therefore, pasting properties of 10% w/w flour (dry basis) were prepared for RVA measurement with different cooling rates as shown in Fig. 1(A)

On RVA heating profile, the increasing temperature causes the starch granules to swell above pasting temperatures, the viscosity increased rapidly and the starch granules rupture leading to the leaching out of the starch molecules into the continuous phase of the dispersions until reaching a peak viscosity. The difference in the cooling rate did not affect the pasting temperatures and peak viscosity of each starch sample (p > 0.05) because of the same heating profile. The pasting temperature of RF was found to be the highest value (87.5°C) expected from the highest amylose content (Table 1) compared to the other starch and flour samples (PS, TS and GRF = 66.0, 68.2 and 68.5 °C, respectively). The pasting temperature may depend on not only the amylose content since the low amylose content of GRF revealed higher pasting temperature than PS and TS. However, the higher peak viscosity was observed in tuber starch (8,740 mPa.s and 5,548 mPa.s for PS and TS, respectively) whereas the peak viscosity of cereal grain was lower (3,746 mPa.s and 2,971 mPa.s for GRF and RF, respectively) than those of tuber starch. The results show good agreement with the reports of Zaidul et al. (2007), Blennow et al. (2001) and Qazi et al. (2014) that the tuber starches had high peak viscosity values, while rice flour had relatively low peak viscosities due to tuber starches containing lower contents of protein, fat and phosphorous. The higher peak viscosity and lower pasting temperature were observed in the tuber starches.

When the dispersions were held at the holding temperature (95 °C) as shown in Fig. 1 under the mechanical shear stress, further disruption was continued to occur, leading to the amylose leaching out, followed by the fraction of amylopectin molecules at a slower rate. Subsequently, when the samples were cooled down to 50 °C at different cooling rates of 2 °C/min, 6 °C/min and 10 °C/min as shown in Fig. 1 (B), the viscosity of the pastes increased to a final viscosity at the end of the RVA experiment expected from the re-association of the amylose molecules and gel network formation.

Table 1 Amylose contents and RVA pasting temperature and peak viscosity of 10% w/w starch and flour dispersions using cooling rates at 6 °C/min (PS = potato starch, TS = tapioca starch, GRF= glutinous rice flour and RF = rice flour).

Flour type	Amylose content* (% db)	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (mPa.s)
PS	29.4±0.2[d]	66.0±0.2[c]	8740±13[a]
TS	21.7±0.6[c]	68.2±0.2[b]	5548±19[b]
GRF	6.2±1.1[b]	68.5±0.3[b]	3746±33[c]
RF	32.4±0.2[a]	87.5±0.0[a]	2971±20[d]

Mean ± standard deviations followed by a different lower-case letter within the same column are significantly different (p < 0.05) by Duncan's multiple range test.

*Amylose content values were reported based on starch/flour weight.

The final viscosity and setback of starches and flours (10% w/w) under the different cooling rates were showed in Fig. 2. The final viscosity (Fig. 2A) and setback (Fig. 2B) values increased with increasing cooling rates (p < 0.05) from 2 °C/min to 10 °C/min. It indicates that the different cooling rates affected the re-association of gelatinized starch molecules. Byars et al. (2003) reported that the rapid cooling rate may inhibit the phase separation between the amylose and amylopectin molecules leading to a stronger gel network. However, the 10% RF samples revealed no significant difference with different cooling rates for both final viscosity and setback values, expected from the high amylose content (> 30%) of RF.

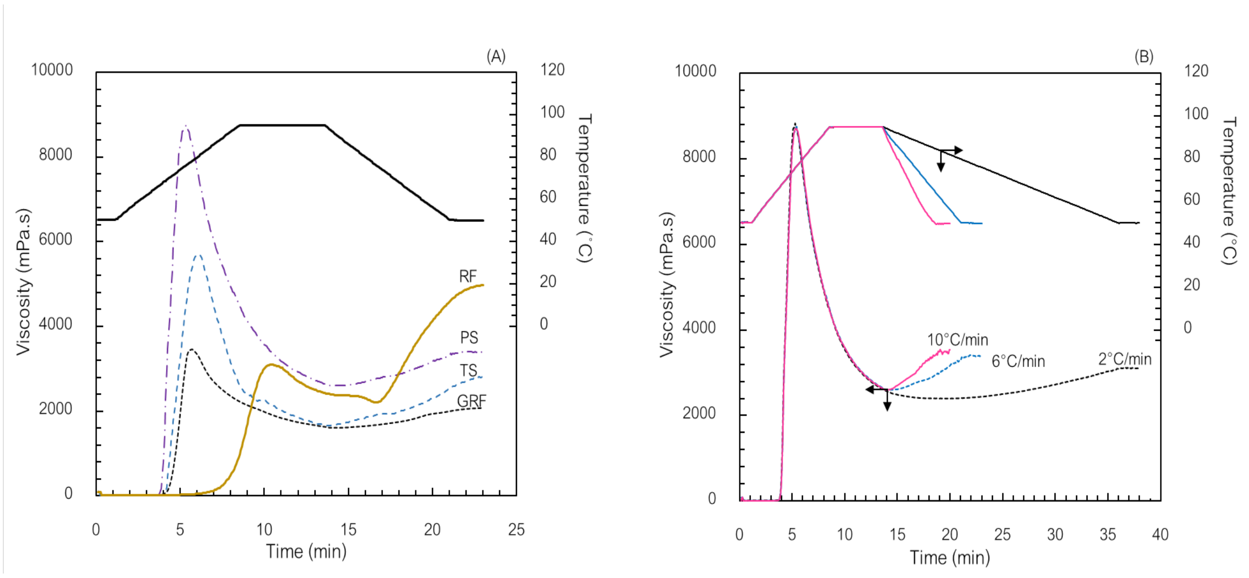


Fig. 1 Typical RVA profiles of 10% w/w starch and flours (PS = potato starch, TS = tapioca starch, GRF= glutinous rice flour and RF = rice flour) at cooling rate of 6 °C/min (A) and RVA pasting profiles from potato starch with cooling rates of 2, 6 and 10 °C/min (B). The arrows represent x-axis and y-axis of the curve.

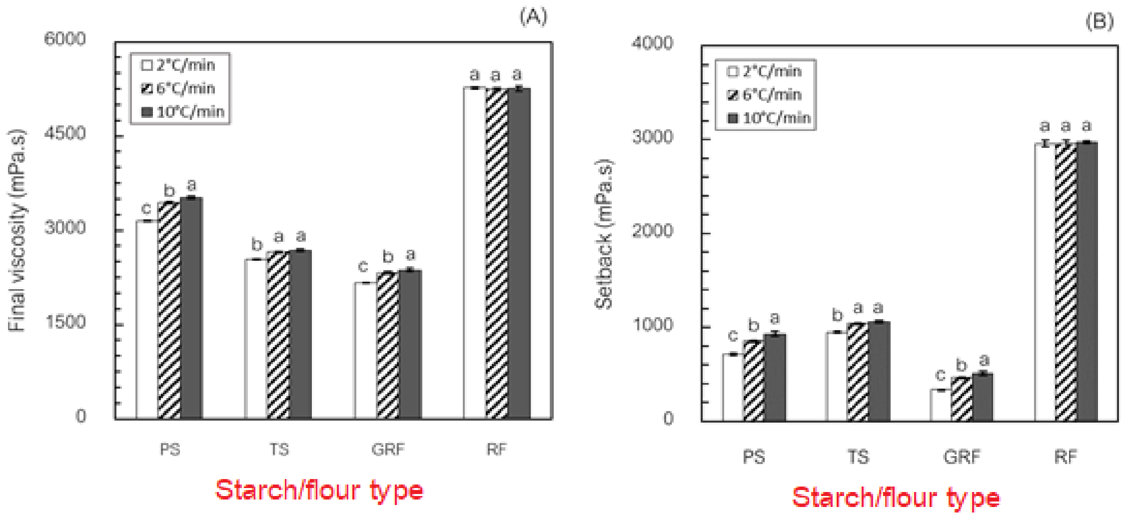


Fig. 2 Final viscosity (A) and setback (B) values of different starch and flour types (10% w/w) from RVA measurement under different cooling rates, where vertical error bars represent ± SD of the three measurements and different lowercase letters above columns indicate significant difference (p < 0.05). PS = potato starch, TS = tapioca starch, GRF= glutinous rice flour and RF = rice flour.

Therefore, the final viscosity of starch and flour as a function of amylose content was plotted excluding the RF sample as shown in Fig. 3 for different cooling rates. The final viscosity increasing with increasing amylose content and cooling rate was clearly observed. The exponential equation was used to explain the changes in final viscosity with different amylose contents with r^2 values >0.84 in this study.

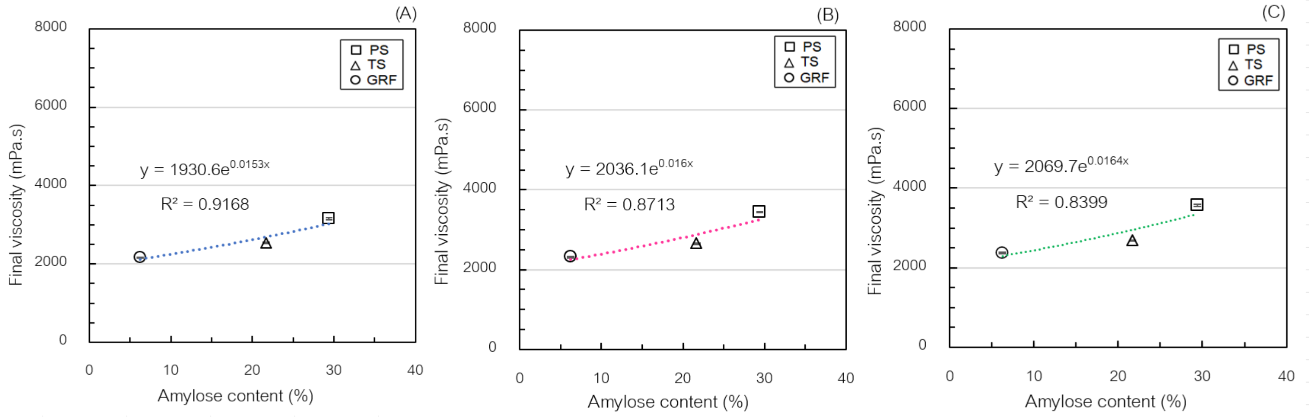


Fig. 3 Final viscosity as a function of amylose content of starch and flour (PS = potato starch, TS = tapioca starch and GRF= glutinous rice flour) at cooling rates of 2 °C/min (A), 6 °C/min (B) and 10 °C/min (C).

Conclusion

The pasting properties of starch and flour depended on the cooling rates and botanical sources including amylose content in the sample. The final viscosity and setback values increased with increasing cooling rates for TS, PS and GRF. The cooling rates did not affect the final viscosity and setback values of the RF samples containing the highest amylose content in this study. The amylose content showed a positive relationship with final viscosity. The information gained from this study is expected to be further applied in the preparation of starch-based foods in food industry.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the conference funding support from the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

References

Association of Official Analytical Chemists. 2000. Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemists, 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, MD, USA.

Blennow, A., Bay-Smidt, A. M., Bauer, R. 2001. Amylopectin aggregation as a function of starch phosphate content studied by size exclusion chromatography and on-line refractive index and light scattering. Int. J. Biol. Macromol. 28: 409–420.

Breuninger, W. F., Piyachomkwan, K., & Sriroth, K. 2009. Tapioca/cassava starch: production and use. In Starch (pp. 541–568). Academic Press.

Byars, J.A., Fanta, G.F., Felker, F.C. 2003. The effect of cooling conditions on jet-cooked normal corn starch dispersions. Carbohydr. Polym. 54: 321–326.

Chantaro, P., Pongsawatmanit, R., Nishinari, K. 2013. Effect of heating–cooling on rheological properties of tapioca starch paste with and without xanthan gum. Food Hydrocoll. 31: 183–194.

Cisneros, F. H., Zevillanos, R., Figueroa, M., Gonzalez, G., Cisneros-Zevallos, L. 2018. Characterization of starch from two Andean potatoes: Ccompis (Solanum tuberosum spp. andigena) and Huayro (Solanum x chaucha). Starch-Stärke. 70: 1700134.

Juhász, R., & Salgó, A. 2008. Pasting behavior of amylose, amylopectin and their mixtures as determined by RVA curves and first derivatives. Starch-Stärke. 60: 70–78.

Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Sci. Today. 16: 334–340.

Jullapanya, D., Hanucharoenkul, P., Pongsawatmanit, R. 2021. Influence of sucrose and cooling rate on pasting properties and freeze-thaw stability of tapioca starch pastes with and without xanthan gum. Agr. Nat. Resour. 55: 644–653.

Kraithong, S., Lee, S., Rawdkuen, S. 2018. Physicochemical and functional properties of Thai organic rice flour. J. Cereal Sci. 79: 259–266.

Li, E., Dhital, S., & Hasjim, J. 2014. Effects of grain milling on starch structures and flour/starch properties. Starch-Stärke. 66: 15–27.

Ma, R., Zhan, J., Jiang, Z., Tian, Y. 2021. Effect of cooling rate on long-term recrystallized crystal of rice starch in the presence of flavor compounds. Food Chem. 345: 128763.

Marcoa, C., & Rosell, C. M. 2008. Effect of different protein isolates and transglutaminase on rice flour properties. J. Food Eng. 84: 132–139.

Pongsawatmanit, R., Chantaro, P., Nishinari, K. 2013. Thermal and rheological properties of tapioca starch gels with and without xanthan gum under cold storage. J. Food Eng. 117: 333–341.

Qazi, I., Rakshit, S. K., Tran, T., Ullah, J., Khan, Z. 2014. Effect of blending selected tropical starches on pasting properties of rice flour. Sarhad J. Agric. 30: 357–368.

Qin, Y., Liu, C., Jiang, S., Cao, J., Xiong, L., & Sun, Q. 2016. Functional properties of glutinous rice flour by dry-heat treatment. PLoS One. 11: e0160371.

Singh, J., Colussi, R., McCarthy, O. J., & Kaur, L. 2016. Potato starch and its modification. In Advances in potato chemistry and technology (pp. 195-247). Academic Press.

Srichuwong, S., Sunarti, T. C., Mishima, T., Isono, N., Hisamatsu, M. 2005. Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure to swelling and pasting properties. Carbohydr. Polym. 62: 25–34.

van de Velde, F., van Riel, J., Tromp, R. H. 2002. Visualisation of starch granule morphologies using confocal scanning laser microscopy (CSLM). J. Sci. Food Agric. 82: 1528–1536.

Wang, L., Zhao, S., Liu, Y., and Xiong, S. 2020. Quality characteristics and evaluation for sponge cakes made of rice flour. J. Food Process. Preserv. 44: e14505.

Zaidul, I. S. M., Norulaini, N. N., Omar, A. M., Yamauchi, H., Noda, T. 2007. RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam, and cassava starches. Carbohydr. Polym. 69: 784–791.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติ
และสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources

And Environment)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

การกระจายของปูแสมในบริเวณป่าชายเลนบางแก้ว จังหวัดสมุทรสงคราม

Distribution of Mangrove Crabs in Bang Kaew Mangrove Forest, Samut Songkhram province

กรณ์รวี เอี่ยมสมบูรณ์[a,*], **ชนิดา ว่องวาจานนท์**[a], **นฤชล ภัทราปัญญาวงศ์**[b]

Kornrawee Aiemsomboon[a,*], Chanida Wongvajanon[a], Naruechon Pattarapanyawong[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[b]สถานีวิจัยประมงสมุทรสงคราม คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สมุทรสงคราม 75000

[a]Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

[b]Samut Songkhram Fisheries Research Station, Samut Songkhram 75000, Thailand

[*]Corresponding author. E-mail address: Kornrawee.a@gmail.com

บทคัดย่อ

ปูแสมเป็นสัตว์หน้าดินขนาดใหญ่อาศัยอยู่ในป่าชายเลน มีบทบาทสำคัญในป่าชายเลน ในการช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายอินทรียสารทำให้เกิดความอุดมสมบูรณ์ของป่าชายเลน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายของปูแสมบริเวณป่าชายเลนบางแก้ว จังหวัดสมุทรสงคราม โดยเก็บตัวอย่างปูแสม 2 ครั้ง ในช่วงเดือนมิถุนายนและธันวาคม พ.ศ. 2561 ในพื้นที่ป่าชายเลนปลูกอายุ 1 ปี และป่าชายเลนธรรมชาติ โดยใช้ตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์ขนาด 0.5x0.5 เมตร^2 พบปูแสมจำนวน 5 ชนิด คือ วงศ์ Sesarmidae จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ปูแสมก้ามแดง (*Parasesarma eumolpe*) ปูแสมก้ามแดง (*Episesarma mederi*) และ ปูแสมก้ามม่วง (*Episesarma versicolor*) วงศ์ Varunidae จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ ปูแสมฟัน (*Metaplax dentipes*) และปูแสมก้ามหัก (*Metaplax elegans*) โดยปูแสมฟันและปูแสมก้ามหักเป็นชนิดที่พบกระจายทั่วไปและพบจำนวนมากที่สุด ส่วนปูแสมก้ามม่วงพบว่ามีจำนวนน้อยที่สุด ทั้งนี้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อการกระจายของปูแสมในบริเวณป่าชายเลน ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนของน้ำ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ อนุภาคของดินเหนียว และปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน

คำสำคัญ: การกระจาย, ป่าชายเลน, ปูแสม

Abstract

The grapsid crabs are the dominant macro-fauna in mangrove forest, also play essential role to support on nutrient cycling by feeding on leaf litter and alter the properties of the leaf litter. This study aimed to investigate distribution of mangrove crabs in mangrove forest at Bang Kaew subdistrict, Samut songkhram province. The field sampling were taken 2 times during June to December 2018. Mangrove crab density enumerated from sampling in a quadrat 0.5×0.5 m^2. Mangrove crabs were collected from 2 areas comprised of the 1 year mangrove plantation and the natural forest. The crabs collected were classified into 2 family Sesarmidae found 3 species; *Perasesarma eumolpe*, *Episesarma mederi* and *E. versicolor* and Varunidae found 2 species; *Metaplax dentipes* and *M. elegans M. dentipes* and *M. elegans* were general distribution and were found highest. *E. versicolor* was found lowest. Dissloved oxygen, pH, clay texture and organic contents were the main factors affecting the distribution and abundance of mangrove crabs.

Keywords: Distribution, Mangrove, Mangrove crab

คำนำ

ป่าชายเลน (Mangrove forest) เป็นระบบนิเวศชายฝั่งที่มีความสำคัญ มีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การอยู่อาศัยหลบซ่อนศัตรูและเป็นแหล่งหาอาหารของสัตว์ทะเลหน้าดิน เป็นแหล่งสะสมสารอินทรีย์จากแผ่นดินซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของสัตว์ทะเลหน้าดิน ปูที่พบอาศัยในป่าชายเลนมีบทบาทห่วงโซ่อาหารของระบบนิเวศโดยช่วยหมุนเวียนสารอินทรีย์และธาตุอาหาร (Nagelkerken et al., 2008) ปูแสมที่พบอาศัยในป่าชายเลนมีบทบาทเป็นทั้งผู้บริโภคและผู้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในห่วงโซ่อาหาร ช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เกิดความอุดมสมบูรณ์และช่วยสร้างสมดุลและความอุดมสมบูรณ์ต่อระบบนิเวศป่าชายเลนซึ่งส่งผลต่อความชุกชุมและการดำรงชีวิตของปูแสม (Ashton, 2002; อนัญญา, 2557) ทั้งนี้พฤติกรรมการขุดรูของปูแสมช่วยระบายน้ำขังในดินให้มีการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจน เพิ่มความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในตะกอนเพิ่มขึ้น (Kristensen, 2008) และทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตะกอนดินที่จะส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์ในป่าชายเลน และทำให้สัตว์หน้าดินและสัตว์น้ำอื่นๆ เข้ามาในพื้นที่ป่าชายเลนได้อย่างรวดเร็วขึ้น (ณิฏฐารัตน์, 2546)

ปูแสมในป่าชายเลนมีขอบเขตการกระจายกว้างมาก พบได้ตั้งแต่บริเวณตอนล่างของหาดติดทะเลจนถึงบริเวณตอนบนของหาดที่ติดต่อกับแผ่นดิน เนื่องจากปูแสมแต่ละชนิดสามารถปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสภาพแวดล้อมในบริเวณต่าง ๆ ที่มันอาศัยอยู่ได้เป็นอย่างดี และปูแสมจะมีการแบ่งขอบเขตการกระจายอย่างชัดเจนขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่ ความเค็ม อุณหภูมิ ขนาดอนุภาคตะกอนดิน ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ปริมาณร่มเงาจากต้นไม้และการท่วมถึงของน้ำทะเล ซึ่งการกระจายและความหนาแน่นของปูแสมมีความสัมพันธ์กับลักษณะตะกอนดินในป่าชายเลน (ณิฏฐารัตน์ และคณะ, 2542) โดยปูแสมที่พบในป่าชายเลนธรรมชาติมักอาศัยในบริเวณตอนกลางของป่าชายเลนที่มีปริมาณอินทรีย์สารในดินสูง และพบปูแสมค่อนข้างน้อยในบริเวณพื้นที่เป็นดินทราย เนื่องจากมีปริมาณอินทรีย์สารต่ำสอดคล้องกับป่าชายเลนคลองโคน จังหวัดสมุทรสงคราม พบปูแสมก้ามแดง (*P. eumolpe)* มีการกระจายสัมพันธ์กับอนุภาคดินเหนียว และมีแนวโน้มผกผันกับอนุภาคดินทรายและอนุภาคทรายแป้ง (วันวิวาห์, 2544) ดังนั้นหากสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ป่าชายเลนเสื่อมโทรมลงจะส่งผลให้โครงสร้างทางธรรมชาติของระบบนิเวศถูกทำลาย พื้นที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเลหน้าดินลดลง และปริมาณสารอินทรีย์ในดินลดลงด้วย ส่งผลต่อชนิดและความหลายหลายและความชุกชุมของประชากรปูแสม (จำลอง และคณะ, 2545; ณิฏฐารัตน์, 2546) ในพื้นที่ป่าชายเลน

ป่าชายเลนพื้นที่หมู่ที่ 8 ตำบลบางแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม เป็นแนวป่าชายเลนริมชายฝั่งทะเลอยู่ใกล้กับบริเวณปากแม่น้ำแม่กลองจึงมีการสะสมดินตะกอนและมีธาตุอาหารสูง ปัจจุบันพื้นที่ป่าชายเลนถูกแผ้วถางป่าเพื่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การขยายตัวของชุมชน มีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรม ปัญหาการกัดเซาะชายฝั่ง และขยะที่ถูกพัดพามาสะสมในพื้นที่ (นฤชล และวีรกิจ, 2561) เป็นผลให้สภาพป่าชายเลนบางแก้วเสื่อมโทรมลงส่งผลต่อพื้นที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเลหน้าดิน ดังนั้น การศึกษาการกระจายของปูแสมบริเวณป่าชายเลนบางแก้วเพื่อใช้ความหนาแน่นของปูที่พบในป่าชายเลนบ่งชี้ความอุดมความสมบูรณ์ของป่าชายเลน และเป็นการสร้างองค์ความรู้พื้นฐานเพื่อใช้วางแผนการอนุรักษ์และจัดการป่าชายเลนและทรัพยากรสัตว์น้ำในพื้นที่ป่าชายเลนบางแก้ว และพื้นที่ใกล้เคียงต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ทำการศึกษา

พื้นที่ป่าชายเลน หมู่ที่ 8 ตำบลบางแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม บริเวณสวนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ (N 13°22'40" และ E 100°02'12") แสดงดัง Fig. 1 อยู่ทางทิศตะวันออกของปากแม่น้ำแม่กลอง

ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด 90 ไร่ จุดเก็บตัวอย่าง 2 สถานี ได้แก่ สถานีที่ 1 (จุดสีแดง) ป่าชายเลนติดทะเล ลักษณะเป็นหาดเลนติดชายฝั่งทะเล ดินลักษณะเหลว ปลูกกล้าไม้โกงกางใบเล็ก (*Rhizophora apiculata*, Blume) อายุประมาณ 1 ปี ได้รับอิทธิพลการท่วมถึงของน้ำทะเลในช่วงน้ำขึ้น แสดงดัง Fig. 2 (A) และสถานีที่ 2 (จุดสีฟ้า) ป่าชายเลนธรรมชาติ ดินลักษณะแข็งและมีกลิ่นเหม็น น้ำทะเลท่วมขังเฉพาะช่วงเวลาน้ำเกิด มีต้นแสมขาว (*Avicennia alba*, Blume) เป็นพันธุ์ไม้เด่น แสดงดัง Fig. 2 (B) เก็บตัวอย่างเดือนมิถุนายน 2561 (ต้นฤดูฝน) และเดือนธันวาคม 2561 (ปลายฤดูฝน) ช่วงน้ำทะเลลงต่ำสุดเวลากลางวัน

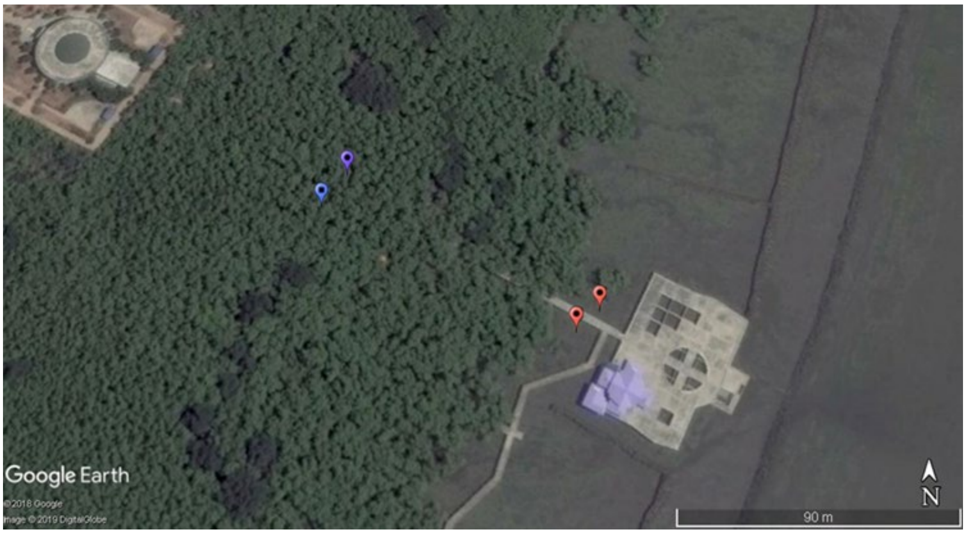


Fig. 1 Map of study areas in Bang Kaew Mangrove, Samut Songkhram province

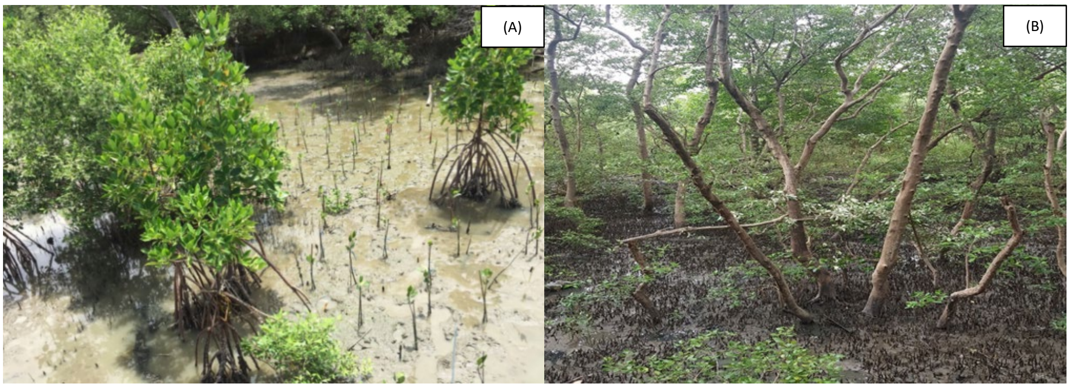


Fig. 2 Sampling sites: (A) the 1 year mangrove plantation; (B) the natural mangrove

วิธีดำเนินการศึกษา

การเก็บตัวอย่างปูแสม โดยใช้ตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์ (Quadrat) ขนาด 0.5×0.5 เมตร^2 วางสุ่มบนพื้นดิน กำหนดไว้บริเวณละ 6 อัน เก็บปูแสมที่มองเห็นในตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์ใส่ในถุงพลาสติกโดยใส่ใบไม้ลงไปในถุงด้วยเพื่อป้องกันปูต่อสู้กัน แล้วขุดดินภายในตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์จากผิวดินประมาณ 15 เซนติเมตร นำดินใส่ลงในถุงพลาสติก จากนั้นนำตัวอย่างปูแสมที่จับได้กลับมายังสถานีวิจัยประมงสมุทรสงคราม เพื่อทำการการุณยฆาตด้วยวิธี Rapid Cooling Shock (ดัดแปลงจาก Leary, 2013) โดยแช่ในน้ำแข็ง อุณหภูมิ 2–4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ปูหมดความรู้สึก และนำปูแสมมาถ่ายรูปพร้อมสเกลวัดความยาว ถ่ายรูปทั้งด้านกระดองหน้า (Carapace) ด้านท้อง

(Abdomen) ด้านหน้า (Anterior) และด้านหลัง (Posterior) ของตัวปู และนำตัวอย่างปูแสมมาดองในน้ำยาฟอร์มาลิน 10 เปอร์เซ็นต์ (Neutral buffer formalin) ที่ทำให้เป็นกลางแล้ว

ตัวอย่างปูแสมที่จับได้นำมาจำแนกชนิดทางอนุกรมวิธานโดยจัดลำดับชั้นทางอนุกรมวิธานจนถึงระดับชนิด (Species) ตามคู่มือของตาม Carpenter and Niem (1998); Boon et al. (2009); Lee et al. (2015); อาวุธ และคณะ (2559) โดยใช้ลักษณะของกระดอง ก้ามหนีบด้านบน (Dactylus) และอวัยวะสืบพันธุ์ที่รยางค์ท้องปล้องที่ 3 (เพศผู้คู่ที่ 1) ตัวอย่างปูแสมที่ได้นำมานับจำนวน (ตัว) และแยกเพศ นำตัวอย่างปูแสมมาชั่งน้ำหนัก (กรัม) ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง พร้อมทั้งวัดความกว้างกระดอง (Carapace width; CW) (มิลลิเมตร) ใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์แบบดิจิตอล (Digital vernier caliper)

ในขณะเก็บตัวอย่างปูแสมจะตรวจวัดปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ เก็บตัวอย่างดินภายในตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์ ขนาด 0.5×0.5 เมตร ในจุดเดียวกับการสุ่มเก็บตัวอย่างปูแสมด้วยกระบอกเก็บตัวอย่างดิน (Soil core) จำนวน 3 ซ้ำ เก็บรักษาสภาพตัวอย่างดินที่อุณหภูมิต่ำ นำกลับมาวิเคราะห์คุณภาพดินในห้องปฏิบัติการเคมีของสถานีวิจัยประมงสมุทรสงคราม โดยวิเคราะห์หาลักษณะตะกอนดิน (Soil texture) และหาขนาดอนุภาคของดิน (Grain size) โดยวิธี Hydrometer method (Bouyoucos, 1962) และร่อนตัวอย่างดินที่บดแล้วผ่านตะแกรงขนาดตา 0.5 มิลลิเมตร จำนวน 0.5 กรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สาร (Organic matter) โดยวิธี Walkley Black modified acid-dichromate (Walkley and Black, 1947) และตรวจวัดปัจจัยสิ่งแวดล้อมโดยวัดคุณภาพน้ำในดิน โดยวัดความเค็มด้วย Refractometer วัดค่าความเป็น กรด-ด่าง (pH) ด้วย pH meter วัดอุณหภูมิของน้ำ (Temperature) และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen) ด้วย Oxygen Meter (YSI Model 57) นำข้อมูลความหนาแน่นของปูแสมมาวิเคราะห์ความแตกต่างและนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบในแต่ละบริเวณและแต่ละเดือนที่ศึกษา โดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของปูแสมและปัจจัยสิ่งแวดล้อมโดยหาค่าสหสัมพันธ์ (Pearson’s correlation coefficients, r) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 20

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาพบปูแสมบริเวณป่าชายเลนบางแก้ว จำแนกปูแสมได้ 5 ชนิด ชนิดพบชุกชุมที่สุดได้แก่ วงศ์ Varunidae ได้แก่ ปูแสมฟัน (*Metaplax dentipes*) ปูแสมก้ามหัก (*M. elegans*) และวงศ์ Sesarmidae ได้แก่ ปูแสมก้ามแดง (*Parasesarma eumolpe*) ปูแสมก้ามแดง (*Episesarma mederi*) ปูแสมก้ามม่วง (*E. versicolor*) ดังแสดง Fig. 3 ปูแสมฟัน พบกระจายอยู่ทุกพื้นที่ของป่าชายเลนบางแก้วและชุกชุมมากที่สุด รองลงมาเป็น ปูแสมก้ามหัก โดยปูแสมฟัน มีการกระจายเป็นบริเวณกว้าง พบชุกชุมมากคิดเป็นร้อยละ 37.93 ในบริเวณป่าปลูกอายุ 1 ปี พื้นดินลักษณะเป็นดินเลนค่อนข้างเหลว รองลงมาคือ ปูแสมก้ามแดง คิดเป็นร้อยละ 31.03 ส่วนป่าธรรมชาติพบปูแสมก้ามหัก มีความชุกชุมมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 49.28 รองลงมาคือ ปูแสมฟัน คิดเป็นร้อยละ 42.03 สอดคล้องกับรายงานว่า ปูแสมฟันและปูแสมก้ามหักพบกระจายทั่วไปในพื้นที่ป่าชายเลนติดชายฝั่งทะเลตั้งแต่ปากแม่น้ำท่าจีน ถึงปากแม่น้ำบางตะบูน จังหวัดเพชรบุรี (วุฒิพงษ์ และคณะ, 2551; พบพร, 2557) ทั้งนี้ ปูแสมฟัน และปูแสมก้ามหักเป็นกลุ่มปูแสมที่สร้างรูอยู่ใต้ดินมักขุดรูอยู่ในบริเวณที่น้ำขึ้นน้ำลงท่วมถึง บริเวณดินโคลนปนทราย และหลบอาศัยอยู่ตามรากของต้นไม้ในป่าชายเลนจึงทำให้พบได้มาก สำหรับปูแสมก้ามม่วงพบการกระจายค่อนข้างต่ำ สอดคล้องกับ จำลอง และคณะ (2545) รายงานว่า ปูแสมก้ามม่วงพบการกระจายและความชุกชุมค่อนข้างต่ำ (ร้อยละ 0.15) เนื่องจากปูแสมก้ามม่วงมักสร้างรูอยู่บริเวณที่สูงกว่าระดับน้ำขึ้นสูงสุด จึงทำให้พบปูแสมชนิดนี้ได้ค่อนข้างน้อย (นลินี และสมบัติ, 2550)

Fig. 3 Species of mangrove crabs in Bang Kaew mangrove: (A) *Metaplax dentiples*; (B) *M. elegans*; (C) *Parasesarma eumolpe*; (D) *Episesarma mederi*; (F) *E. versicolor*)

ความหนาแน่นของปูแสมบริเวณป่าชายเลนด้านนอกที่เป็นลักษณะป่าปลูกต้นโกงกางใบเล็ก อายุ 1 ปี มีความหนาแน่นเฉลี่ยของปูแสมในเดือนมิถุนายนและธันวาคม 2561 เท่ากับ 66 และ 67 ตัวต่อตารางเมตร ตามลำดับ และบริเวณป่าธรรมชาติมีความหนาแน่นเฉลี่ยของปูแสมเป็น 50 และ 43 ตัวต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างและนัยสำคัญทางสถิติพบว่า ความหนาแน่นเฉลี่ยของปูแสมในพื้นที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของปูแสมในพื้นที่ป่าชายเลนปลูกอายุ 1 ปี และธรรมชาติ ($p > 0.05$) และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของปูแสมในแต่ละเดือน ($p > 0.05$) เช่นกัน ซึ่งในช่วงเดือนที่ทำการศึกษาเป็นฤดูฝนทำให้มีปัจจัยสิ่งแวดล้อมคล้ายคลึงกันจึงไม่มีผลต่อการกระจายของปูแสมในพื้นที่

ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นรวมของปูแสมในป่าชายเลนบ้านบางแก้ว พบว่าพื้นที่ป่าปลูกอายุ 1 ปี ปูแสมฟันมีความหนาแน่นรวมมากที่สุดเท่ากับ 45 ตัวต่อตารางเมตร รองลงมาเป็น ปูแสมก้ามแดงและปูแสมก้ามหัก เท่ากับ 37 และ 27 ตัวต่อตารางเมตร ตามลำดับ สำหรับพื้นที่ป่าธรรมชาติ ปูแสมก้ามหักมีความหนาแน่นรวมมากที่สุดเท่ากับ 46 ตัวต่อตารางเมตร รองลงมาเป็น ปูแสมฟันเท่ากับ 39 ตัวต่อตารางเมตร ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 4 สอดคล้องกับบริเวณป่าชายเลนปากแม่น้ำบางตะบูน จังหวัดเพชรบุรี ที่พบ ปูแสมก้ามหัก เป็นชนิดเด่นในกลุ่มสัตว์ทะเลหน้าดินขนาดใหญ่ที่ทำการศึกษา (พบพร, 2557)

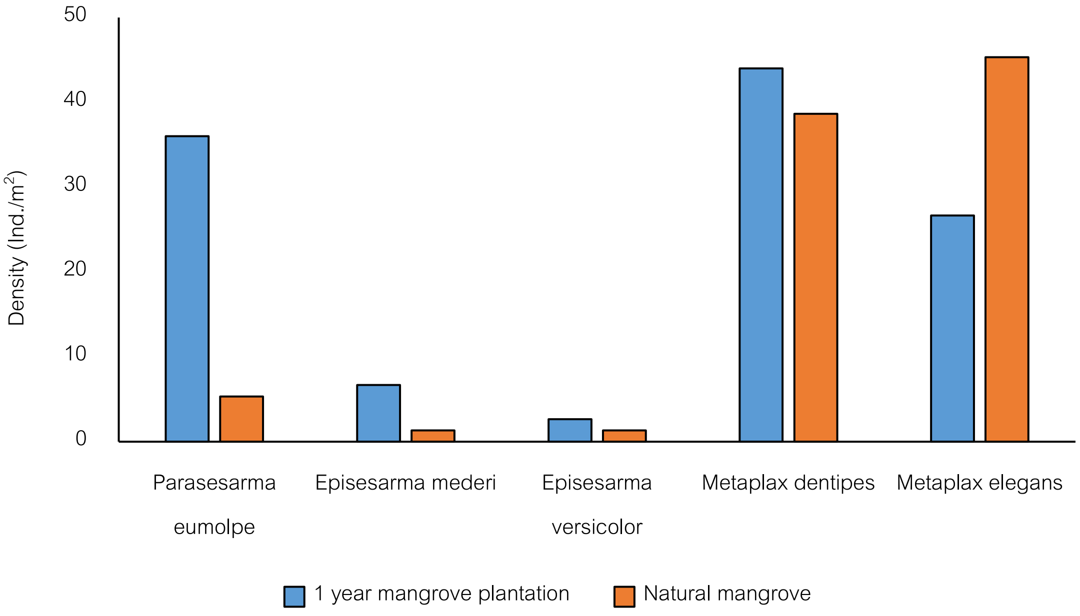


Fig. 4 Species density of mangrove crabs in Bang Kaew mangrove, from June to December 2018

จากการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อดินที่พบในบริเวณป่าชายเลนบางแก้ว พื้นที่ป่าปลูกอายุ 1 ปี และป่าชายเลนธรรมชาติ พบเนื้อดินมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy Loam, SL) แสดงดัง Table 1

Table 1 Soil texture ration in Bang Kaew Mangrove, Samut Songkhram Province, from June to December 2018

Area	Month	%Clay	%Silt	%Sand	Soil texture
1 year plantation	June	11.54	27.46	61.00	Sandy loam
	December	10.39	24.36	65.25	Sandy loam
Natural mangrove	June	9.57	22.03	68.40	Sandy loam
	December	9.63	26.96	70.65	Sandy loam

สรุป

จากการศึกษาปูแสมที่พบในพื้นที่ป่าชายเลนบางแก้ว จังหวัดสมุทรสงคราม ความหนาแน่นเฉลี่ยของปูแสมในพื้นที่ป่าชายเลนที่ศึกษาในเดือนมิถุนายนและธันวาคม 2561 ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของปูแสมในพื้นที่ป่าชายเลนปลูกอายุ 1 ปี และป่าธรรมชาติ (p > 0.05) และไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของปูแสมในเดือนมิถุนายนและธันวาคม 2561 (p > 0.05) โดยปูแสมฟันและปูแสมก้ามหักที่มีความหนาแน่นมากจะมีการกระจายเป็นบริเวณกว้างตั้งแต่ป่าชายเลนปลูกอายุ 1 ปี ไปจนถึงป่าธรรมชาติ ซึ่งวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ความหนาแน่นปูแสมจะสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับปริมาณออกซิเจนของน้ำ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และอนุภาคของดินเหนียว โดยปูแสมก้ามแดงมีความหนาแน่นแปรผันตามอนุภาคดินเหนียวในป่าปลูกอายุ 1 ปี สอดคล้องกับความหนาแน่นของปูแสมก้ามแดงในแนวป่าชายเลนคลองบางบ่อ จังหวัดสมุทรสงคราม ที่แปรผันกับอนุภาคดินเหนียวในพื้นที่ (นฤชล และวีรกิจ, 2561) และปูแสมก้ามแดงยังแปรผกผันกับปริมาณอินทรียสาร พบปูแสมบริเวณป่าชายเลนปลูกอายุ 1 ปี (อินทรียสารร้อย

ละ 5.08) มากกว่าในพื้นที่ป่าธรรมชาติ (อินทรียสารร้อยละ5.63) เช่นเดียวกับ ศิริพร และอนัญญา (2554) รายงานว่าความชุกชุมของปูแสมก้ามแดงบริเวณป่าชายเลนอ่าวบ้านดอน สุราษฎร์ธานี มีความสัมพันธ์แบบแปรผันกับปริมาณอินทรีย์สารในตะกอนดินอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศป่าชายเลนบางแก้วจะส่งผลต่อพื้นที่อยู่อาศัยและปริมาณอินทรียสารในดินและการกระจายของปูแสมในพื้นที่ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณองค์การบริหารส่วนจังหวัดสมุทรสงครามที่อนุเคราะห์ให้เข้าพื้นที่บริเวณสวนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์เพื่อเก็บตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

จำลอง โตอ่อน, ณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์, อัจฉราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์, ประภาพร วิถีสวัสดิ์. 2545. ชนิดและการแพร่กระจายของปูแสมในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร. ใน: เอกสารการสัมมนาระบบนิเวศป่าชายเลนแห่งชาติ ครั้งที่ 12. โรงแรมทวินโลตัส, นครศรีธรรมราช, หน้า 1–9.

ณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์. 2546. คู่มือวิธีการประเมินแบบรวดเร็วเพื่อการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พื้นที่ชายฝั่งทะเล: ระบบนิเวศป่าชายเลน. ประสุขชัยการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์, จำลอง โตอ่อน, อัจฉราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์. 2542. ชนิดและการกระจายของปูก้ามดาบในป่าชายเลนปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร. ใน: สนิท อักษรแก้ว, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ การฟื้นฟูและพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนเพื่อสังคมและเศรษฐกิจอย่างยั่งยืนของประเทศไทย. อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ, หน้า 357–373.

นฤชล ภัทราปัญญาวงศ์, วีรกิจ จรเกตุ. 2561. การศึกษาความหลากชนิดและความชุกชุมของปูแสมในพื้นที่ป่าชายเลนคลองบางบ่อ จังหวัดสมุทรสงคราม. ใน: รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 769–777.

นลินี ทองแถม, สมบัติ ภู่วชิรานนท์. 2550. บทบาทของปูแสม *Neopisesarma versicolor* ต่อระบบนิเวศป่าชายเลนบ้านบางโรง จังหวัดภูเก็ต. เอกสารวิชาการฉบับที่ 9/2550. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, กรุงเทพฯ.

พบพร ธาราภูมิ. 2557. ประชาคมสัตว์ทะเลหน้าดินขนาดใหญ่ที่มีความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม: กรณีศึกษาป่าชายเลนปากแม่น้ำบางตะบูน จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วันวิวาห์ วิชิตวรคุณ. 2544. สัตว์ทะเลหน้าดินขนาดใหญ่บริเวณป่าชายเลนบ้านคลองโคน จังหวัดสมุทรสงคราม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วุฒิพงษ์ วงศ์อินทร์, นงนุช ศิลปสาร, พัชราภรณ์ เยาวสุด, ไพรินทร์ เพ็ญประไพ, วัลภา ทองดียิ่ง, วินัย เสาวฤทธิ์. 2551. ชนิดและการแพร่กระจายของปูบริเวณป่าชายเลนปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 2(2): 115–124.

ศิริพร ประคุณวีรวัฒน์, อนัญญา เจริญพรนิพัทธ. 2554. การแพร่กระจายและความชุกชุมของปูแสมในวงศ์ Sesarmidae บริเวณป่าชายเลนคลองไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 32: 40–49.

อนัญญา เจริญพรนิพัทธ. 2557. ชนิดของอาหารและการเติบโตของปูแสมสกุล *Episesarma* และ *Perisesama* ในอ่าวบ้านดอน จังหวัดสุราษฎร์ธานี. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

อาวุธ แก่นเพชร, อุดมศักดิ์ ดรุมาศ, ศักดิ์ดา ใบมิเด็น. 2559. คู่มือศึกษาสัตว์ที่พบในป่าชายเลน จังหวัดนครศรีธรรมราช, พิมพ์ครั้งที่ 2. นัททกานต์ กราฟฟิค การพิมพ์, เชียงใหม่.

Ashton, E.C. 2002. Mangrove sesarmid crab feeding experiments in Peninsular Malaysia. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 273(1): 97–119. doi.org/10.1016/S0022-0981(02)00140-5

Boon, P.Y., Yeo D.C.J., Todd, P.A. 2009. Sound production and reception in mangrove crabs *Perisesarma spp.* (Brachyura: Sesarmidae). Aquat. Biol. 5(2): 107–116. doi.org/10.3354/ab00136

Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron J. 54(5): 464–465. doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x

Carpenter, K.E., Niem, V.H. 1998. The living marine resources of the Western Central Pacific., Vol. 2: Cephalopods, Crustaceans, Holothurians and Sharks. FAO., Rome.

Kristensen, E. 2008. Mangrove crabs as ecosystem engineers; with emphasis on sediment processes. Journal of Sea Research 59(1–2): 30–43. doi.org/10.1016/j.seares.2007.05.004

Leary, S. 2013. AVMA Guidelines for the Euthanasia of Animals: Edition. American Veterinary Medical Association. Journal of the American Veterinary Medical Association. https://www.avma.org/KB/Policies/Documents/euthanasia.pdf, 31 May 2018.

Lee, B.Y., Kee, N., Ng, P.K.L. 2015. The taxonomy of five species of *Episesarma* De Man, 1895, in Singapore (Crustacea: Decapod: Brachyura: Sesarmidae). Raffles Bulletin of Zoology Supplement 31: 199–215.

Nagelkerken, I., Blaber, S.J.M., Bouillon, S. et al. 2008. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. Aquat. Bot. 89(2): 155–185. doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.007

Walkley, A., Black, I.A. 1947. Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. Soil. Sci. Amer. Proc. 63: 257.

การอัพไซเคิลของเสียประเภทโฟมพอลิยูรีเทนเป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์และจีโอพอลิเมอร์

Upcycle of polyurethane foam waste to mixture in mortar and geopolymer

ภาณุวิชญ์ เนสุสินธุ์*, **จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์**

Panuvit Nasusin*, Jukkrit Mahujchariyawong

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Panuvit.na@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการอัพไซเคิลขยะโฟมพอลิยูรีเทนด้วยการแปรรูปเป็นผงแล้วผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์โดยทดแทนทราย 0% 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก และผสมในจีโอพอลิเมอร์ 0% 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ขึ้นรูปตัวอย่างและบ่มเป็นเวลา 28 วัน ทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และการนำความร้อน พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทน 2% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ค่าการดูดกลืนน้ำลดลง 12.73% ค่าการรับแรงอัดและแรงดัดสูงกว่า 56.32% และ 71.88% ตามลำดับ และมีค่าการนำความร้อน 0.3391 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทน 2% เทียบกับตัวควบคุมมีค่าความหนาแน่นลดลง 6% แต่ค่าการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น ค่าการรับแรงอัดและแรงดัดสูงกว่า 94.01% และ 9.95% ตามลำดับ และมีค่าการนำความร้อนเป็น 0.2223 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ลดลง 10.76%

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์, ซีเมนต์มอร์ตาร์, โฟมพอลิยูรีเทน, อัพไซเคิล

Abstract

This study aims to upcycle the polyurethane (PU) foam waste by powdering and mixing in cement mortar with sand substitution rate at 0%, 2%, 4% and 6% by weight, and in geopolymer at 0%, 2%, 4% and 6% by weight of fly ash. After preparing and curing samples for 28 days, the properties were tested in density, water absorption, compressive strength, flexural strength and thermal conductivity. The result was compared with each control, the cement mortar mixed with 2% PU foam showed density was similar to the control, water absorption decreased 12.73%, Compressive strength and flexural strength were 56.32% and 71.88%, respectively. Thermal conductivity was 0.3391 W/m K. While the geopolymer mixed with 2% PU foam showed density decreased 6%, water absorption was increased. Compressive strength and flexural strength were 94.01 and 9.95%, respectively. Thermal conductivity was 0.2223 W/m K which decreased 10.76%.

Keywords: Cement mortar, Geopolymer, Polyurethane foam, Upcycle

คำนำ

ปัญหาการจัดการขยะในปัจจุบันเป็นปัญหาที่ไม่สามารถมองข้ามได้ โดยเฉพาะขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ โฟมพอลิยูรีเทน คือ วัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ผลิตขึ้นโดยปฏิกิริยา Polycondensation ของ ไดไอโซไซยาเนต และ พอลิออล โดยมักนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ นอกจากนี้ยังมักจะถูกนำมาใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน เช่น ฉนวนในตู้เย็น ตู้แช่แข็ง และฉนวนสำหรับอาคาร อย่างไรก็ตามโฟมพอลิยูรีเทนเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และมีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งจากอรรถประโยชน์มากมายของโฟมพอลิยูรีเทนต่างๆ เหล่านี้นำไปสู่การผลิตโฟมพอลิยูรีเทนปริมาณมาก (ปัทมาพร, 2557) เมื่อหมดอายุการใช้งานขยะโฟมพอลิยูรีเทนมักจะถูกนำมาฝังกลบ หรือเผาทำลายเนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งนำไปสู่การสิ้นเปลืองพื้นที่ฝังกลบ และการปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการนำขยะชนิดนี้มาใช้ประโยชน์นอกจากจะช่วยแก้ปัญหาการจัดการขยะ และยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับขยะชนิดนี้ได้โดยใช้หลักการอัพไซเคิล ซึ่งก็คือการนำเศษวัสดุหรือของเสียมาใช้โดยตรง หรือผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งสิ่งที่ได้จะเป็นวัสดุ ส่วนประกอบ หรือผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีคุณภาพดีขึ้น และมีมูลค่าที่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามในการการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปของวัตถุดิบสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป สำหรับโฟมพอลิยูรีเทนมีสมบัติเฉพาะตัวในด้านของฉนวนกันความร้อน กันเสียงได้อย่างดี และดูดซับความชื้นต่ำ ซึ่งน่าจะเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์ และจีโอพอลิเมอร์ โดยจีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีวัตถุประสงค์ในการนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ โดยผลิตขึ้นจากของเสียจากกระบวนการของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ เช่น เถ้าลอย เถ้าแกรบ โดยนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างความเข้มข้นสูง ซึ่งเป็นวัสดุประสานที่มีความแข็งแรงทนทานเทียบเท่าคอนกรีตซีเมนต์ และมีความทนทานที่เหนือกว่าคอนกรีตซีเมนต์ในสภาพการใช้งานที่ได้รับผลกระทบทางเคมี โดยอาจพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างสำหรับอาคารสีเขียวซึ่งมีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนได้

การศึกษานี้เป็นการนำของเสียประเภทโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง มาอัพไซเคิลด้วยการปรับสภาพและใช้เป็นวัตถุดิบในการผสมกับซีเมนต์มอร์ตาร์ และจีโอพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อน โดยการเตรียมตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของโฟมพอลิยูรีเทนต่าง ๆ ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล และทดสอบการนำความร้อน เพื่อแนวทางการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ให้เป็นประโยชน์ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ประเภทวัสดุก่อสร้างที่สามารถสร้างมูลค่าได้สำหรับการใช้ในอาคารสีเขียว

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัสดุและสารเคมี

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของบริษัท TPI, ทรายละเอียด, เถ้าลอยลิกไนต์ และน้ำกลั่น สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ของบริษัท Carlo ERBA และโซเดียมซิลิเกต ของบริษัท Panreac

2. การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

นำของเสียประเภทโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง มาย่อยให้มีขนาดเล็กลงและการนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นยี่ห้อ OTTO รุ่น BE-127A ให้ละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตระแกรงทดสอบสเตนเลส ได้เป็นผงโฟมพอลิยูรีเทนขนาดไม่เกิน 2.34 มิลลิเมตร

3. การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์

กำหนดอัตราส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทรายต่อน้ำเท่ากับ 2 : 1 : 0.6 โดยน้ำหนัก ทำการผสมให้เข้ากันและใช้โฟมพอลิยูรีเทนแทนที่ทรายผสมในอัตราส่วนร้อยละ 0 2 4 และ 6 ของน้ำหนักของทราย เนื่องจากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าขีดจำกัดของการผสมโฟมพอลิยูรีเทนในการขึ้นรูปอยู่ที่ร้อยละ 6 ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างจึงอัตราส่วนนี้ ผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว แล้วจึงนำซีเมนต์มอร์ตาร์เทลงในแม่พิมพ์ขนาด 3.8×3.8×3.8 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบค่าการรับแรงอัด ขนาด ขนาด 20.3×30.5×3.8 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบค่าการรับแรงดัด และขนาด 20×20×2.54 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการนำความร้อน แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อตัวอย่างทำการเซ็ตตัวแล้วจึงถอดออกจากแม่พิมพ์ นำไปบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4. การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

เตรียมสารละลายด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตความเข้มข้น 6 โมลาร์ ในอัตราส่วน 1 : 4 หลังจากนั้นผสมเถ้าลอยลิกไนต์กับสารละลายด่างในอัตราส่วน 2 : 1 และเติมโฟมพอลิยูรีเทนร้อยละ 0 2 4 และ 6 ของน้ำหนักของเถ้าลอย ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำมาเทลงแม่พิมพ์ขนาดเดียวกับการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิลดลงนำไปบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

5. การทดสอบสมบัติของตัวอย่าง

5.1 การทดสอบความหนาแน่น โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 28 วันแล้วมาชั่งน้ำหนัก และวัดขนาดทำการคำนวณปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง เพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่าความหนาแน่นตาม Equation 1

$$Density = \frac{Mass}{Volume} \tag{1}$$

5.2 การทดสอบการดูดกลืนน้ำ โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาแช่น้ำสะอาดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบันทึกน้ำหนักหลังแช่น้ำ จากนั้นนำมาคำนวณค่าการดูดกลืนน้ำตาม Equation 2

$$Water\ absorption(\%) = \frac{Wet\ mass - Dry\ mass}{Dry\ mass} \times 100 \tag{2}$$

5.3 การทดสอบการรับแรงอัด ด้วย Micro-Computer Universal Testing machine ตามมาตรฐาน ASTM C109 ค่าการรับแรงอัด (Compressive Strength) มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล (MPa)

5.4 การทดสอบการรับแรงดัด ด้วย Micro-Computer Universal Testing machine ตามมาตรฐาน ASTM C293 (Center-point Loading) ค่าการรับแรงดัด (Flexural Strength) มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล (MPa)

5.5 การทดสอบการนำความร้อน ด้วย Thermal Conductivity Tester รุ่น HC074-200, EKO Instruments ตามมาตรฐาน ASTM C518 อุณหภูมิที่ทดสอบ (Test Temp.) 20 และ 50 องศาเซลเซียส ค่า K มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m K)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

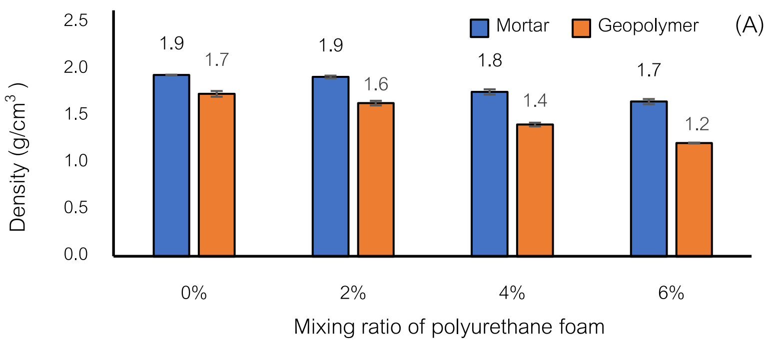
ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่น

หลังจากที่ตัวอย่างผ่านการบ่มเป็นเวลา 28 วันแล้ว จึงนำตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 0 2 4 และ 6 มาชั่งน้ำหนัก วัดขนาด และคำนวณปริมาตร เพื่อทำการหาค่าความหนาแน่น จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีค่าความหนาแน่นลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟมพอลิยูรีเทนที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม เนื่องจากส่วนผสมของทั้ง 2 ตัวอย่างที่เป็นโฟมพอลิยูรีเทนจะเข้าไปแทนที่ทรายในเมทริกซ์ของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และแทนที่เถ้าลอยในเมทริกซ์ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยที่โฟมพอลิยูรีเทนนั้นมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าทราย และเถ้าลอยส่งผลในความหนาแน่นของตัวอย่างลดลง นอกจากนี้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ยังมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากส่วนผสมของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นสูงกว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ แสดงดัง Fig. 1A

การดูดกลืนน้ำ

นำตัวอย่างตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 0 2 4 และ 6 มาชั่งน้ำหนักในขณะที่แห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทำการชั่งน้ำหนักหลังผ่านการแช่น้ำ จากการทดสอบพบว่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟมพอลิยูรีเทน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ต่ำกว่าในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างมีความพรุนสูง และนำไปสู่อัตราการดูดกลืนน้ำสูง ซึ่งสูงกว่าในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทนมีความหนาแน่นลดลงในร้อยละ 12.73 และ 25.45 เมื่อเทียบกับตัวอย่างชุดควบคุม ในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 2 และ 4 ตามลำดับ และค่าอัตราการดูดกลืนน้ำก็เพิ่มขึ้นในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักทราย เนื่องจากความพรุนของตัวอย่างสูงขึ้นจากความหนาแน่นที่ต่ำลง แสดงดัง Fig. 1B



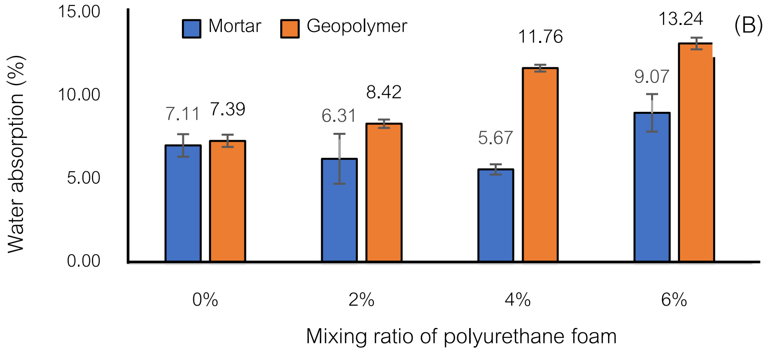


Fig. 1 Physical properties of cement mortar and geopolymer: (A) Density; (B) Water absorption

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

กำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน พบว่าการผสมโฟมพอลิยูรีเทนเข้าไปในตัวอย่างจะช่วยเพิ่มสมบัติในการรับกำลังอัดได้สูงขึ้น โดยในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของทราย และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของเถ้าลอยเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณโฟมพอลิยูรีเทนที่เหมาะสม และสามารถรับแรงอัดที่ 12.10 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างชุดควบคุมถึงร้อยละ 56.32 ในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และที่ 7.06 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 94.01 ในตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ ดังแสดงใน Fig. 2 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ (จรัล, 2563) เนื่องจากโฟมพอลิยูรีเทนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าทรายและเถ้าลอยจึงทำให้ตัวอย่างมีความยืดหยุ่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการผสมโฟมพอลิยูรีเทน แต่การเพิ่มปริมาณโฟมพอลิยูรีเทนเข้าไปในเมทริกซ์ของตัวอย่างมากเกินกว่าจุดที่เหมาะสมจะทำให้โฟมพอลิยูรีเทนเข้าไปแทนที่ทรายในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และแทนที่เถ้าลอยในตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ ส่งผลให้สามารถรับกำลังอัดได้ลดลง อย่างไรก็ตามตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นตัวอย่างที่สามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ร้อยละ 71.26

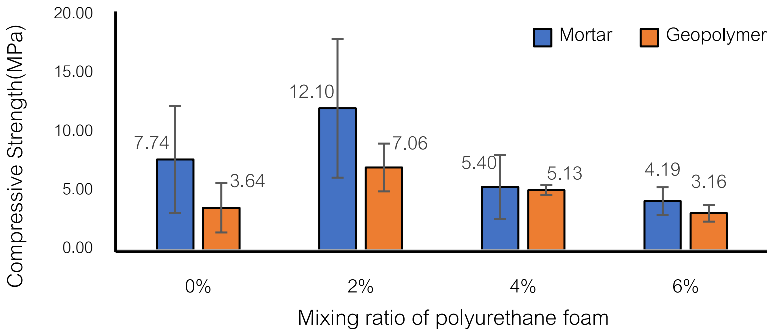


Fig. 2 Compressive Strength of cement mortar and geopolymer

กำลังรับแรงดัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงดัด พบว่าตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่ากำลังรับแรงอัด กล่าวคือมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง และลดลงเมื่อปริมาณโฟมพอลิยูรีเทนมาก เกินกว่าจุดที่เหมาะสม โดยตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของทรายให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ 4.11 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างชุดควบคุมถึงร้อยละ 71.88 และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนักเถ้าลอยมีค่ากำลังรับแรงดัดที่ 1.10 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างชุดควบคุมร้อยละ 78.00 แสดงดัง Fig. 3 ทั้งนี้เนื่องจากการผสมโฟมพอลิยูรีเทนเข้าไปในเมทริกซ์ของตัวอย่างทั้ง 2 วัสดุจะช่วยเสริมคุณสมบัติความยืดหยุ่นให้กับตัวอย่าง โดยตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นจะมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์อย่างมาก

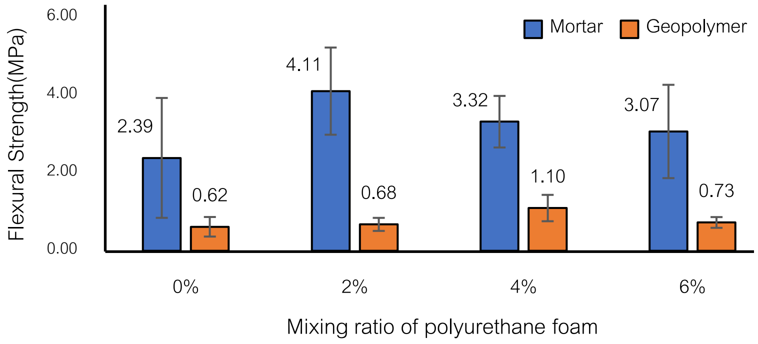


Fig. 3 Flexural strength of cement mortar and geopolymer

ผลการทดสอบการนำความร้อน

จากการทดสอบการนำความร้อน พบว่ามีแนวโน้มที่จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟมพอลิยูรีเทนที่เพิ่มเข้าไปในเมทริกซ์ของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Tantisattayakul et al. (2018) และ Bergamonti et al. (2018) เนื่องจากโฟมพอลิยูรีเทนเป็นวัสดุที่ต่ำกว่าทรายและเถ้าลอย เมื่อผสมเข้าไปในเมทริกซ์ของตัวอย่างก็จะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง นอกจากนี้จากการลดลงของค่าความหนาแน่นของวัสดุทั้ง 2 และค่าการนำความร้อนสอดคล้องกับผลทดสอบของ Ganesan et al. (2015) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์นั้นมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนมากขึ้นเมื่อมีการผสมโฟมพอลิยูรีเทน

โดยในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทนร้อยละ 6 ของน้ำหนักทรายมีค่าการนำความร้อนที่ 0.3027 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m · K) ซึ่งลดลงร้อยละ 11.34 และตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมโฟมพอลิยูรีเทนร้อยละ 6 ของน้ำหนักเถ้าลอยมีค่าการนำความร้อน 0.1644 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m · K) ซึ่งลดลงร้อยละ 49.77 เมื่อเทียบกับตัวอย่างชุดควบคุม ดังแสดงใน Fig. 4

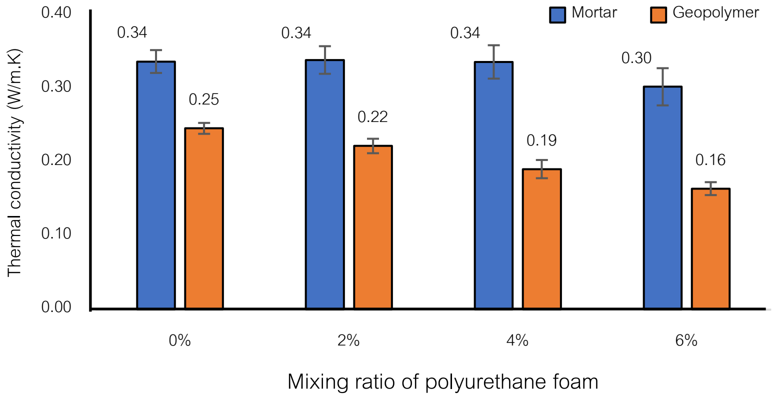


Fig. 4 Thermal conductivity of cement mortar and geopolymer

สรุป

การนำโฟมพอลิยูรีเทนมาใช้เป็นส่วนผสมนั้นทำให้สมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ และจีโอพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป การเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟมพอลิยูรีเทนในตัวอย่างส่งผลให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลง เนื่องจากความหนาแน่นที่ลดลง ทำให้ภายในตัวอย่างมีความพรุนสูงขึ้น นำไปสู่การดูดกลืนน้ำสูงขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดในตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ แต่ในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มีการลดลงของค่าการดูดกลืนน้ำจนถึงจุดหนึ่ง และเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนสูงสุด ในส่วนของสมบัติเชิงกล การผสมโฟมพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้ตัวอย่างสามารถรับแรงอัด และแรงดัดได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากผสมโฟมพอลิยูรีเทนในปริมาณที่มากเกินไปทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงลดลง ในส่วนของค่าการนำความร้อน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากค่าความหนาแน่นที่ต่ำลง และสมบัติความเป็นฉนวนของโฟมพอลิยูรีเทนนำไปสู่การลดลงของสมบัติการนำความร้อนของซีเมนต์มอร์ตาร์ และจีโอพอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติแล้ว พบว่าตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มีสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรงและการดูดกลืนน้ำที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อมีอัตราส่วนผสมโฟมพอลิยูรีเทนที่เท่ากัน แต่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีสมบัติเด่นในด้านน้ำหนักที่เบากว่าและมีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่า ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าปริมาณของโฟมพอลิยูรีเทนส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของซีเมนต์มอร์ตาร์ และจีโอพอลิเมอร์นั้นเปลี่ยนไป จึงต้องพิจารณาและเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ให้เป็นประโยชน์ในรูปแบบของส่วนผสมสำหรับวัสดุก่อสร้างต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์สถานที่สำหรับทำการวิจัยจากภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และได้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบสมบัติของชิ้นงานตัวอย่างจากศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

จรัล รัตนโชตินันท์. 2563. การศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ผสมขวดน้ำพลาสติกใช้แล้ว. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย. 14: 115–126.

ปัทมาพร พ่วงงามพันธุ์. 2557. การสังเคราะห์พอลิยูริเทนที่มี Diacetylene Unit โดยมีพอลิเอธิลีน เทอเรฟเทอเรตพอลิออลเป็นสารขยายสายโซ่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

Bergamonti, L., Taurino, R., Cattani L., Ferretti, D., Bondioli, F. 2018. Lightweight hybrid organic-inorganic geopolymers obtained using polyurethane waste. Construction and Building Materials. 185: 285–292. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.006

Ganesan, S., Mydin, M.A.O., Yunos, M.Y.M., Nawi, M.N.M. 2015. Thermal Properties of Foamed Concrete with Various Densities and Additives at Ambient Temperature. Applied Mechanic and Material. 747: 230–233. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.747.230

Tantisattayakul, T., Kanchanapiya, P. Methacanon, P. 2018. Comparative waste management options for rigid polyurethane foam waste in Thailand. Journal of Cleaner Production. 196: 1576–1586. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.166

การสำรวจสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในพืชและสิ่งแวดล้อมจากแหล่งปลูกพืชผักในจังหวัดราชบุรี

Survey of Pesticide in vegetation and the Environment from vegetables crops at Ratchaburi Province

ปภัสรา คุณเลิศ*, **ประกิจ จันทร์ติ๊บ**, **ผกาสินี คล้ายมาลา**

Paphatsara Khunlert*, Prakit Chuntib, Pakasinee Klaimala

กลุ่มงานวิจัยผลกระทบจากการใช้วัตถุมีพิษการเกษตร กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร 50 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Impact of Pesticide Used Subgroup, Pesticide Research Group, Agricultural Production Science Research and Development Division, Department of Agricultural, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: daeng_Khu29@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่ตกค้างในแหล่งปลูกพืชผักต่อความเสี่ยงที่มีต่อสุขภาพเกษตรกร และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในพื้นที่อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดิน น้ำ ตะกอนดิน และผัก ในฤดูแล้งและฤดูฝน รวมทั้งหมด 78 ตัวอย่าง ตรวจวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืชจำนวน 65 ชนิด ด้วยเทคนิค Chromatography ผลการตรวจวิเคราะห์พบสารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง 34 ตัวอย่าง (44%) ในดินพบสารกำจัดศัตรูพืช 6 ชนิด ได้แก่ atrazine, ametryn, acetochlor, profenofos, cypermethrin และpermethrin ปริมาณ 0.02–0.18 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในน้ำพบสาร 4 ชนิด ได้แก่ atrazine, ametryn, acetochlor และ permethrin ปริมาณ 0.02–1.02 ไมโครกรัม/ลิตร ในผักพบสาร 3 ชนิด ได้แก่ profenofos, carbaryl และ cypermethrin ปริมาณ 0.02–0.07 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เมื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพด้วยค่า Hazard quotient (HQ) ในดิน น้ำ และผัก มีค่าน้อยกว่า1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (HQ < 1.0) และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยค่า Risk quotient (RQ) ในดิน และน้ำ มีค่าน้อยกว่า 0.1 ไม่มีความเสี่ยง (RQ ≤ %0.1) อย่างไรก็ตามเกษตรกรควรคำนึงถึงการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในการเพาะปลูก

คำสำคัญ: จังหวัดราชบุรี, สารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง, ค่าดัชนีบ่งชี้อันตราย, ค่าดัชนีบ่งชี้ความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม

Abstract

The main objective of this study was to survey residues of pesticide in vegetables crops and to evaluate the risk of residues for humans and environment in Amphor Chom Bueng Ratchaburi Province. The farmers were interviewed. The samples of soil, water, sediment and vegetables were collected in dry and wet seasons and analyzed using Chromatography. The results showed that the levels of pesticide were found in 34 samples (44%). In soil, 6 pesticides (0.02–0.18 mg/kg), including atrazine, ametryn, acetochlor, profenofos, cypermethrin and permethrin, were found. In water, 4 pesticide (0.02–1.02 µg/L), including atrazine, ametryn, acetochlor and permethrin, were found. Whereas, profenofos, carbaryl and cypermethrin (0.02–0.07 mg/kg) were found in vegetables. The health risk assessment using Hazard quotient (HQ) were less than 1 in soil, water and vegetables. It is in acceptable level (HQ < 1.0). Environmental risk assessment using Risk quotient (RQ) were less than 0.1 in soil and water which the risk was too low (RQ ≤ 0.1). However, farmer should consider the residues of these insecticides used in cultivation.

Keywords: Hazard quotient (HQ), Pesticide residues, Ratchaburi province, Risk Quotient (RQ)

คำนำ

ปัจจุบันสารกำจัดศัตรูพืชมีบทบาทสำคัญในภาคเกษตรกรรมจำพวกพืชผัก เนื่องจากประชาชนยังนิยมบริโภคผักที่มีลักษณะสวยงาม จึงเป็นสาเหตุทำให้เกษตรกรจำเป็นต้องใช้สารกำจัดศัตรูพืชเพิ่มมากขึ้น เพื่อควบคุมโรคและแมลงในผลผลิต (ดร.ปัทมา และคณะ, 2563) ผักสดเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภค เนื่องจากผักอุดมด้วยแร่ธาตุและวิตามินที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย (วิจิตรา และคณะ, 2563) จังหวัดราชบุรีมีพื้นที่ 3,247,789 ไร่ ตั้งอยู่ในภาคตะวันตกของประเทศไทย มีประชากรจำนวน 869,313 คน สภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบสูงทางฝั่งตะวันตก ลาดมาสู่ที่ราบตอนกลาง และที่ราบลุ่ม พื้นที่ราบตอนกลาง เป็นพื้นที่เหมาะสำหรับปลูกพืชผัก ผลไม้ จึงเป็นภาคการผลิตที่สำคัญในการขับเคลื่อนสภาพเศรษฐกิจของจังหวัด ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ในอำเภอจอมบึงมีพื้นที่ปลูกผักจำนวน 11,998 ไร่ (สภาเกษตรแห่งชาติ, 2565) ในปี 2564 มีปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ปริมาณ 136,101,302.39 กิโลกรัม มูลค่า 25,263,511,942.33 ล้านบาท (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2565) ปัจจุบันผู้บริโภคมีความตระหนักในการรักษาสุขภาพมากขึ้น การตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในผลผลิตทางการเกษตร ได้กลายเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้ ผู้บริโภค (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2565; ภานุพันธ์ และสยาม, 2558) จากรายงานวิจัยของ Jitpaka et al. (2015) ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างบล็อคโคลี่ ตำลึง ถั่วฝักยาวและผักโขม จำนวน 934 ตัวอย่าง จากตลาดค้าส่ง พบสารตกค้าง (22.3%) ปริมาณ $< 0.01–5.9$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังมีรายงานการตรวจพบสาร lambda-cyhalothrin, cypermethrin, fenvalerate และ deltamethrin มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.135, 0.418, 0.687 และ 0.104 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในกะหล่ำปลีที่ยังไม่ได้ล้างน้ำ (วนิดา, 2555) นอกจากสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในพืชผักแล้ว ยังสามารถตกค้างในดิน น้ำ ตะกอนดิน ในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงที่เกษตรกรพ่นสารกำจัดศัตรูพืช จากรายงานวิจัยของ รัศมี และคณะ (2558) ตรวจพบสารกำจัดศัตรูพืชภายในวิทยาลัยชัยบาดาลพิพัฒน์ จังหวัดลพบุรี พบสารกำจัดวัชพืชในตัวอย่างน้ำ 2 ชนิด คือ ametryn ตรวจพบในฤดูฝน จำนวน 3 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.01–0.03 ไมโครกรัมต่อลิตร และ atrazine ตรวจพบทั้งสามฤดูในตัวอย่างน้ำ 10 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.14–0.82 ไมโครกรัมต่อลิตร

อย่างไรก็ตามการใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของเกษตรกร และสิ่งแวดล้อมบริเวณโดยรอบแหล่งเพาะปลูก เนื่องจากขณะพ่นสารกำจัดศัตรูพืช ละอองสารเกิดการฟุ้งกระจายไปในอากาศ ตกค้างในผลผลิต สะสมในดิน ชะละลายลงสู่แหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียง เกิดการเคลื่อนย้ายในสิ่งแวดล้อม สะสมในสิ่งมีชีวิต และปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร ส่งผลกระทบต่อสุขภาพผู้บริโภค เพื่อให้สอดรับกับนโยบาย Thailand 4.0 ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 และก้าวเข้าสู่เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ (sustainable development Goals) เพื่อยกระดับมาตรฐานสินค้าเกษตร ให้สามารถตรวจสอบข้อมูลได้ตลอดกระบวนการผลิต เป็นการสร้างความเชื่อมั่นด้านความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2565) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่ตกค้างในแหล่งปลูกพืชผัก ในดิน น้ำ ตะกอนดิน และผลผลิต เพื่อประเมินความเสี่ยงที่มีผลต่อสุขภาพเกษตรกร ผู้บริโภค และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในพื้นที่อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการ

1. การสำรวจและกำหนดจุดเก็บตัวอย่าง เลือกตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจงในหมู่บ้านที่มีอาชีพปลูกผักเชิงพาณิชย์ คือ หมู่ที่ 12 ต.ด่านทับตะโก อ.จอมบึง จ.ราชบุรี เป็นหมู่บ้านที่ปลูกผักเป็นอาชีพมากกว่า 20 ปี เกษตรกรมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างต่อเนื่อง ทำการสำรวจแปลงปลูกผัก และสัมภาษณ์เกษตรกร ได้ข้อมูลเกษตรกรที่มีการใช้สารกำจัดศัตรูพืช จำนวน 11 ราย ทำการเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ในช่วงฤดูแล้ง (มกราคม 2565) และฤดูฝน (มิถุนายน 2565) สุ่มเก็บตัวอย่างดิน น้ำ ตะกอนดิน และผัก เพื่อนำไปวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง และวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดิน และน้ำ

2. วิธีการเก็บตัวอย่าง

2.1 ตัวอย่างดินจากแปลงตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร, 2548) ทำการสุ่มเก็บให้ทั่วแปลง (random sampling) แปลงละ 10 จุด ใช้ช้อนตักดินลงไปเป็นหลุมรูปตัววี (V) ลึกประมาณ 6-7 นิ้วจากผิวดิน ทิ้งดินส่วนแรกแล้วใช้เสียมขุดดินข้างหลุม ข้างใดข้างหนึ่งหนาประมาณ 1-2 นิ้ว รวมดินทั้งหมดจากทุกจุดเข้าเป็นตัวอย่างเดียวกัน แล้วเก็บในถุงพลาสติกบรรจุให้ได้น้ำหนัก 1 กิโลกรัม ขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็นหรือตู้แช่แข็ง หรือถ้าตัวอย่างมีความชื้นสูง นำไปผึ่งในถาดอุณหภูมิห้อง ให้มีความชื้นประมาณ 10–20 เปอร์เซ็นต์ แล้วทุบให้ละเอียด หรือผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันก่อนนำไปทดสอบ และหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างดิน

2.2 ตัวอย่างน้ำ ใช้แครงสุ่มตักตัวอย่างน้ำบริเวณบ่อหรือจุดรวบรวมน้ำสำหรับใช้ในแปลงผัก ให้เต็มขวดพลาสติก ขนาด 1 ลิตร จำนวน 3 ขวด ขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็น ถ้าน้ำมีลักษณะใสสะอาด สามารถนำไปสกัดได้ทันที แต่ถ้ามีความขุ่นหรือสกปรก ให้กรองผ่านกระดาษกรองเพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกก่อนการตรวจวิเคราะห์ รวมทั้งตรวจวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำจากค่าพารามิเตอร์ในน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC, µs/cm) และค่าของแข็งทั้งหมด (Total Dissolve Solid: TDs, ug/L)

2.3 ตัวอย่างตะกอนดิน ใช้แครงสุ่มตักตัวอย่างตะกอนจากท้องน้ำบริเวณเดียวกับจุดเก็บน้ำให้ได้ประมาณ 0.5-1 กิโลกรัม นำใส่ในขวดแก้วที่มีฝาปิดสนิท หุ้มด้วยกระดาษหรือวัสดุกันกระแทกใส่ลงถุงพลาสติกขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็น

2.4 ตัวอย่างผัก สุ่มเก็บตัวอย่างปริมาณ 1 กิโลกรัม นำใส่ในถุงพลาสติก ขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็นหรือตู้แช่แข็ง เมื่อจะทำการเตรียมตัวอย่างให้นำออกจากตู้เย็นหรือตู้แช่แข็งตั้งไว้ให้ได้อุณหภูมิห้อง จากนั้นเตรียมตัวอย่างโดยหั่นตัวอย่างข้าวโพดเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นย่อย (Food Processer) ก่อนนำไปทดสอบ

3. วิธีการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ทดสอบหาวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชในตัวอย่างน้ำ ตะกอนดิน ดิน และผัก จำนวน 65 ชนิด แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของสารกำจัดศัตรูพืชที่ตรวจวิเคราะห์

สารกำจัดศัตรูพืช	ชนิดของสารที่ตรวจวิเคราะห์	เครื่องมือตรวจวิเคราะห์
กลุ่ม Organochlorine * 16 ชนิด	aldrin, alpha-BHC, alpha-endosulfan, beta-endosulfan, dieldrin, endosulfan sulfate, endrin, gamma-BHC, heptachlor, heptachlor epoxide, *o,p'*-DDE, *o,p'*-DDT, *o,p'*-TDE, *p,p'*-DDE, *p,p'*-DDT, *p,p'*-TDE	Gas Chromatograph ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น HP6890 หัวตรวจวัดชนิด Electron Capture Detector (ECD)
กลุ่ม Pyrethroid* 7 ชนิด	bifenthrin, cyfluthrin, cypermethrin, lambdacyhalothrin, deltamethrin, fenvalerate, permethrin	
กลุ่ม Triazole 4 ชนิด*	difenoconazole, tetraconazole, hexaconazole, propiconazole	
กลุ่ม Chloroacetamide * 3 ชนิด	alachlor, acetochlor, s-metolachlor	
สารกำจัดวัชพืช 3 ชนิด*	oxyfluorfen,oxadiazon, pendimethalin	
กลุ่ม Organophosphorus* 22 ชนิด	azinphos ethyl, chlorpyrifos, chlorpyrifos ethyl, diazinon, dicrotophos, dimethoate, EPN, ethion, ethoprophos, fenthion, fenitrothion, malathion, methidathion, monocrotophos, parathion methyl, pirimiphos methyl, profenophos, triazophos, methamidophos, omethoate, phosalone	Gas Chromatograph ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น HP6890 หัวตรวจวัดชนิด Flame Photometric Detector (FPD)
กลุ่ม Carbamate * 6 ชนิด	carbaryl, carbofuran, isoprocarb, promecarb, metocarb, methomy	Gas Chromatograph ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น 7890 หัวตรวจวัดชนิด Nitrogen Phosphorus Detector (NPD)
กลุ่ม Triazine 3 ชนิด *	ametryn, metribuzine, atrazine	

* ยืนยันผลการตรวจวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometry ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น 5973

3.1 การตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในตัวอย่างน้ำ

(1) กลุ่ม Organochlorine กลุ่ม Pyrethroid กลุ่ม Triazole กลุ่ม Chloroacetamide, pendimethalin oxyfluorfen และ oxadiazon (In house method TM-T04-I01 (2560) based on AOAC 990.06 (2016)

(2) กลุ่ม Organophophorus กลุ่ม Carbamate กลุ่ม Triazine และกลุ่ม Phenylamide akylalanine (In house method TM-T04-I03 based on EPA method 8141 A, Revision 1 (1994)

3.2 การตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในตัวอย่างดินและตะกอนดิน กลุ่ม Organophophorus กลุ่ม Carbamate กลุ่ม Triazine กลุ่ม Phenylamide akylalanine กลุ่ม Organochlorine กลุ่ม Pyrethroid กลุ่ม Triazole กลุ่ม Chloroacetamide pendimethalin oxyfluorfen และ oxadiazon (In house method TM-T04-I02 based on AOAC Official method 970.52 (2016)

3.3 การตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในตัวอย่างผัก ประยุกต์ใช้วิธี QuEChERS (EN 15622, 2008)

4. การประเมินความเสี่ยง

4.1 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Exposure and Risk Assessment) โดยใช้ดัชนีบ่งชี้ความอันตราย (HQ) ซึ่งค่า HQ คำนวณจากค่า ADI (ปริมาณค่าเฉลี่ยที่เกษตรกรได้รับสารกำจัดศัตรูพืชต่อวัน) เทียบกับค่า RfD (ค่าอ้างอิง คือ ปริมาณสารพิษที่น้อยสุดที่ร่างกายรับได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายหรือเป็นพิษต่อร่างกาย) มีสมการคำนวณ (Equation 1)ดังนี้

$$ADI = (C*CF*IR*EF*ED)/(BW*AT) \quad (1)$$

เมื่อ: ADI คือ ปริมาณสารพิษเฉลี่ยต่อวันจากสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในดิน ผัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม),น้ำ (ไมโครกรัม/ลิตร)

C คือ ความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในดิน ผัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม), น้ำ (ไมโครกรัม/ลิตร)

CF คือ unit conversion factor = 10^{-6} กิโลกรัมต่อมิลลิกรัมในดิน

IR คือ อัตราการได้รับสารพิษที่ตกค้างในดิน 200 มิลลิกรัมต่อวัน สำหรับผู้ใหญ่ ในน้ำ 0.943 ลิตรต่อวัน (U.S. EPA., 2008)

EF คือ ความถี่ของการสัมผัส (365 วัน/ปี)

ED คือ ระยะเวลาที่สัมผัส (years) 70 ปี สำหรับผู้ใหญ่

BW คือ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักตัว (กิโลกรัม) ผู้ใหญ่ (68 กิโลกรัม)

AT คือ ระยะเวลาที่ใช้เฉลี่ย (365 วัน) (EF*ED)

การคำนวณค่าความเสี่ยงจากสารพิษตกค้างได้จากค่า hazard quotient (HQ) ซึ่งคำนวณจาก ค่า ADI และค่า RfD ดังสมการต่อไปนี้ (Equation -)

$$HQ = ADI/RfD \quad \ldots\ldots \quad \ldots \quad (2)$$

เมื่อ: RfD คือ reference dose เฉพาะของสารกำจัดศัตรูพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน) ใช้ค่า RfD ตามข้อมูล Pesticide Properties Database (PPDB) (IUPAC, 2019) เกณฑ์การตัดสิน กำหนดให้ HQ > 1 หมายถึง สารกำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ในระดับเสี่ยงต่อเกษตรกร (Risk), HQ < 1 หมายถึง สารกำจัดศัตรูพืชตกค้างตกค้างอยู่ในระดับยอมรับได้ (Acceptable risk)

4.2 การประเมินความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Effects; Ecological risk assessment) โดยใช้ค่าความเสี่ยง (Risk quotient; RQ) เมื่อ MEC (measured environment concentration) คือ ความเข้มข้นของสารที่วัดได้ในสิ่งแวดล้อม และ PNEC (predicted no effect concentration) คือ ความเข้มข้นสูงสุดของสารที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต (Equation 3)

$$RQ = MEC/PNEC \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

เกณฑ์การตัดสิน กำหนดให้ RQ ≤ 0.1 หมายถึง ไม่มีความเสี่ยง (no hazard exists; acceptable risk)
RQ >0.1–1.0 หมายถึง มีความเสี่ยงต่ำ (hazard is low)
RQ >1.1–10 หมายถึง มีความเสี่ยงระดับปานกลาง (hazard is moderate)
RQ >10 หมายถึง มีความเสี่ยงสูง (hazard is high) (U.S. EPA., 2014)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.การจัดการศัตรูพืชในแปลงผักของเกษตรกร

จากการสัมภาษณ์เกษตรกรจำนวน 11 ราย พบว่าในขั้นตอนการเตรียมแปลงก่อนปลูกผัก จะใช้สารกำจัดวัชพืช 3 ชนิด ได้แก่ acetochlor, oxadiazon และ quizalofop-P-ethyl เพื่อกำจัดหญ้านกสีชมพู หญ้าดอกขาว หญ้าแดง และหญ้าตีนกา หลังปลูกผัก เมื่อพบการระบาดของหนอนเจาะฝักลายจุด (bean pod borer) หนอนกะทู้ผัก (common cutworm) ด้วงหมัดผัก (flea beetle) เพลี้ยไฟ (thrips) และเพลี้ยจักจั่นฝ้าย (cotton leafhopper) เกษตรกรจะพ่นสารตามการระบาดของแมลง สารกำจัดแมลงที่ใช้ได้แก่ emamectin benzoate, carbaryl, cypermethrin, dichlorvos, imidacloprid, profenofos และเมื่อพบการระบาดของโรคราน้ำค้าง และโรคใบจุด เกษตรกรจะใช้สาร mancozeb และ metalaxyl พ่นภายในแปลง อัตราการพ่น เกษตรกรจะพ่นตามคำแนะนำในฉลาก นอกจากนี้เกษตรกรยังมีการใช้สารชีวภัณฑ์ในการกำจัดศัตรูพืช ได้แก่ บาซิลลัส ทูริงเยนซิส วาร์ไรตี้ เคอร์สตากี้ (*Bacillus thuringiensis var. kurstaki*), บาซิลลัส ทูริงเยนซิส ซับสปีชีส์ ไอซาไว (*Bacillus thuringiensis subsp. aizawai*) และสะเดา ซึ่งความถี่ในการพ่นแต่ละรอบฤดูการปลูก ขึ้นอยู่กับการระบาดของศัตรูพืช อย่างไรก็ตามชนิดสารกำจัดศัตรูพืชที่เกษตรกรใช้ในแปลงปลูกผัก เป็นข้อมูลการสัมภาษณ์ และสังเกตภายในแปลง ซึ่งอาจมีบางส่วนที่เกษตรกรไม่ได้ให้ข้อมูล แต่ตรวจพบเมื่อนำไปวิเคราะห์หาสารพิษตกค้างในห้องปฏิบัติการ

2.ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ตรวจพบในตัวอย่างดิน

ได้สุ่มเก็บตัวอย่างดินครั้งที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม (ฤดูแล้ง) จำนวน 11 ตัวอย่าง และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนมิถุนายน (ฤดูฝน) จำนวน 11 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 22 ตัวอย่าง ผลการตรวจวิเคราะห์ในฤดูแล้ง พบสารพิษตกค้างจำนวน 8 ตัวอย่าง (73%) ได้แก่ profenofos จำนวน 1 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม atrazine จำนวน 2 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02–0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ ametryn จำนวน 8 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02–0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม cypermethrin จำนวน 2 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02–0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ acetochlor ปริมาณ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในฤดูฝน ตรวจพบปริมาณสารพิษตกค้างจำนวน 4 ตัวอย่าง (36%) ได้แก่ atrazine จำนวน 2 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02 - 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม permethrin จำนวน 1 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ acetochlor จำนวน 2 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.15–0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สรุปผลการตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่างดินทั้งหมด 22 ตัวอย่าง พบปริมาณสารพิษตกค้าง 12 ตัวอย่าง (54%) ในฤดูแล้งมากกว่าฤดูฝน (ตารางที่ 2 และ 3) ลักษณะของดินในแปลงส่วนใหญ่เป็นดินร่วนทราย ซึ่งชนิดสารที่ตรวจพบปริมาณสูงที่สุดคือ ametryn ปริมาณ 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจากแปลงปลูกผักชี และ atrazine จากแปลงปลูกกะหล่ำปลี ปริมาณ 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่ำกว่าเกณฑ์ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีการปนเปื้อนของ atrazine ในดินเพื่อเกษตรกรรมของ กรมควบคุมมลพิษ (2547) (ไม่เกิน 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ดังภาพที่ 2 สอดคล้องกับปริมาณน้ำที่ตรวจพบในแปลงผัก ซึ่งสาร ametryn และ atrazine ที่ตรวจพบเป็นสารที่กรมวิชาการ

เกษตรไม่แนะนำให้ใช้ในแปลงปลูกผัก (กลุ่มวิจัยวัชพืช, 2554) ทั้งนี้เนื่องจากภายในแปลงผักไม่ได้มีการใช้สาร ametryn และ atrazine ปริมาณสารที่ตรวจพบน่าจะเกิดจากการเคลื่อนย้ายของสาร ametryn และ atrazine ในแปลงปลูกอ้อย ที่เกษตรกรเตรียมแปลงหลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิต สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oliveia et al. (2001) พบว่าสาร atrazine จะถูกดูดซับในดินเหนียวมากกว่าดินร่วนเหนียวปนทรายและดินร่วนปนทราย และสามารถเคลื่อนย้ายได้ดีในดินร่วนปนทราย เช่นเดียวกับรายงานการตรวจพบ atrazine ในตัวอย่างดินปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในช่วงฤดูน้ำหลากพบ atrazine ตกค้างในดิน เฉลี่ย 133.59 - 183.23 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (อรอนงค์ และคณะ, 2554) นอกจากนี้ยังตรวจพบสาร acetochlor ปริมาณ 0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในแปลงปลูกแขนงกะหล่ำ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกร เช่นเดียวกับรายงานการตรวจพบสาร acetochlor ปริมาณ 0.01 , cypermethrin ปริมาณ 0.03–0.12 และสาร profenofos ปริมาณ 0.01–0.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในแปลงปลูกคะน้าในจังหวัดขอนแก่น (จารุพงศ์ และคณะ, 2562) นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน ประกอบด้วยความถี่ในการพ่น เกิดการสะสมของสารพิษ ลักษณะของเนื้อดินในแปลงส่วนใหญ่เป็นดินร่วนทราย มีปริมาณอินทรียวัตถุ (0.096–0.456%) ค่อนข้างต่ำ ค่า pH ของดินอยู่ในช่วง 5.1–8.1 แสดงดังตารางภาคผนวกที่ 3 เมื่อพิจารณาค่าอัตราการสลายตัวครึ่งหนึ่งในดิน (DT_{50}) พบว่ามีค่า DT_{50} ค่อนข้างสั้นกว่าอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดย acetochlor มีค่า DT_{50} 12.1 วัน, cypermethrin DT_{50} 21.1 วัน, permethrin DT_{50} 26 วัน และ profenofos DT_{50} 7 วัน นอกจากนี้สารกำจัดวัชพืช atrazine และ ametryn ที่ตรวจพบ มีค่า DT_{50} 60 วัน นานกว่าอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิต ดังนั้นกลุ่มวิจัยวัชพืช(2554) จึงไม่แนะนำให้ใช้ในแปลงปลูกผัก

3. ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ และตะกอนดิน

ได้สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม (ฤดูแล้ง) จำนวน 10 ตัวอย่าง และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนมิถุนายน (ฤดูฝน) จำนวน 10 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ผลการตรวจวิเคราะห์ในฤดูแล้ง พบสารพิษตกค้าง จำนวน 3 ตัวอย่าง (30%) คือสาร atrazine ปริมาณ 0.02–0.86 ไมโครกรัมต่อลิตร และในฤดูฝน ตรวจพบสารพิษตกค้างจำนวน 4 ตัวอย่าง (40%) ได้แก่สาร atrazine จำนวน 2 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.23–0.67, ametryn ปริมาณ 0.65, permethrin ปริมาณ 0.12 ไมโครกรัมต่อลิตร และ acetochlor จำนวน 2 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.61 - 1.02 ไมโครกรัมต่อลิตร สรุปผลการตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำทั้งหมด 20 ตัวอย่าง พบปริมาณสารพิษตกค้างจำนวน 7 ตัวอย่าง (35%) ในฤดูฝนมากกว่าฤดูแล้ง (ตาราง 1 และ 2) ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติที่เกษตรกรใช้ในแปลงปลูกผัก เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ พบสารกำจัดวัชพืช acetochlor ตกค้างในปริมาณสูง สอดคล้องกับข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกร รองลงมาคือสาร atrazine, ametryn และ permethrin ดังภาพที่ 1 ซึ่งสาร atrazine และ ametryn ที่ตรวจพบทั้งสองฤดูเป็นสารที่กรมวิชาการเกษตรไม่แนะนำให้ใช้ในแปลงปลูกผัก (กลุ่มวิจัยวัชพืช, 2554) ทั้งนี้เนื่องจากภายในแปลงผักไม่ได้มีการใช้สาร atrazine และ ametryn ปริมาณสารที่ตรวจพบน่าจะเกิดจากการเคลื่อนย้ายของสาร atrazine และ ametryn ในแปลงปลูกอ้อย บริเวณพื้นที่รอบแปลงผักที่มีการใช้สารดังกล่าว ทั้งนี้แปลงผักชี และกะหล่ำปลี เป็นพื้นที่ลาดต่ำ จึงเป็นพื้นที่รับน้ำโดยเฉพาะในฤดูฝน ตรวจพบสาร atrazine ปริมาณ 0.65 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าในฤดูแล้งที่พบปริมาณ 0.86 ไมโครกรัมต่อลิตร ในบ่อปิดที่น้ำไม่สามารถไหลไปที่อื่นได้ จึงสะสมอยู่นานกว่าแหล่งน้ำธรรมชาติ ที่มีการไหลเวียนตลอดเวลา ปริมาณสาร atrazine ที่ตรวจพบมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีการปนเปื้อนของ atrazine ในน้ำดื่มตามค่า maximum contamination level (MCL) ของ U.S.EPA (2018) (ไม่เกิน 3 ไมโครกรัมต่อลิตร) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการตรวจพบ atrazine ในตัวอย่างน้ำ จากวิทยาลัยชัยบาดาลพิพัฒน์ จ. ลพบุรี ปริมาณ 0.14–0.82 ไมโครกรัมต่อลิตร (รัศมีและคณะ, 2558) เช่นเดียวกับ อรอนงค์ และคณะ (2554) ตรวจพบ atrazine ในตัวอย่างน้ำท่า 38 ตัวอย่าง

(63%) มีค่าเฉลี่ย 4.70 ไมโครกรัมต่อลิตร บริเวณพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในช่วงฤดูน้ำหลาก และตะกอนดิน ผลการตรวจวิเคราะห์ไม่พบสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในทุกตัวอย่าง

4. ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ตรวจพบในตัวอย่างพืช

ได้สุ่มเก็บตัวอย่างพืชระยะเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม (ฤดูแล้ง) จำนวน 15 ตัวอย่าง และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนมิถุนายน (ฤดูฝน) จำนวน 15 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง (ตาราง 2 และ 3; ภาพ 3) ประกอบด้วย แตงกวา (1), แขนงกะหล่ำ(9), ผักชี (4), ถั่วฝักยาว (1), มะเขือเปราะ (2), ผักกาดขาวปลี (2), กะหล่ำปลี (5), บวบ (1) หัวไชเท้า (1) กวางตุ้งดอก (1) และกวางตุ้ง (2) ตรวจพบปริมาณสารพิษตกค้างจำนวน 15 ตัวอย่าง (50%) ได้แก่ 1) แขนงกะหล่ำ ตรวจพบจำนวน 7 ตัวอย่าง ประกอบด้วยสาร profenofos จำนวน 1 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม cypermethrin จำนวน 5 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02–0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม carbaryl จำนวน 2 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.03–0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 2) ถั่วฝักยาว ตรวจพบสาร cypermethrin จำนวน 1 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับรายงานการตรวจพบสารตกค้างในถั่วฝักยาวจำนวน 248 ตัวอย่าง ตรวจพบสารพิษตกค้าง (33.9%) ปริมาณที่ตรวจพบ <0.01–5.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Jitpaka et al., 2015) นอกจากนี้ Supawat and Veerapas (2020) ตรวจพบ dichlorvos และ bromophos methy ปริมาณ 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในถั่วฝักยาวจากตลาดสดในจังหวัดลำปาง 3) กะหล่ำปลี ตรวจพบสาร cypermethrin จำนวน 4 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.04–0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ carbaryl จำนวน 1 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สอดคล้องกับรายงานการตรวจพบสารพิษตกค้างในพืชตระกูลกะหล่ำ ได้แก่ กะหล่ำปลี กะหล่ำดอก บร็อคโคลี่ ผักกาดเขียวปลี จำนวน 85 ตัวอย่าง พบสารพิษตกค้าง 9 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 10.6 ปริมาณที่พบ 0.01 - 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (บุญทวีศักดิ์ และคณะ, 2564) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Supawat and Veerapas (2020) ตรวจพบสาร azinphos ethyl ปริมาณ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในกะหล่ำปลีจากตลาดสดในจังหวัดลำปาง 4) ผักกาดขาวปลี ตรวจพบสาร profenofos 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ cypermethrin 0.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 5) กวางตุ้ง ตรวจพบสาร cypermethrin 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากผลการวิเคราะห์ผักที่มีปริมาณสารพิษตกค้างมากที่สุดคือ แขนงกะหล่ำ พบสารตกค้าง 3 ชนิด (profenofos, cypermethrin และ carbary) รองลงมาคือ ในกะหล่ำปลี (cypermethrin และ carbary) ผักกาดขาวปลี (profenofos และ cypermethrin) พบสารตกค้าง 2 ชนิด และ พบสารตกค้าง 1 ชนิด ในผักกวางตุ้งและถั่วฝักยาว (cypermethrin) ดังภาพที่ 3 ปริมาณสารที่ตรวจพบน้อยกว่าค่าปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (MRL) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2559) แสดงดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ปริมาณสารพิษตกค้างในตัวอย่าง น้ำ ตะกอน ดินและพืชในพื้นที่ปลูกพืชผัก ในจังหวัดราชบุรี ครั้งที่ 1 เดือนมกราคม 2565 (ฤดูแล้ง)

ชนิดตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง				ปริมาณ	ค่ามาตรฐาน
	ทั้งหมด	ตรวจพบ	กลุ่มสารพิษ	ชนิดสารที่พบ		
ดิน	11	8 (73%)	Organophosphorus (1)	profenofos	0.04 mg/kg	
			Triazines (8)	atrazine (2)	0.02–0.03 mg/kg	22 mg/kg[1)]
				ametryn (8)	0.02–0.25 mg/kg	
			Pyrethroids (3)	cypermethrin	0.02–0.06 mg/kg	
			Herbicide (1)	acetochlor	0.02 mg/kg	
น้ำ	10	3 (30%)	Triazines (3)	atrazine	0.02–0.86 µg/L	3 ug/L[2)]
ตะกอนดิน	3	0 (0%)	ND	ND	ND	
พืช	15	10 (67%)				
กวางตุ้งดอก	1	0	ND	ND	ND	
แขนงกะหล่ำ	4	4	Organophosphorus (1)	profenofos	0.06 mg/kg	1 mg/kg[3)]
			Pyrethroids (3)	cypermethrin	0.02 – 0.06 mg/kg	1 mg/kg[3)]
			Carbamate (2)	carbaryl	0.05 - 0.06 mg/kg	1 mg/kg[3)]
ผักชี	2	0	ND	ND	ND	
ผักบุ้ง	1	0	ND	ND	ND	
ผักกาดขาวปลี	1	1	Organophosphorus (1)	profenofos	0.06 mg/kg	0.5 mg/kg[3)]
			Pyrethroids (1)	cypermethrin	0.07 mg/kg	1 mg/kg[3)]
กะหล่ำปลี	4	4	Pyrethroids (3)	cypermethrin	0.05–0.06 mg/kg	1 mg/kg[3)]
			Carbamate (1)	carbaryl	0.05 mg/kg	1 mg/kg[3)]
หัวไชเท้า	1	0	ND	ND	ND	
กวางตุ้ง	1	1	Pyrethroids (1)	cypermethrin	0.03 mg/kg	1 mg/kg[3)]
รวม	39	21 (54%)	ตัวอย่าง			

น้ำ: ปริมาณที่พบหน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลิตร (µg/L), ดิน และผัก : ปริมาณที่พบหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg)

ND: not detected คือ ตรวจไม่พบ

1) ค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ในดินเพื่อเกษตรกรรม กำหนดค่า atrazine เท่ากับ 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

2) ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มที่สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency, EPA) กำหนดไว้ในน้ำดื่มตามค่า maximum contamination level (MCL) ของ atrazine เท่ากับ 3 ไมโครกรัมต่อลิตร (µg/L) (U.S. EPA., 2018)

3) ค่าปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (MRL) ของผัก (mg/kg) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2559)

ตารางที่ 3 ปริมาณสารพิษตกค้างในตัวอย่าง น้ำ ตะกอน ดินและพืชในพื้นที่ปลูกพืชผัก ในจังหวัดราชบุรี ครั้งที่ 2 เดือนมิถุนายน 2565 (ฤดูฝน)

ชนิดตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง				ปริมาณ	ค่ามาตรฐาน
	ทั้งหมด	ตรวจพบ	กลุ่มสารพิษ	ชนิดสารที่พบ		
ดิน	11	4 (36%)	Triazines (2)	atrazine	0.02–0.03 mg/kg	22 mg/kg [1)]
			Pyrethroids (1)	permethrin	0.02 mg/kg	
			Herbicide (2)	acetochlor	0.15–0.18 mg/kg	
น้ำ	10	4 (40%)	Triazines (3)	atrazine	0.23–0.67 µg/L	3 ug/L[2)]
				ametryn	0.65 µg/L	
			Pyrethroids (1)	permethrin	0.12 µg/L	
			Herbicide (2)	acetochlor	0.61–1.02 µg/L	
ตะกอนดิน	3	0 (0%)	ND	ND	ND	
พืช	15	5 (33%)				
แตงกวา	1	0	ND	ND	ND	
แขนงกะหล่ำ	5	3	Pyrethroids (2)	cypermethrin	0.03–0.06 mg/kg	1 mg/kg[3)]
			Carbamate (1)	carbaryl	0.03 mg/kg	1 mg/kg[3)]
ผักชี	2	0	ND	ND	ND	
ถั่วฝักยาว	1	1	Pyrethroids (1)	cypermethrin	0.06 mg/kg	0.7 mg/kg[3)]
มะเขือ	2	0	ND	ND	ND	
ผักกาดขาวปลี	1	0	ND	ND	ND	
กะหล่ำปลี	1	1	Pyrethroids (1)	cypermethrin	0.04 mg/kg	1 mg/kg[3)]
บวบ	1	0	ND	ND	ND	
กวางตุ้ง	1	0	ND	ND	ND	
รวม	39	13 (33%)	ตัวอย่าง			

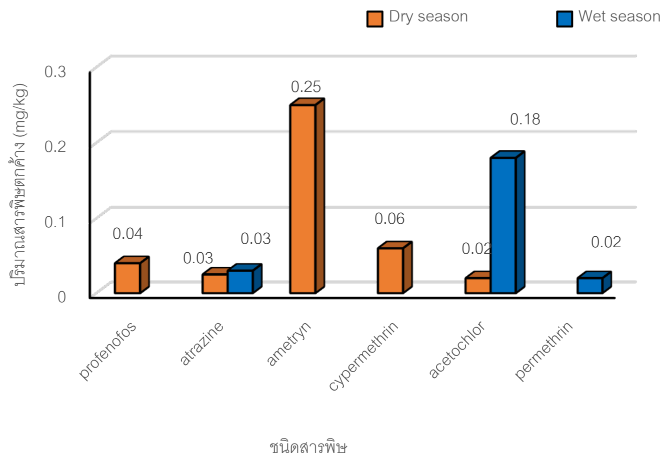
น้ำ: ปริมาณที่พบหน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลิตร (µg/L), ดิน และผัก: ปริมาณที่พบหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg)

ND : not detected คือ ตรวจไม่พบ

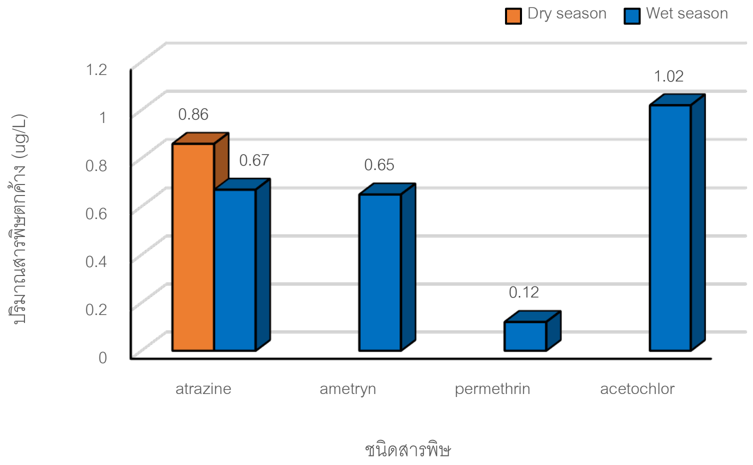
1) ค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ในดินเพื่อเกษตรกรรม กำหนดค่า atrazine เท่ากับ 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

2) ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มที่สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency, EPA) กำหนดไว้ในน้ำดื่มตามค่า maximum contamination level (MCL) ของ atrazine เท่ากับ 3 ไมโครกรัมต่อลิตร (µg/L) (U.S. EPA., 2018)

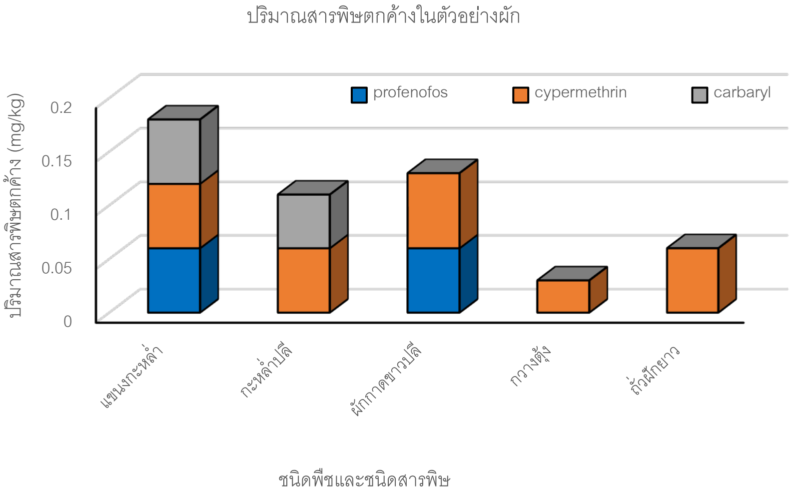
3) ค่าปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (MRL) ของผัก (mg/kg) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2559)



ภาพที่ 1 แสดงปริมาณสารพิษตกค้างในดิน



ภาพที่ 2 แสดงปริมาณสารพิษตกค้างในน้ำ



ภาพที่ 3 แสดงปริมาณสารพิษตกค้างในผัก

4.การประเมินความเสี่ยงของสาร atrazine ในดินที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม

เมื่อนำผลการตรวจวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในดิน น้ำ และผัก มาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัส (Exposure and risk assessment) สารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ไม่ใช่สารก่อมะเร็ง โดยคำนวณจากค่า HQ เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของเกษตรกร ในดิน ผู้ใหญ่อายุ 70 ปี ได้ค่าเฉลี่ย $2.94\times10^{-7} – 5.88\times10^{-3}$ ในน้ำ ผู้ใหญ่อายุ 70 ปี ได้ค่าเฉลี่ย 0.03–1.0 เมื่อคำนวณการบริโภคและปริมาณการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในร่างกาย พบว่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับให้เข้าสู่ร่างกายได้ในแต่ละวัน (Acceptable Daily Intake; ADI) ในผัก ผู้ใหญ่อายุ 70 ปี ได้ค่าเฉลี่ย 1.80×10^{-3}–0.29 ซึ่งค่า HQ จากการคำนวณในตารางที่ 4 พบว่าในดิน น้ำ และผัก มีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (HQ < 1) และเมื่อนำไปประเมินความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Effects; Ecological risk assessment) ด้วยค่าความเสี่ยง (Risk quotient; RQ) ในดินมีค่าเฉลี่ย 0.2×10^{-2}–2.5×10^{-1} และน้ำมีค่าเฉลี่ย 1.2×10^{-1}–0.10 ถือว่าไม่มีความเสี่ยง (RQ ≤ 0.1)

ตารางที่ 4 ประเมินความเสี่ยงของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน น้ำ และผักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม

ชนิดตัวอย่าง	Pesticides	Concentration		Hazard quotient (HQ)	Risk quotient (RQ)	Risk Levels
		Min	Max	Adult		
ดิน *	profenofos	-	0.04	5.88×10^{-3}	0.4×10^{-2}	[1,2] acceptable
	atrazine	0.02	0.03	1.26×10^{-6}	0.3×10^{-2}	[1,2] acceptable
	ametryn	0.02	0.25	4.27×10^{-5}	2.5×10^{-1}	[1,2] acceptable
	cypermethrin	0.02	0.06	1.26×10^{-6}	0.6×10^{-2}	[1,2] acceptable
	acetochlor	0.02	0.18	1.32×10^{-5}	1.8×10^{-1}	[1,2] acceptable
	permethrin	-	0.02	2.94×10^{-7}	0.2×10^{-2}	[1,2] acceptable
น้ำ *	atrazine	0.02	0.86	0.34	8.6×10^{-1}	[1,2] acceptable
	ametryn	-	0.65	1.00	6.5×10^{-1}	[1,2] acceptable
	permethrin	-	0.12	0.03	1.2×10^{-1}	[1,2] acceptable
	acetochlor	0.61	1.02	0.71	0.10	[1,2] acceptable
แขนงกะหล่ำ *	profenofos	-	0.06	0.11	-	[1,2] acceptable
	cypermethrin	0.02	0.06	1.62×10^{-3}	-	[1,2] acceptable
	carbaryl	0.03	0.06	9.50×10^{-3}	-	[1,2] acceptable
ผักกาดขาวปลี *	profenofos	-	0.06	0.29	-	[1,2] acceptable
	cypermethrin	-	0.07	4.80×10^{-3}	-	[1,2] acceptable
กะหล่ำปลี *	cypermethrin	0.04	0.06	1.80×10^{-3}	-	[1,2] acceptable
	carbaryl	-	0.05	5.60×10^{-3}	-	[1,2] acceptable
กวางตุ้ง *	cypermethrin	-	0.03	9.00×10^{-4}	-	[1,2] acceptable
ถั่วฝักยาว *	cypermethrin	-	0.06	3.30×10^{-3}	-	[1,2] acceptable

*น้ำ: ปริมาณที่พบหน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลิตร (µg/L), ดินและผัก: ปริมาณที่พบหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg)

1) HQ >1 หมายถึง สาร atrazine ตกค้างอยู่ในระดับเสี่ยงต่อเกษตรกร (Risk), HQ <1 หมายถึง สาร atrazine ตกค้างอยู่ในระดับยอมรับได้ (acceptable risk)

2) RQ ≤ 0.1 หมายถึง ไม่มีความเสี่ยง (acceptable risk, no hazard exists), RQ >0.1–1.0 หมายถึง มีความเสี่ยงต่ำ (hazard is low), RQ >1.1–10 หมายถึง มีความเสี่ยงระดับปานกลาง (hazard is moderate) และ RQ >10 หมายถึง มีความเสี่ยงสูง (hazard is high) (U.S. EPA., 2014)

สรุปผลการทดลอง

การสำรวจสารพิษตกค้างในพืชและสิ่งแวดล้อมจากแหล่งปลูกพืชผักในจังหวัดราชบุรี ผลการตรวจวิเคราะห์ ดิน น้ำ ตะกอนดิน และผัก ในฤดูแล้งและฤดูฝน รวมทั้งหมด 78 ตัวอย่าง พบการตกค้างในฤดูแล้งมากกว่าฤดูฝน เมื่อนำมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในดิน น้ำ และผัก พบว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ จากผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแหล่งปลูกผักในจังหวัดราชบุรี จากข้อมูลทำให้ทราบว่าเกษตรกรยังมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงควรมีแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการลดการใช้สารกำจัดศัตรูพืช รวมถึงมีการให้ความรู้แก่เกษตรกรให้เข้าใจถึงผลกระทบจากสารกำจัดศัตรูพืชที่มีต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ ส่งเสริมการปลูกพืชอินทรีย์ ตลอดจนการให้ความรู้ในเรื่องการเก็บเกี่ยวผลผลิต และในส่วนของผู้บริโภคนั้น ควรตระหนักถึงอันตรายจากสารกำจัดศัตรูพืชที่ปนเปื้อน จึงควรล้างให้สะอาดก่อนการบริโภค เพื่อเป็นการเฝ้าระวัง ควรมีการ

เก็บข้อมูลการใช้สารของเกษตรกร รวมถึงสำรวจเก็บตัวอย่างที่ต่อเนื่อง เพื่อลดความเสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสสารกำจัดศัตรูพืช

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ตามกรอบการสนับสนุนงานวิจัยมูลฐาน (Fundamental Fund) จากสำนักงานคณะกรรมการการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกรมวิชาการเกษตร ตามรหัสการทดลอง FF65-58-04-65-01-06-65

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2565. แผนปฏิบัติการด้านการเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2566–2570. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์} กรุงเทพฯ. 120 น.

กรมควบคุมมลพิษ. 2547. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 119 ง, ลงวันที่ 20 ตุลาคม 2547.

กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร. 2548. คู่มือการใช้บริการตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้าง คุณภาพวัตถุมีพิษการเกษตรและสารธรรมชาติ. สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ. 55 น.

กลุ่มวิจัยวัชพืช. 2554. คำแนะนำการป้องกันกำจัดวัชพืชและการใช้สารกำจัดวัชพืชปี 2554. สำนักวิจัยการพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ. 133 น.

จารุพงศ์ ประสพสุข , สุวิทย์ เลาหศิริวงศ์ , อรุณี พรมคำบุตร ,ชุลีมาศ บุญไทย อิวาย. 2562. การประเมินความเสี่ยงสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในดินต่อสุขภาพของเกษตรกร ผู้ปลูกคะน้าในจังหวัดขอนแก่น. วารสารวิชาการเกษตร ปีที่ 37 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม. น. 278–285.

ดร.ปัทมา เสนทอง, กชพรรณ หนูชนะ, จันทิมา เอกรัชฤทธิ์, ธนวัฒน์ สายเมธา, จิรกิตติ์ ดวงมุสิก, ภคินี ปิยะพันธ์, กฤตภพ ไทรทองคำ. 2563. การตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน น้ำที่ใช้ในการบริโภค และผักสวนครัว ในครัวเรือนที่อยู่ในสวนเงาะและสวนทุเรียน. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 20(3): 86–94

บุญทวีศักดิ์ บุญทวี, จินตนา ภู่มงกุฎชัย, สุพัตรี หนูสังข์, ศศิณิฎา คงแช่มดี, ประพันธ์ เคนท้าว. 2564. ศึกษาสารพิษตกค้างในพืชผัก พืชที่ปลูกในน้ำ พืชหัวใต้ดิน พืชสมุนไพร และพืชตระกูลกะหล่ำ. *ผลการปฏิบัติงานประจำปีงบประมาณ 2564 เล่ม 2* สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร. กรมวิชาการเกษตร.

ภาณุพันธ์ อิ่นแก้ว, สยาม อรุณศรีมรกต. 2558. การศึกษาเปรียบเทียบสารกำจัดแมลงตกค้างในผักใบเขียวของการปลูกพืชแบบทั่วไป แบบปลอดสารพิษ และแบบอินทรีย์ในจังหวัดนครปฐม. วารสารร่มพฤกษ์ 33. น. 55–75.

รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง, มลิสา เวชยานนท์, ปภัสรา คุณเลิศ และพรชนก ชโลปกรณ์. 2558. การศึกษาการปนเปื้อนของสารกำจัดศัตรูพืชสู่สิ่งแวดล้อมในวิทยาลัยชัยบาดาลพิพัฒน์. *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร ปีที่ 10* ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2558. น. 22 – 37.

วนิดา จันทร์โสม. 2555. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการล้างผักกะหล่ำปลี และผักกาดขาว เพื่อลดปริมาณสารพิษ

ตกค้างกลุ่มไพรีทรอยด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วิจิตรา เหลียวตระกลู, วชิรญา เหลียวตระกูล, ปรียานุช เพียนเลี้ยงชีพ, รวีวรรณ เดื่อมขันมณี. 2563. การตรวจสอบสารเคมีตกค้างกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตในผักสดในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาและประสิทธิภาพในการล้างผักต่อสารเคมีตกค้างในผักคะน้า. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 2563*. น. 131–138.

สภาเกษตรแห่งชาติ. 2565. แผนพัฒนาเกษตรกรรมระดับจังหวัดราชบุรี พ.ศ. 2565-2569. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.nfcrbr.or.th/site/attachments/article/319/%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B8%9B%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%8A%E0%B8%9A%E0%B8%B8%E0%B8%A3%E0%B8%B5%202565-2569.pdf (8 มกราคม 2566).

สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2565. “รายงานสรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรปี พ.ศ. 2564”. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.doa.go.th/ard/?page_id=386 (11 มกราคม 2566).

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2559.“ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.acfs.go.th/standard/download/MAXIMUM-RESIDUE-LIMITS.pdf (11 กุมภาพันธ์ 2565).

อรอนงค์ ผิวนิล, ศุภมาศ พนิชศักดิ์ พัฒนา,นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, บงกชรัตน์ ปิติยนต์ และ น้ำเย็น ศิริพัฒน์. 2554. การศึกษาการตกค้างและเคลื่อนย้ายสารกำจัดวัชพืชอะทราซีนในดินพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตะกอนดินและน้ำท่าบริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะ อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49: สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม,น. 1–11.

AOAC. 2016. *Organophosphorus pesticide*. General Multiresidue Method. Association of Official Analytical Chemists Method 970.52. In house method TM-T04-I02

AOAC. 2016. Organochlorine pesticides in water gas chromatographic method. 2005. General Multiresidue Method. Association of Official Analytical Chemists Method 990.06. In house method TM-T04-I01.

EN 15662. 2008. Foods of plant origin - Determination of pesticide residues using GC-MS and/or LCMS/MS following acetonitrile extraction/partitioning and clean-up by dispersive SPE – QuEChERS method.

IUPAC. 2019. Global availability of information onagrochemicals. Pesticide Properties DataBase. [online]. https://www. sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/atoz.htm, March 25, 2019.

Jitpaka S., Wischada J., Thongsuk P., Rattiyakorn S., Weerawut, W. 2015. Monitoring of pesticide residues in domestic vegetables in Thailand during 2015. Asia-Pacific Journal of Science and Technology: Volume: 23. Issue: 04. Article ID.: APST-23-04-03

Oliveira, R.S., Koskinen, W.C., Fereira, F.A. 2001. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazillian soils. *Weed Research*. 41: 97–100.

Supawat Chaikasem, Veerapas Na Roi-et. 2020. Health risk assessment of pesticide residues in vegetables from river basin area applied. Environmental Research App. Envi. Res. 42(2): 46–61.

U.S. EPA, 1994. *Organophosphorus compound by Gas Chromatography capillary column technique*. In-house method. 2005. EPA method 8141A, Revision 1.

U.S. EPA. 2014. Technical overview of ecological risk assessment risk characterization. Washington, D.C.

U.S. EPA. 2018. National primary drinking water regulations. United States Environmental Protection Agency. [online]. Available http://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations (10 Feb. 2022)

การศึกษาคุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา

Study of water quality in drainage canals for agriculture and community in Mae Suk Subdistrict, Mae Chai District, Phayao Province

ชานนท์ วงศ์ลังกา, จุฑารัตน์ คำเงิน, สุชัญญา ทองเครือ*

Chanon Wonglangka, Jutarat Khamngoen, Suchanya Thongkrua*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา พะเยา 56000

Major of Environmental Science, School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao 56000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: suchanya_9@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนและลุ่มน้ำโขงเหนือ เก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 6 จุด ด้วยวิธีการเก็บแบบจ้วงในฤดูฝนของเดือนกรกฎาคมและสิงหาคม ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีตามวิธีมาตรฐานของเอพีเอชเอและประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ตรวจวิเคราะห์สารกำจัดวัชพืชในน้ำด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง พบว่าค่าอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง การนำไฟฟ้า ออกซิเจนละลาย บีโอดี และแอมโมเนียผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินสำหรับการเกษตร ตรวจพบไกลโฟเซตในช่วง 0.0062±0.00–0.0067±0.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกันทั้ง 2 เดือน และตรวจพบบิสไพริแบค-โซเดียมเฉพาะในเดือนกรกฎาคมมีค่า 0.2438±0.00–0.3487±0.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำข้อมูลนี้ไปส่งเสริมด้านการจัดการน้ำและเกษตรอินทรีย์ในพื้นที่ต่อไป

คำสำคัญ: ชุมชน, นาข้าว, น้ำเสีย, สารกำจัดศัตรูพืช

Abstract

The objective of this research was to study water quality in drainage canals for agriculture and community in Mae Suk Subdistrict, Mae Chai District, Phayao Province located in upper Ing watershed and North Mekong Basin area. The water samples of 6 sampling points were collected in rainy season during July and August. Physical and chemical characteristics of water were analyzed by standard method of APHA and Announcement of the National Environment Committee. The pesticides contaminated in water were analyzed by HPLC. The results were found that, temperature, pH, EC, DO, BOD and ammonia of all points met the requirements for surface water quality standard of agriculture. Furthermore, glyphosate was detected in a range of 0.0062±0.00–0.0067±0.00 ug/L for 2 months. Bispyribac-sodium was detected in July of 0.2438±0.00–0.3487±0.00 ug/L. The data can be used by the relevant organizations to support water management and organic farming in the future.

Keywords: Community, Pesticide, Rice field, Wastewater

คำนำ

ประเทศไทยมีเนื้อที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรในปี 2562 ทั้งหมด 149.25 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) จึงมีความต้องการใช้น้ำเพื่อการเกษตรค่อนข้างสูงและมีแนวโน้มความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำเพื่อการเกษตรเกิดขึ้นทุกปี สาเหตุหนึ่งมาจากคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินเสื่อมโทรมไม่ความเหมาะสมต่อการทำการเกษตร แต่ในทางกลับกันการเกษตรกรรมเองก็ก่อให้เกิดของเสียทั้งการใช้สารเคมีทางการเกษตรและของเสียหรือมลพิษจากการเกษตรปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ ปี 2554–2560 ประเทศไทยมีแนวโน้มการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชเพิ่มสูงขึ้น โดยในปี 2560 ประเทศไทยมีปริมาณการนำเข้าสารเคมีกำจัดวัชพืชสูงที่สุดเท่ากับ 148,979 ตัน รองลงมาคือสารกำจัดแมลงเท่ากับ 21,601 ตัน และสารป้องกันและกำจัดโรคพืช 19,923 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) ซึ่งการใช้สารเคมีทางการเกษตรทั้งการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชและปุ๋ยเคมี จะทำให้เกิดการปนเปื้อนและความไม่ปลอดภัยต่อสุขภาพของเกษตรกร ผลผลิตทางการเกษตร และสิ่งแวดล้อม สำหรับพื้นที่ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา มีพื้นที่เกษตรกรรมมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 67.59 ของพื้นที่ทั้งหมด โดยพื้นที่นาข้าวมีมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 38.04 ของพื้นที่เกษตร (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562) และจากการสำรวจเบื้องต้นพบว่ามีการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชตามคันนาและในแปลงนาที่สำคัญคือ Glyphosate และ Bispyribac-sodium ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาการปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชในแหล่งน้ำผิวดิน มีการศึกษาความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่ม organochlorine ในน้ำและปลาในแม่น้ำของรัฐ Edo ประเทศไนจีเรีย โดย Lindane, Aldrin, pp-DDE, op-DDD, op-DDT และ pp-DDT ถูกตรวจพบทุกแหล่งน้ำ และถูกตรวจพบในเนื้อปลาด้วยเช่นกัน (Ize-Iyamu et al., 2007) สำหรับข้อมูลการปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชในแหล่งน้ำที่รับน้ำเสียจากการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนซึ่งอยู่ในพื้นที่ของลุ่มน้ำโขงเหนือยังไม่พบการรายงาน มีเพียงรายงานการปนเปื้อนของโลหะหนักและคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำทั่วไปเท่านั้น และการศึกษาไม่ได้มีการระบุถึงแหล่งที่มาของสารมลพิษที่ชัดเจน จึงทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องไม่สามารถแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงดำเนินการศึกษาและประเมินปริมาณสารมลพิษในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา เป็นข้อมูลพื้นฐานให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลวิจัยไปส่งเสริมด้านการจัดการน้ำและเกษตรอินทรีย์ในพื้นที่ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่ในตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ลงพื้นที่สำรวจและกำหนดจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 6 จุด โดยจุดเก็บตัวอย่างน้ำ MS1, MS2 และ MS3 เป็นลำน้ำที่ไหลมาจากอ่างเก็บน้ำแม่สุก และจุดเก็บตัวอย่าง MC1, MC2 และ MC3 เป็นลำน้ำที่ไหลมาจากอ่างเก็บน้ำแม่จว้า แสดงดัง Fig. 1 โดยลักษณะทางกายภาพของจุดเก็บตัวอย่างน้ำแสดงดัง Fig. 2 มีรายละเอียด คือ จุด MS1 เป็นตัวแทนพื้นที่การเกษตร ลักษณะลำน้ำเป็นทางตรง มีฝายชะลอน้ำ บริเวณโดยรอบมีต้นหญ้าปกคลุมค่อนข้างมาก น้ำจะไหลผ่านพื้นที่เกษตรนาข้าว สวนยางพารา และพืชผักเล็กน้อย เช่น ถั่วฝักยาว เป็นต้น จุด MS2 เป็นตัวแทนพื้นที่ชุมชน ลักษณะลำน้ำค่อนข้างแคบ น้ำไหลผ่านบริเวณชุมชนค่อนข้างหนาแน่น จุด MS3 เป็นตัวแทนพื้นที่การเกษตร ลักษณะลำน้ำคดเคี้ยวและกว้าง ตลอดสองฝั่งลำน้ำเป็นนาข้าวทั้งหมด จุด MC1 เป็นตัวแทนพื้นที่การเกษตร ลักษณะลำน้ำบางช่วงกว้าง บางช่วงแคบ บริเวณใกล้เคียงมีพื้นที่ทำการเกษตรนาข้าวและไร่ข้าวโพด จุด MC2 เป็นตัวแทนพื้นที่ชุมชน ลักษณะลำน้ำตรง แต่แคบ ไหลผ่านพื้นที่ชุมชนที่ค่อนข้างหนาแน่น และ

จุด MC3 เป็นตัวแทนพื้นที่การเกษตร ลักษณะลำน้ำไม่กว้างมาก น้ำจะไหลผ่านบ้านเรือนเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ทำการเกษตรนาข้าว

Fig. 1 Study area in Mae Suk Subdistrict, Mae Chai District, Phayao Province

Fig. 2 Water sampling points

การศึกษาคุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชน

ลงพื้นที่สำรวจ เก็บตัวอย่างน้ำ และตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนทั้งหมด 6 จุด ทำการเก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีการเก็บแบบจ้วง (Grab sampling) ที่ความลึกกึ่งกลางลำน้ำ เก็บตัวอย่างน้ำในฤดูฝนคือช่วงที่ข้าวเจริญเติบโตและมีการใช้สารเคมีทางการเกษตรตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม เก็บตัวอย่างเดือนละ 1 ครั้ง ทำการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในห้องปฏิบัติการของคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา โดยพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ เช่น กรด-ด่าง (pH) ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ดีโอ (DO) บีโอดี (BOD) และสารเคมีกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น โดยวิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทำตามวิธีมาตรฐานของ Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, AWWA and WEF, 2017) และประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) สำหรับ

สารเคมีกำจัดวัชพืช ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ยี่ห้อ Shimazu รุ่น LC-20A โดยการตรวจวิเคราะห์ Glyphosate ใช้ Mobile phase คือ Ammonium acetate/Methanol (50:50 v/v) และใช้ Fluorescent detector ที่ความยาวคลื่น 256 nm และ 315 nm (Wang et al., 2016) และการตรวจวิเคราะห์ Bispyribac-sodium ใช้ Mobile phase คือ Acetonitrile: Phosphoric acid 0.1% (1:1) ใช้ UV detection ที่ความยาวคลื่น 248 nm (Kurz et al., 2009) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำข้อมูลคุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนมาเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินสำหรับการเกษตรตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537 (กรมควบคุมมลพิษ, 2564)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ทั้งหมด 6 จุด แสดงดัง Table 1 พบว่าในเดือนกรกฎาคมและเดือนสิงหาคม น้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 28.15±0.07–32.85±0.06°C และ 28.00±0.06–31.73±0.37°C ตามลำดับ มีค่าการนำไฟฟ้า (EC) อยู่ในช่วง 70.5±0.04–147.5±0.07 µs/cm และ 64.33±0.57–120.33±0.58 µs/cm ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.05±0.03–7.75±0.07 และ 7.43±0.06–8.00±0.26 ตามลำดับ มีค่าออกซิเจนละลาย (DO) อยู่ในช่วง 5.85±0.02–7.05±0.07 mg/L และ 4.53±0.11–5.93±0.15 mg/L ตามลำดับ มีค่าบีโอดี (BOD) อยู่ในช่วง 0.60±0.14–1.05±0.25 mg/L และ 0.50±0.10–1.33±0.15 mg/L ตามลำดับ ตรวจไม่พบแอมโมเนียทั้ง 2 เดือน และตรวจพบฟอสเฟตเฉพาะเดือนสิงหาคมมีค่าอยู่ในช่วง 0.09±0.00–4.05±0.00 mg/L นอกจากนี้ยังตรวจพบสารเคมีกำจัดวัชพืชชนิด ไกลโฟเซต (Glyphosate) ในปริมาณต่ำมากใกล้เคียงกันทั้ง 2 เดือน มีค่าอยู่ในช่วง 0.0062±0.00–0.0067±0.00 ug/L และตรวจพบบิสไพริแบค-โซเดียม (Bispyribac-Sodium) เฉพาะในเดือนกรกฎาคม มีค่าอยู่ในช่วง 0.2438±0.00–0.3487±0.00 ug/L ซึ่งคุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนในเดือนกรกฎาคมและเดือนสิงหาคม มีค่าอุณหภูมิ การนำไฟฟ้า (EC) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ออกซิเจนละลาย (DO) บีโอดี (BOD) และแอมโมเนีย ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (สำหรับการเกษตร) (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) บ่งชี้ให้เห็นว่าน้ำเสียจากกิจกรรมทางการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ศึกษาส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในคลองในระดับต่ำ และน้ำในคลองระบายน้ำในพื้นที่ศึกษามีคุณภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำในคลองระบายน้ำเสียจากชุมชนมีค่าบีโอดี (BOD) สูงกว่าน้ำในคลองที่ระบายจากพื้นที่เกษตร แสดงให้เห็นว่าชุมชนมีการปล่อยของเสียในรูปสารอินทรีย์ลงคลองระบายน้ำมากกว่าพื้นที่เกษตร แต่ค่าบีโอดี (BOD) ที่ตรวจพบไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (สำหรับการเกษตร) (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่มีมากช่วยเจือจางความสกปรกของน้ำในคลองระบายน้ำลง การตรวจไม่พบแอมโมเนียและฟอสเฟตในเดือนกรกฎาคม เนื่องจากทำการเก็บตัวอย่างน้ำในช่วงต้นเดือนกรกฎาคม เกษตรกรผู้ปลูกข้าวในพื้นที่เกษตรยังไม่มีการใช้ปุ๋ยเคมีทางการเกษตร ส่วนเดือนสิงหาคมพบฟอสเฟตในปริมาณต่ำ ซึ่งพบมากที่สุดที่จุดเก็บ MC2 (พื้นที่ชุมชน) คาดว่าเนื่องมาจากการปล่อยน้ำเสียจากการซักล้างออกชุมชนที่พักอาศัย นอกจากนี้ยังตรวจพบไกลโฟเซต (Glyphosate) ทั้งในพื้นที่เกษตรและชุมชนในปริมาณต่ำมาก และมีปริมาณใกล้เคียงกันทั้ง 2 เดือน สอดคล้องกับการใช้สารเคมีของเกษตรกรที่มีปริมาณไม่มาก ซึ่งใช้ฉีดฆ่าหญ้าเฉพาะบนคันนาเท่านั้น และเกษตรกรบางรายไม่ใช้สารนี้แต่ใช้การตัดหญ้าแทน นอกจากนี้สมบัติการละลายน้ำของไกลโฟเซตมีค่าเท่ากับ 900,000 mg/L ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง แต่ก็มีความสามารถในการยึดเกาะหรือดูดซับ (Adsorption) กับอนุภาคของตะกอนดินในน้ำสูงเช่นกัน (Tu et al., 2001) เมื่อค่า pH ของน้ำมากกว่า 7 จะทำให้ไกลโฟเซตมีประจุลบ และดูดซับกับประจุบวกของแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำหรือบนอนุภาคตะกอนดินได้

มากขึ้น ทำให้ละลายน้ำได้น้อยลง (SynergyAG, 2019) ซึ่งค่า pH ของน้ำจากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงเป็นกลางซึ่งไม่น่ามีผลต่อการละลายน้ำของไกลโฟเซต เมื่อพิจารณาความสามารถในการยึดเกาะกับอนุภาคตะกอนดิน พบว่าจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า clay content และ cation exchange capacity สูงขึ้น (Tu et al., 2001) และไกลโฟเซตที่ปนเปื้อนในน้ำจะสามารถยึดเกาะกับอนุภาคตะกอนดินได้อย่างรวดเร็ว (Tu et al., 2001) ดังนั้นจึงทำให้ไกลโฟเซตบางส่วนที่ระบายจากพื้นที่นาข้าวจะเกิดการดูดซับหรือยึดเกาะกับอนุภาคตะกอนดิน และทำให้ตรวจพบไกลโฟเซตในน้ำได้น้อยอีกทางหนึ่ง การตรวจพบบิสไพริแบค-โซเดียม (Bispyribac-Sodium) เฉพาะในเดือนกรกฎาคม และพบมากที่สุดในพื้นที่เกษตร (MS1และ MC1) ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาการใช้สารเคมีของเกษตรกรในช่วงหลังการเริ่มเพาะปลูกและข้าวกำลังเจริญเติบโต เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยการทดสอบความเป็นพิษของไกลโฟเซตและบิสไพริแบค-โซเดียมที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยนี้ตรวจพบสารเคมีกำจัดวัชพืชในน้ำทั้ง 2 ชนิดในปริมาณต่ำมาก บ่งชี้ให้เห็นถึงผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและระบบนิเวศที่น้อยมากเช่นกัน โดยความเป็นพิษของไกลโฟเซตต่อสัตว์น้ำ เช่น ความเป็นพิษเฉียบพลันในหนู มีค่า LD_{50} เท่ากับ 5,600 mg/kg (ทัศนียา, 2552) ความเป็นพิษต่อปลานิลและปลาตะเพียนมีค่า LC_{50}–96h เท่ากับ 14.88 mg/L และ LC_{50}–96h เท่ากับ 19.64 mg/L ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 0.18-0.6 mg/L จะทำให้ปลานิลมีครีบหางที่คดงอ (ทัศนียา, 2552) และที่ความเข้มข้น 0.058 mg/L จะทำลาย DNA ของปลา *Anguilla anguilla* (Marques et al., 2014) เป็นต้น ส่วนความเป็นพิษของบิสไพริแบค-โซเดียมต่อสัตว์น้ำ เช่น ความเป็นพิษต่อหนูตัวเมีย มีค่า LD_{50} เท่ากับ 2,635 mg/kg ความเป็นพิษต่อปลาเทร้าสีรุ้งมีค่า LC_{50}-96h มากกว่า 100 mg/L (Agworld DBX, 2011) ที่ความเข้มข้น 0.025 ถึง 105.56 mg/L ในเวลา 48 ชั่วโมง มีความเป็นพิษต่อระบบประสาทและพันธุกรรมของลูกอ๊อดในน้ำ (Lajmanovich et al., 2013) และที่ความเข้มข้นของ 0.02 ถึง 0.06 mg/L หลังสัมผัส 96 ชั่วโมง เป็นพิษต่อพันธุกรรมของปลา *Clarias batrachus* (Pradhan et al., 2020) เป็นต้น

Table 1 Water quality of drainage canals for agriculture and community

Water quality	Drainage canal from Mae Suk reservoir						Drainage canal from Mae Chawa reservoir						Water quality standard for agriculture*
	July			August			July			August			
	MS1	MS2	MS3	MS1	MS2	MS3	MC1	MC2	MC3	MC1	MC2	MC3	
Temperature (°C)	28.15± 0.07	30.10± 0.05	32.85± 0.06	28.00± 0.06	28.03± 0.06	30.93± 0.05	31.20± 0.07	30.75± 0.12	31.80± 0.09	28.87± 0.22	29.73± 0.16	31.73± 0.37	not more than nature 3 °C
Electrical Conductivity (μs/cm)	146.50± 0.24	147.50± 0.07	88.50± 0.11	120.33± 0.58	105.00± 0.64	79.00± 0.12	74.50± 009	85.50± 0.11	70.50± 0.04	64.33± 0.27	69.00± 0.15	96.00± 0.31	-
pH	7.25± 0.07	7.65± 0.06	7.05± 0.03	7.43± 0.06	7.60± 0.13	8.00± 0.26	7.75± 0.07	7.25± 0.22	7.05± 0.03	7.70± 0.14	7.80± 0.09	8.00± 0.26	5-9
Dissolved Oxygen (mg/L)	7.05± 0.07	6.10± 0.08	6.75± 0.10	5.34± 0.09	4.93± 0.02	5.93± 0.15	6.00± 0.04	6.20± 0.02	5.85± 0.02	4.53± 0.11	4.63± 0.02	5.05± 0.10	not less than 4 mg/L
Biochemical Oxygen Demand (mg/L)	0.80± 0.11	1.05± 0.25	0.60± 0.14	1.23± 0.12	1.33± 0.15	0.53± 0.10	0.70± 0.09	0.85± 0.10	0.65± 0.08	0.50± 0.10	1.00± 0.10	0.87± 0.08	not more than 2 mg/L
Ammonia (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	not more than 0.5 mg/L
Phosphate (mg/L)	ND	ND	ND	0.32± 0.02	0.09± 0.00	ND	ND	ND	ND	ND	4.05± 0.00	0.18± 0.00	-
Glyphosate (μg/L)	0.0063± 0.00	0.0063± 0.00	0.0063± 0.00	0.0063± 0.00	0.0062± 0.00	0.0067± 0.00	0.0063± 0.00	0.0063±0.00	0.0063± 0.00	0.0063± 0.00	0.0063± 0.00	0.0063± 0.00	-
Bispyribac-Sodium (μg/L)	0.3323± 0.00	0.2460± 0.00	0.2438± 0.00	ND	ND	ND	0.3487± 0.00	0.3371± 0.00	0.2519± 0.00	ND	ND	ND	-

Source: * Pollution Control Department (2021)

สรุป

คุณภาพน้ำในคลองระบายน้ำจากการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา ทั้งหมด 6 จุด ในเดือนกรกฎาคมและเดือนสิงหาคม มีค่าอุณหภูมิ การนำไฟฟ้า (EC) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ออกซิเจนละลาย (DO) บีโอดี (BOD) และแอมโมเนีย ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (สำหรับการเกษตร) ชี้ให้เห็นว่าน้ำเสียจากกิจกรรมทางการเกษตรและชุมชนในพื้นที่ศึกษาส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในคลองในระดับต่ำ และน้ำในคลองระบายน้ำในพื้นที่ศึกษามีคุณภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ต่อไป รวมทั้งพบว่าน้ำในคลองระบายน้ำเสียจากชุมชนมีค่าบีโอดี (BOD) และฟอสเฟตสูงกว่าน้ำในคลองที่ระบายจากพื้นที่เกษตร ตรวจพบสารกำจัดวัชพืชในน้ำ โดยพบไกลโฟเซต (Glyphosate) ทั้งในพื้นที่เกษตรและชุมชนในปริมาณต่ำและใกล้เคียงกันทั้ง 2 เดือน และพบบิสไพริแบค-โซเดียม (Bispyribac-Sodium) เฉพาะในเดือนกรกฎาคมอยู่ในช่วง 0.2438±0.00–0.3487±0.00 ug/L ซึ่งพบมากที่สุดในพื้นที่เกษตรตอนบนของพื้นที่ศึกษา เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นพิษของไกลโฟเซตและบิสไพริแบค-โซเดียมจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยนี้ตรวจพบสารเคมีกำจัดวัชพืชในน้ำทั้ง 2 ชนิดในปริมาณต่ำมาก บ่งชี้ให้เห็นถึงผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและระบบนิเวศที่น้อยมากเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2565 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ภายใต้แผนการวิจัยเรื่อง การบริหารจัดการน้ำยั่งยืนด้วยระบบอัจฉริยะ (Smart Water Solution) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในพื้นที่วิกฤตภัยแล้งซ้ำซากทางการเกษตร ลุ่มน้ำอิงตอนบน จังหวัดพะเยา รหัสโครงการ PRP6505030620

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2564. มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. http://pcd.go.th/info_serv/reg_std_water05.html, 30 ธันวาคม 2564.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2562. แผนการใช้ที่ดินตำบลแม่สุก. กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

ทัศนียา มูลเข้า. 2552. ผลกระทบไกลโฟเซตและพาราควอทต่อปลานิลและตะเพียนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2562. เนื้อที่การใช้ประโยชน์ทางการเกษตรรายจังหวัด ปี พ.ศ. 2560. http://www.oae.go.th/assets/portals/1/news/31064/1_Land%20Utilization2560.pdf, 25 ธันวาคม 2562.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2564. ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ปี 2554–2560. http://oaezone.oae.go.th/view/1/ปัจจัยการผลิต/TH-TH, 10 กรกฎาคม 2564.

Agworld DBX. 2011. Material Safety Data Sheet. https://assets.greenbook.net/M104720.pdf, 27 January 2023.

APHA, AWWA, WEF. 2017. Standard methods for examination of water and wastewater. 23nd ed. American Public Health Association. Washington, DC, USA.

Ize-Iyamu, O.K., Asia, I.O., Egwakhide, P.A. 2007. Concentrations of residues from organochlorine pesticide in water and fish from some rivers in Edo State Nigeria. Int. J. Phys. Sci. 9: 237–241.

Kurz, M.H.S., Gonçalves, F.F., Martel, S., Adaime, M.B., Zanella, R., Machado, S.L.deO., Primel, E.G. 2009. Rapid and accurate HPLC-DAD method for the determination of the Herbicide bispyribac-sodium in surface water and its validation. Quím. Nova. 32: 1457–1460.

Lajmanovich, R. C., Junges, C.M., Attademo, A. M., Peltzer, P.M., Cabagna-Zenklusen M.C., Basso, A. 2013. Individual and mixture toxicity of commercial formulations containing glyphosate, metsulfuron-methyl, bispyribac-sodium, and picloram on *Rhinella arenarum* tadpoles. Water Air Soil Pollute. 224: 224–1404.

Marques, A., Guilherme, S., Gaivão, I., Santos, M.A., Pachecoa, M. 2014. Progression of DNA damage induced by a glyphosate-based herbicide in fish (*Anguilla anguilla*) upon exposure and post-exposure periods-Insights into the mechanisms of genotoxicity and DNA repair. Comp. Biochem. Physiol. C. 166: 126–133.

Pradhan, D., Singh, R.K., Verma, S.K. 2020. Genotoxic potential assessment of the herbicide bispyribac sodium in a fresh water fish *clarias batrachus* (Linn.). Bull. Environ. Contam. Toxicol. 105: 715–720.

SynergyAG. 2019. How water quality affects herbicide efficiency. https://synergy.ag/how-water-quality-affects-herbicide-efficiency/, 28 January 2023.

Tu, M., Hurd, C., Robison, R., Randall, J.M. 2001. Glyphosate. https://www.invasive.org/gist/products/handbook/14.Glyphosate.pdf, 28 January 2023.

Wang, S., Liu, B., Yuan, D., Ma, J. 2016. A simple method for the determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in seawater matrix with high performance liquid chromatography and fluorescence detection. Talanta.161: 700–706.

การบำบัดไดโคลฟีแนคในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แคลเซียมเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชัน

Removal of diclofenac in wastewater using calcium peroxide as a catalyst in ozonation process

ปพิชญา ชูแก้ว*, ชลอ จารุสุทธิรักษ์

Papitchaya Chookaew*, Chalor Jarusutthirak

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: papitchaya.cho@ku.th

บทคัดย่อ

ไดโคลฟีแนค (Diclofenac: DCF) เป็นยาต้านอาการอักเสบที่ใช้อย่างแพร่หลาย จึงพบการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณโอโซน (O_3) ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าพีเอช ระยะเวลา และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณ O_3 pH ระยะเวลา และ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของ DCF ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณ O_3 95 มก./ชม. ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอช 7 และ ปริมาณ CaO_2 1 ก./ล. ที่เวลา 120 นาที ให้ประสิทธิภาพการบำบัด DCF 77.95% การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันและกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา(k) เท่ากับ 0.0095 min^{-1} และ 0.0137 min^{-1} ตามลำดับ

คำสำคัญ: กระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา, แคลเซียมเปอร์ออกไซด์, ไดโคลฟีแนค

Abstract

Diclofenac (DCF) is widely used as an anti-inflammatory drug. Contaminations of DCF in environment cause harmful effects to some organisms in aquatic ecosystem. Therefore, it is necessary to be properly treated before being release into the environment. This research studied the removal efficiencies of DCF contaminated in synthetic wastewater by catalytic ozonation using calcium peroxide (CaO_2) as a catalyst. Factors affecting the removal efficiency, including, ozone dosage, initial concentration of DCF, solution pH and CaO_2 dosage were investigated. The results showed that the increase of O_3 dosage, pH, reaction time and catalyst dosage increased the DCF removal efficiencies. On the other hand, the increase of DCF concentration reduced the DCF removal efficiency. At optimum condition, i.e. ozone dosage of 95 mg/hr., initial concentration of 30 mg/L., solution pH of 7, and CaO_2 dosage of 1 g/L., the removal efficiency of DCF was 77.95% at the reaction time of 120 min. Kinetic study revealed that DCF degradation by ozonation and catalytic ozonation followed the patterns of first-order kinetic with reaction rate constants (k) of 0.0095 and 0.0137 min^{-1}, respectively.

Keywords: Calcium peroxide, Catalytic ozonation, Diclofenac

คำนำ

ไดโคลฟีแนค (Diclofenac: DCF) เป็นยาในกลุ่มต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ (Non-steroidal anti-inflammatory drugs: NSAIDs) ที่นิยมใช้กันทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ มักใช้รักษาอาการปวดกล้ามเนื้อ ข้อ และกระดูก โดยร่างกายสามารถเมทาบอลิซึมและดูดซับ DCF ไว้ในร่างกายได้เพียงส่วนหนึ่งของปริมาณยาที่รับเข้าไป ส่วนที่เหลือจะถูกขับออกนอกร่างกาย (Davies and Anderson, 1997) จึงมีโอกาสปนเปื้อนในน้ำเสียชุมชนรวมทั้งในแหล่งน้ำธรรมชาติ ด้วยคุณสมบัติที่มีค่าครึ่งชีวิตในน้ำยาวนาน (Thalla and Vannarath, 2020) ทำให้มีการตรวจพบ DCF ในแหล่งน้ำธรรมชาติ และ ระบบบำบัดน้ำเสียในหลายพื้นที่ทั่วโลก (Sathishkumar et al., 2020) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า DCF มีความเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศหลายชนิด เช่น สาหร่ายสีเขียว ปลา และ สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง (Zind et al., 2021) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การบำบัด DCF ในน้ำเสียมีอยู่หลายวิธีทั้งกระบวนการทางด้านชีวภาพ ได้แก่ กระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) ซึ่งเป็นการใช้จุลินทรีย์ในการบำบัด แต่เนื่องด้วยโครงสร้างที่ใหญ่และซับซ้อนของ DCF ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (Jabbari et al., 2020) วิธีการดูดซับ (Adsorption) ด้วยวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนสูงสามารถลดปริมาณ DCF ที่ปนเปื้อนได้ในระยะเวลาอันสั้น (Santos et al., 2019) แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของการกำจัดตัวดูดซับและสารมลพิษที่ถูกดูดซับไว้หลังจากใช้งาน การออกซิเดชันทางเคมีเป็นอีกกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถทำลายโครงสร้างของสารอินทรีย์ ทำให้สารอินทรีย์มีขนาดเล็กลง โอโซน (O_3) เป็นสารที่นิยมใช้ในกระบวนการออกซิเดชันเนื่องจากมีค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์สูง และสลายตัวกลายเป็นก๊าซออกซิเจน ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าออกซิเจนละลายให้กับน้ำเสียและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของโอโซนยังมีข้อจำกัดในเรื่องความจำเพาะเจาะจงในการเข้าทำปฏิกิริยาส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัด การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเร่งการแตกตัวของก๊าซโอโซนให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH•) ซึ่งเป็นสารที่มีค่าศักยภาพออกซิไดซ์มากกว่าโอโซนและสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างไม่เฉพาะเจาะจง (Sun et al., 2019) จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้ แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2) เป็นสารประกอบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการและเมื่อละลายในน้ำสามารถช่วยแตกตัวเพื่อสร้างไฮดรอกซิลเรดิคอลได้ (Lu et al., 2017; Xiang et al., 2021) จากการศึกษาการใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดฟีนอล พบว่า สามารถกำจัดฟีนอลและ COD ได้ถึง 97.8% และ 87% ตามลำดับ (Honarmandrad et al., 2021) ชี้ให้เห็นว่า CaO_2 มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชัน อย่างไรก็ตามยังไม่พบการศึกษาการใช้แคลเซียมเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการโอโซเนชันเพื่อใช้ในการบำบัด DCF

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด DCF ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มี CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณก๊าซ O_3 ค่า pH ของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของ DCF ระยะเวลาบำบัด และ ปริมาณ CaO_2 ที่ใช้ รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาก ผลการสามารถใช้เป็นแนวทางในการบำบัด DCF ที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้กระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียสำหรับน้ำเสียชุมชน โรงพยาบาล และโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อน DCF หรือสารเภสัชภัณฑ์อื่นได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

นำแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 400 มล. จากนั้นเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 1 M 160 มล. จากนั้นค่อย ๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาตร (H_2O_2) 208 มล. กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 2 ชม. ด้วยเครื่องกวนสาร จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 5000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง และเอทานอล (C_2H_6O) 1 ครั้ง ก่อนนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชม. (Vijuksungsith et al., 2021)

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ DCF ความเข้มข้น 50 มก./ล. โดยใช้ยาเม็ด DCF ยี่ห้อ Difelene ขนาด 50 มก. 1 เม็ด บดด้วยโกร่งบดยา ละลายในน้ำอาร์โอ (RO) ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน เพื่อกำจัดตะกอนตกค้าง และทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้น DCF ด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer (รุ่น UV1900, Shimadzu) ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร (ชาญยุทธ, 2561) โดยมีค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) เท่ากับ 0.01 มก./ล.

การติดตั้งและการเดินระบบโอโซเนชัน

ถังปฏิกิริยาที่ใช้เป็นถังอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมขนาด 12×12×15 ซม. โดยเครื่องผลิตก๊าซ O_3 มีอัตราการผลิต 2 ระดับ คือ และ 44 และ 95 มก./ชม. ถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์เวนจูรีเพื่อจ่ายก๊าซ O_3 แก่ระบบ ดังแสดงใน Fig.1 ในการเดินระบบน้ำเสียสังเคราะห์จะถูกสูบจากถังปฏิกิริยาผ่านอุปกรณ์เวนจูรี ทำให้เกิดเป็นสภาวะสุญญากาศในเส้นท่อทำให้ก๊าซ O_3 จากเครื่องเครื่องฯละลายผสมกับน้ำเสีย จากนั้นสารละลายจะไหลวนกลับถังปฏิกิริยา สำหรับก๊าซ O_3 ส่วนเกินจะถูกจับไว้ด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

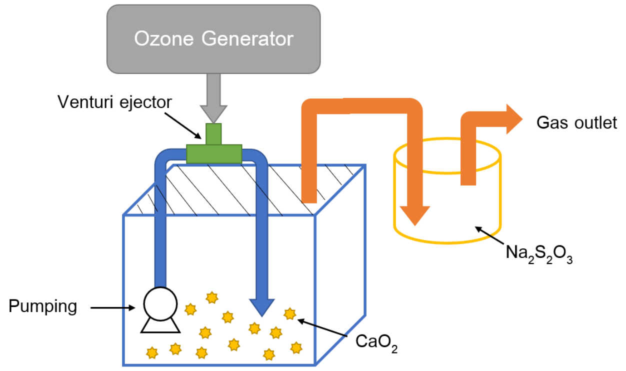


Fig.1 Schematic diagram of venturi-type ozonation

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันและกระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ DCF ความเข้มข้น 25 มก./ล. ค่า pH 6 ปริมาตร 1 ล. ทำการแปรค่าปริมาณก๊าซโอโซนโดยใช้เครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่มีกำลังการผลิต 44 และ 95 มก./ล. การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ DCF ทำการแปรค่าที่ 30, 35 และ 60 มก./ล. การศึกษาผลของค่า pH ทำการแปรค่าในช่วง 5–9 และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ

ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อใช้ CaO_2 1 ก./ล. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนโซเนชัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 30 มก. ที่เวลา 0–120 นาที และ หยด $Na_2S_2O_3$ 0.1 N 2–3 หยด ลงในน้ำตัวอย่างเพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา (Gao et al., 2017)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัด DCF

ศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ DCF ที่คงเหลือ กับ ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น เพื่อเปรียบเทียบกับสมการเชิงเส้นของการเกิดปฏิกิริยาในอันดับต่างๆ ว่าสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาในอันดับใด ดัง Equation 1, Equation 2 และ Equation 3 ซึ่งพิจารณาจากค่า R^2 และหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) จากค่าความชันของสมการเส้นตรง

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ $$[\mathrm{DCF}]_t = [\mathrm{DCF}]_0 - kt \quad (1)$$

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง $$\mathrm{Ln}[\mathrm{DCF}]_t = \mathrm{Ln}[\mathrm{DCF}]_0 - kt \quad (2)$$

ปฏิกิริยาอันดับสอง $$\frac{1}{[\mathrm{DCF}]_t} = \frac{1}{[\mathrm{DCF}]_0} + kt \quad (3)$$

โดย $[DCF]_0$ และ $[DCF]_t$ คือความเข้มข้นของ DCF ที่เวลาเริ่มต้น และ ที่ระยะเวลาใด ๆ ส่วน k และ t คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา และ ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาตามลำดับ

ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาการบำบัด DCF ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

1. *ผลของปริมาณ O_3 และระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัด*

การศึกษาผลของปริมาณ O_3 ต่อประสิทธิภาพการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ความเข้มข้น DCF เริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอชเท่ากับ 6 แปรค่าอัตราการผลิต O_3 ที่ 95 และ 44 มก./ชม. ในช่วงเวลา 120 นาที ผลการศึกษาแสดงดัง Fig. 2 พบว่าเมื่อปริมาณ O_3 มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด DCF เพิ่มขึ้น โดยที่กำลังผลิต O_3 44 มก./ชม. มีประสิทธิภาพการบำบัด 31.23% หากเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 95 มก./ชม. ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเป็น 56.91% ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการผลิต O_3 และระยะเวลาทำให้ปริมาณ O_3 เข้าสู่ระบบละลายน้ำได้มากขึ้นและสามารถเกิดปฏิกิริยากับ DCF ได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด DCF เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับ Jabbari et al. (2020) ในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้อัตราการผลิต O_3 ที่ 95 มก./ชม.

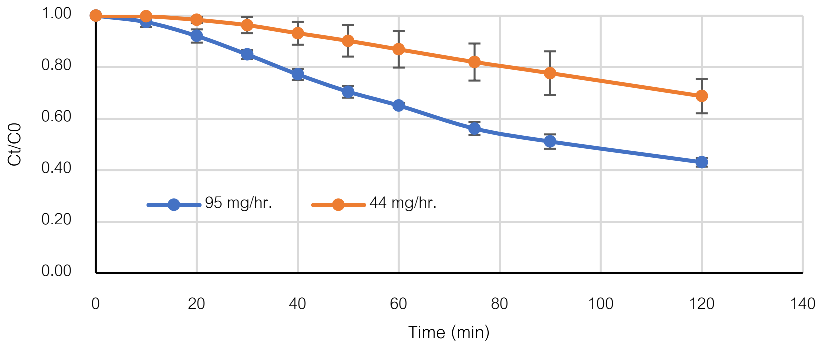


Fig. 2 Effect of ozone dosage on DCF removal by ozonation ([DCF] = 30 mg/L. and pH = 6)

2. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณ O_3 95 มก./ชม. ค่าพีเอช 6 แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 30, 35 และ 60 มก./ล. ผลการศึกษาแสดงดัง Fig. 3 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของ DCF ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลงลด โดยที่ความเข้มข้น 30, 35 และ 60 มก./ล. ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 56.91%, 46.67% และ 42.93% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก O_3 มีอัตราการผลิตคงที่จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ DCF ได้อย่างจำกัด ส่งผลให้ความเข้มข้น DCF ยังคงค้างอยู่ในน้ำเสีย สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xiang et al. (2021)

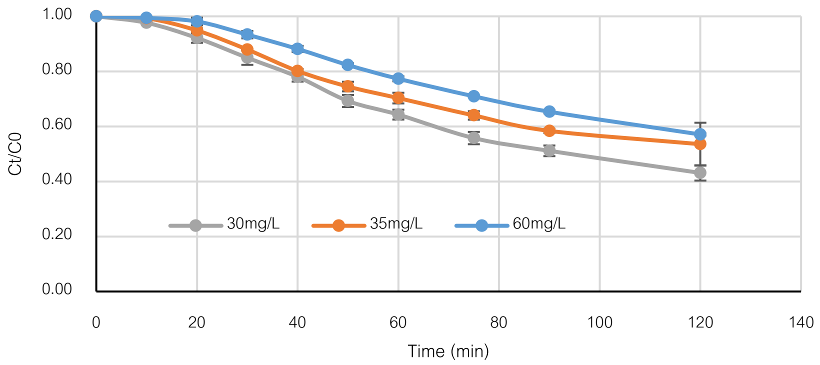


Fig. 3 Effect of initial concentration on DCF removal by ozonation (Ozone dosage = 95 mg/h, and pH = 6)

3. ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัด

การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณ O_3 95 มก./ชม. ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. แปรค่า pH ที่ 5, 6, 7 และ 9 ผลการศึกษาแสดงดัง Fig. 4 พบว่าในสภาวะเบสส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในสภาวะเบสมีไฮดรอกซิลไอออนมาก ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ O_3 ให้เกิดเป็น OH• (Mohsin and Mohammed, 2021) ที่มีค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์สูงกว่าโอโซน จึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่ม pH มากเกินไปอาจเกิดการสลายตัวของโอโซนทำให้เกิด OH• ในปริมาณมาก ซึ่งทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันเอง (Self scavenging) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด DCF ลดลงได้ (Jabbari et al., 2020) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะ pH 7 และ 9 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 64.79% และ 62.51% ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของชาญยุทธ (2561)

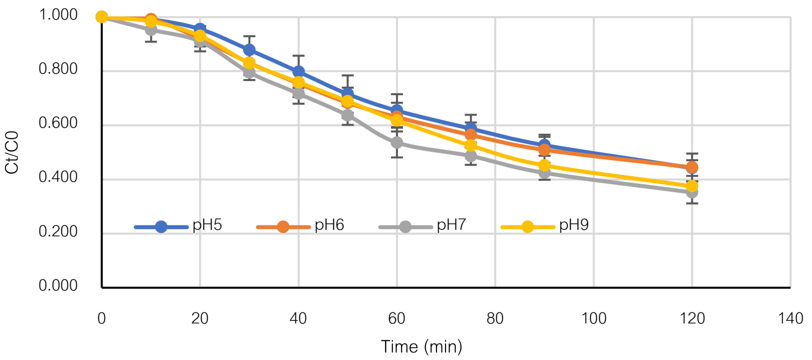


Fig. 4 Effect of pH on DCF removal efficiencies by ozonation (Ozone dosage = 95 mg/h, and [DCF] = 30 mg/L)

การศึกษาการบำบัด DCF ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาการบำบัด DCF ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1 ก./ล. เปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ที่สภาวะเดียวกัน ได้แก่ ปริมาณ O_3 95 มก./ชม. ความเข้มข้น DCF เริ่มต้น 30 มก./ล. และค่าพีเอชเท่ากับ 7 ผลการศึกษาแสดงดัง Fig. 5 พบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด DCF เพิ่มขึ้นจาก 64.79% เป็น 77.95% จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวและการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อ CaO_2 ละลายน้ำจะสลายตัวและเกิดผลิตภัณฑ์ได้แก่ H_2O_2 และ $Ca(OH)_2$ ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้ช่วยให้เกิดการสลายตัวของ O_3 เป็น OH• จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xiang et al. (2021)

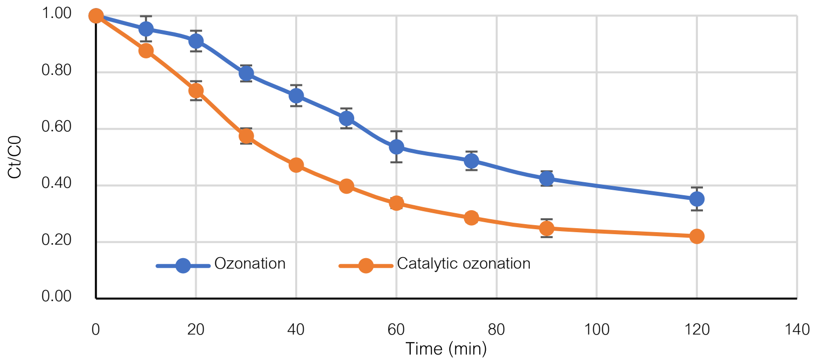


Fig. 5 Comparative study of DCF degradation by ozonation and catalytic ozonation using calcium peroxide as a catalyst (Ozone dosage = 95 mg/hr, [DCF] = 30 mg/L, pH = 7 and CaO_2 = 1 g/L)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันและโอโซเนชันที่ใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการบำบัด DCF สอดคล้องกับแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยแสดงค่าคงที่อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา (k) ไว้ดัง Table 1 พบว่าที่สภาวะที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ค่า k สูงกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ pH 5 ค่า k เพิ่มขึ้นจาก 0.0075 min^{-1} เป็น 0.0169 min^{-1} เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดง

ให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วกว่าการใช้ O_3 เพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jabbari et al. (2020) และ Mohsin and Mohammed (2021)

Table 1 Kinetic study of DCF degradation by ozonation and catalytic ozonation using CaO_2 as a catalyst

pH	Ozonation		Catalytic Ozonation	
	k (min^{-1})	R^2	k (min^{-1})	R^2
5	0.0075	0.9854	0.0169	0.9803
6	0.0075	0.9825	0.0136	0.9687
7	0.0095	0.9827	0.0137	0.9389
9	0.0090	0.9886	0.0129	0.9786

ในการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันและการใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเกิดสารผลพลอยได้ (By products) ชนิดต่าง ๆ จากการศึกษาของ Alharbi et al. (2016) พบสารผลพลอยได้ที่เกิดจากบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันมีมากถึง 11 ชนิด เช่น 2-[2,6-dichlorophenyl)-4-hydroxyphenyl)amino]-phenylacetic acid อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาสารผลพลอยได้ดังกล่าว นอกจากนี้สาร CaO_2 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถละลายน้ำได้ จึงทำให้ไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้อีก ดังนั้นในงานศึกษาขั้นต่อไปจึงควรศึกษาชนิดและสารผลพลอยได้ที่อาจเกิดขึ้น การทดสอบเพื่อหาสภาวะที่ทำให้ DCF เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวที่สมบูรณ์ และ ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซ CO_2 และ H_2O รวมทั้งวิธีการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียของทั้ง 2 ระบบ เพื่อพิจารณาความคุ้มทุน หากต้องนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นนวัตกรรมในระบบบำบัดน้ำเสียจริง

สรุป

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด DCF ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันพบว่า การเพิ่มปริมาณของ O_3 ระยะเวลาการบำบัด และค่าพีเอช ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ O_3 และระยะเวลาจะส่งเสริมให้โอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับสาร DCF ได้มากขึ้น อีกทั้งในสภาวะเบสยังช่วยในการสลายตัวของ O_3 ให้กลายเป็น OH• ที่มีศักยภาพการออกซิไดซ์สูงกว่าโอโซน อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ pH มากจนเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงได้ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง OH• ด้วยกันเอง การเพิ่มความเข้มข้น DCF เริ่มต้น ทำให้ประสิทธิภาพลดลง เนื่องมาจากอัตราการผลิต O_3 คงที่ ปริมาณของ O_3 ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้มีอยู่จำกัด ส่งผลให้ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ DCF ได้ทั้งหมด จึงพบความเข้มข้นของ DCF ที่คงค้างอยู่ กระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นจาก 64.79% เป็น 77.95% โดยสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มี CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ปริมาณ O_3 95 มก./ล. ค่าพีเอช 7 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CaO_2 1 ก./ล. ที่ระยะเวลา 120 นาทีการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัด DCF ด้วยกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียวและโอโซเนชันที่ใช้ CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปตามแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยที่กระบวนการโอโซเนชันที่มี CaO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0137 min^{-1} ซึ่งสูงกว่ากระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ที่มีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0095 min^{-1}

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม และกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ชาญยุทธ เอี่ยมสำองค์. 2561. การบำบัดไดโคลฟีแนคในน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา. โครงงานวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Alharbi, S.K., Price, W.E., Kang, J., Fuijoka, T., Nghiem, L.D. 2016. Ozonation of carbamazepine, diclofenac, sulfamethoxazole and trimethoprim and formation of major oxidation products. Desalination Water Treat. 57: 29340–29351. doi.org/10.1080/19443994.2016.1172986

Davies, N.M., Anderson, K.E. 1997. Clinical Pharmacokinetics of Diclofenac. Clin. Pharmacokinet. 33(3): 184–213. doi.org/10.2165/00003088-199733030-00003

Dos Santos, J. M.N., Pereira, C.R., Foletto, E.L., Dotto, G.L. 2019. Alternative synthesis for ZnFe2O4/chitosan magnetic particles to remove diclofenac from water by adsorption. Int J Biol Macromol. 131: 301–308. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.079

Gao, G., Shen, J., Chu, W., Chen, Z., Yuan, L. 2017. Mechanism of enhanced diclofenac mineralization by catalytic ozonation over iron silicate-loaded pumice. Sep Purif Technol 173: 55–62. doi.org/10.1016/j.seppur.2016.09.016

Honarmandrad, Z., Javid, N., Malakootian, M. 2021. Removal efficiency of phenol by ozonation process with calcium peroxide from aqueous solutions. Appl Water Sci. 11(2): 14. doi.org/10.1007/s13201-020-01344-7

Jabbari, F., Eslami, A., Mahmoudian, J. 2020. Degradation of diclofenac in water using the O_3/UV/S_2O_8 advanced oxidation process. Health Scope 9(2): e99436. doi.org/10.5812/jhealthscope.99436

Lu, S., Zhang, X., Xue, Y. 2017. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: A review. J Hazard Mater. 337: 163–177. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.064

Mohsin, M.K., Mohammed, A.A. 2021. Catalytic ozonation for removal of antibiotic oxy-tetracycline using zinc oxide nanoparticles. Appl Water Sci 11: 9. doi.org/10.1007/s13201-020-01333-w

Sathishkumar, P., Meena, R.A.A., Palanisami, T., Ashokkumar, V., Palvannan, T., Gu, F. L. 2020. Occurrence, interactive effects and ecological risk of diclofenac in environmental compartments and biota - a review. Sci Total Environ. 698: 134057. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134057

Sun, Q., Lu, J., Wu, J., Zhu, G. 2019. Catalytic ozonation of sulfonamide, fluoroquinolone, and tetracycline antibiotics using nano-magnesium hydroxide from natural bischofite. Air Soil Pollut. 230: 55. doi.org/10.1007/s11270-019-4108-y

Thalla, A.K., Vannarath, A.S. 2020. Occurrence and environmental risks of nonsteroidal anti-inflammatory drugs in urban wastewater in the southwest monsoon region of India. Environ Monit Assess. 192(3): 193. doi.org/10.1007/s10661-020-8161-1

Vijuksungsith, P., Satapanajaru, T., Chokejaroenrat, C., et al. 2021. Remediating oxytetracycline-contaminated aquaculture water using nano calcium peroxide ($nCaO_2$) produced from flue gas desulfurization (FGD) gypsum. Environ Technol Innov. 24: 101861. doi.org/10.1016/j.eti.2021.101861

Zind. H., Mondamert. L., Remaury. Q.B., Cleon. A., Leitner. N.K.V., Labanowski. J. 2021. Occurrence of carbamazepine, diclofenac, and their related metabolites and transformation products in a French aquatic environment and preliminary risk assessment. Water Res.196: 117052. doi.org/10.1016/j.watres.2021.117052

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ผศ.ดร.บุญธนา วรรณเลิศ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
2. รศ.ดร.ปกรณ์ วรรธณอมร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
3. รศ.ดร.ปณิทัต หาสิน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
4. รศ.ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
5. ผศ.ดร.วิชชา อิ่มอร่าม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
6. ผศ.ดร.วิรัญญา แก้ววัฒนะ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
7. รศ.ดร.กรรณิการ์ ดวงมาลย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
8. รศ.ดร.กัญจนา ธีระกุล ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
9. ผศ.ดร.เดือนรัตน์ ชลอุดมกุล ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
10. รศ.ดร.นันทนา สีสุข ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
11. ดร.ปิยังกูล เหลืองเจริญกิจ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
12. รศ.ดร.วิเชียร กิจปรีชาวนิช ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
13. รศ.ดร.ณัฐนันท์ ต.เทียนประเสริฐ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
14. รศ.ดร.ราตรี วงศ์ปัญญา ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
15. ดร.วราภรณ์ เอื้อวิริยานุกูล ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
16. รศ.ดร.ครศร ศรีกุลนาถ ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
17. ผศ.ดร.ธีรศักดิ์ เอโกบล ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
18. ผศ.ดร.มิ่งขวัญ นิพิฐวัธนะผล ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
19. ศ.ดร.อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
20. รศ.ดร.อัญชณี คูเบอร่า ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
21. ผศ.ดร.อัญชลี ศิริขจรกิจ ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
22. รศ.ดร.ณัฐพร ฉัตรแถม ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
23. ผศ.ดร.นพฤทธิ์ จินันทุยา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
24. ผศ.ดร.วิทชุกร ภู่ทอง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
25. รศ.ดร.ศิริกาญจนา ทองมี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
26. ผศ.ดร.อภิชาติ พัฒนโภครัตนา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
27. ผศ.ดร.เดชา เดชตรัยรัตน์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
28. ผศ.ดร.ณัฐสมน เพชรแสง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
29. รศ.ดร.พงศ์เทพ ประจงทัศน์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
30. ดร.กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

31. อ.พงศกร จิวาภรณ์คุปต์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
32. ดร.ภาณุ ตรัยเวช ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
33. ผศ.ดร.ลัดดา แต่งวัฒนานุกูล ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
34. รศ.ดร.บุญอ้อม โฉมที ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
35. ผศ.ดร.อำไพ ทองธีรภาพ ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
36. รศ.ดร.วชิรญาณ์ ธงอาสา ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
37. รศ.ดร.วรรณวิภา วงศ์แสงนาค ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
38. รศ.ดร.วีระศักดิ์ ฟุ้งเฟื่อง ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
39. ดร.วรพงศ์ สิงห์ชาติ สำนักงานเลขานุการ คณะวิทยาศาสตร์

Editorial Board

Subject: Science (Internal)

1. Asst.Prof.Dr.Boontana Wannalerse
2. Assoc.Prof.Dr.Pakorn Wattana-Amorn
3. Assoc.Prof.Dr.Panitat Hasin
4. Assoc.Prof.Dr.Pitak Chuawong
5. Asst.Prof.Dr. Witcha Imaram
6. Asst.Prof.Dr.Wirunya Keawwattana
7. Assoc.Prof.Dr.Kannika Duangmal
8. Assoc.Prof.Dr.Gunjana Theeragool
9. Asst.Prof.Dr. Duenrut Chonudomkul
10. Assoc.Prof.Dr.Nantana Srisuk
11. Dr.Piyangkun Lueangjaroenkit
12. Assoc.Prof.Dr.Vichien Kitpreechavanich
13. Assoc.Prof.Dr.Nattanan T.Thienprasert
14. Assoc.Prof.Dr.Ratree Wongpanya
15. Dr.Waraporn Auiewiriyanukul
16. Assoc.Prof.Dr.Kornsorn Srikulnath
17. Asst.Prof.Dr.Teerasak E-kobon
18. Asst.Prof.Dr.Mingkwan Nipitwattanaphon
19. Prof.Dr.Arinthip Thamchaipenet
20. Assoc.Prof.Dr.Anchanee Cubera
21. Asst.Prof.Dr.Anchalee Sirikhachornkit
22. Assoc.Prof.Dr.Nattaporn Chattham
23. Asst.Prof.Dr.Noparit Jinuntuya
24. Asst.Prof.Dr.Witchukorn Phuthong
25. Assoc.Prof.Dr.Sirikanjana Thongmee
26. Asst.Prof.Dr.Apichart Pattanaporkratana
27. Asst.Prof.Dr.Decha Dechtrirat
28. Asst.Prof.Dr.Nattasamon Petchsang
29. Assoc.Prof.Dr.Pongthep Prajongtat
30. Dr.Kannaree Chuangcham
31. Mr.Pongsakorn Jiwapornkupt
32. Asst.Prof.Dr.Panu Trivej
33. Asst.Prof.Dr.Ladda Tangwattananukul
34. Assoc.Prof.Dr.Boonorm Chomtee
35. Asst.Prof.Dr.Ampai Thongteeraparp
36. Assoc.Prof.Dr.Wachiryah Thong-asa
37. Assoc.Prof.Dr. Wanwipa Vongsangnak
38. Assoc.Prof.Dr.Wirasak Fungfuang
39. Dr.Worapong Singchat

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
2. รศ.ดร.นันทิยา หาญศุภลักษณ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
3. รศ.ดร.ชนินทร์ ปัญจพรผล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
4. ศ.ดร.ไพศาล คงคาฉุยฉาย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
5. ผศ.ดร.กานดิส สุดสาคร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
6. รศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
7. ผศ.ดร.วลีพร ดอนไพร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
8. ผศ.ดร.ชัยพร ใจแก้ว ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
9. ผศ.ดร.อัครพงศ์ พัชรรุ่งเรือง ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
10. ผศ.ดร.ธนาวินท์ รักธรรมานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
11. ผศ.ดร.จิตร์ทัศน์ ฝักเจริญผล ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
12. ผศ.ดร.ชมาพร เจียรบุตร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
13. รศ.ดร.วิชัย ศิวะโกศิษฐ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
14. รศ.ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
15. รศ.ดร.ชินธันย์ อารีประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
16. ดร.คเณศ คัจฉสุวรรณมณี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
17. นายชนกนันท์ ขาวบาง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
18. ผศ.ดร.ศีริพงศ์ อติพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
19. รศ.ดร.อดิชัย พรพรหมินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
20. รศ.สุรชัย ลิปิวัฒนาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
21. ผศ.ดร.เปรม รังสิวณิชพงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
22. รศ.ดร.อรทัย จงประทีป ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
23. รศ.ดร.พรธิภา องค์คุณารักษ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
24. รศ.ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
25. ผศ.ดร.รมิดายุ อยู่สุข ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
26. ผศ.ดร.ชนะ รักษ์ศิริ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
27. ผศ.ดร.พาพิศ วงศ์ชัยสุวัฒน์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
28. รศ.ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
29. รศ.ดร.เฉลิมราช วันทวิน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
30. ผศ.ดร.ฆนิศา รุ่งแจ้ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

31. ผศ.ดร.จักรพันธ์ เทือกต๊ะ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
32. ผศ.พท.ดร.สรวิศ สุภเวชย์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
33. รศ.พิพัฒน์ สอนวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
34. ผศ.ดร.อนุเผ่า อบแพทย์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
35. ผศ.ธนัช สุขวิมลเสรี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
36. รศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
37. รศ.ดร.ก่อโชค จันทวรางกูร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
39. รศ.ดร.สุธาริน สถาปิตานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
40. รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
41. รศ.ชวเลข วณิชเวทิน	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
42. รศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
43. รศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
44. ผศ.ดร.นิสา เหล็กสูงเนิน	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. รศ.ดร.ศศิมา เจริญกิจ	ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศิลปะและการออกแบบ มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. รศ.ดร.วนารัตน์ กรอิสรานุกูล	สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนายั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
3. ผศ.ดร.สุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
4. นายธนา ภู่เผือกรัตน์	การรถไฟแห่งประเทศไทย ศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล
5. นายบัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์	สาขาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
6. ผศ.ดร.ชัยพร ศิลาวัชนาไนย	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกสและหุ่นยนต์ ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
7. ผศ.ดร.ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
8. ผศ.ดร.กรีฑา สมเกียรติกุล	สาขาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

9. นายภูมิ จาตุนิตานนท์	สาขาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
10. รศ.ดร.ชาคริต สุวรรณจำรัส	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
11. ดร.ศันศนีย์ บุญสาลี	กรมวิทยาศาสตร์บริการ
12. ผศ.ดร.นันทชัย กานตานันทะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13. ผศ.ดร.เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
14. รศ.ดร.บุญทรัพย์ วิชญางกูร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
15. ศ.ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
16. ดร.อภิวรรธน์ โชติสังกาศ	สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง
17. รศ.ดร.นที อธิกคุณากร	ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
18. นายวิทยา ศรีสมบูรณ์	สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
19. รศ.ดร.ศุวศา กานตวนิชกูร	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
20. รศ.ดร.ภารดี ช่วยบำรุง	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
21. ดร.สุเมธ วงศ์เขียว	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22. ดร.กฤตนัย ต่อศรี	สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ

Editorial Board

Subject: Engineering and Architecture (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Nuanwan Tuaycharoen	2. Assoc.Prof.Dr.Nanthiya Hansupalak
3. Assoc.Prof.Dr.Chanin Panjapornpon	4. Prof.Dr.Paisan Kongkachuichay
5. Asst.Prof.Dr.Kandis Sudsakorn	6. Assoc.Prof.Dr.Manop Charoenchaitrakool
7. Asst.Prof.Dr.Waleeporn Donphai	8. Asst.Prof.Dr.Chaiporn Jaikaeo
9. Asst.Prof.Dr.Akrapong Patchararoungruang	10. Asst.Prof.Dr.Thanawin Rakthanmanon

11. Asst.Prof.Dr.Jittat Fakcharoenphol
12. Asst.Prof.Dr.Chamaporn Chianbutra
13. Assoc.Prof.Dr.Wichai Siwakosit
14. Assoc.Prof.Dr.Nathasak Boonmee
15. Assoc.Prof.Dr.Chinatun Areeprasert
16. Dr.Kanet Katchasuwanmanee
17. Chanoknunt Khaobang
18. Asst.Prof.Dr.Siripong Atipan
19. Assoc.Prof.Dr.Adichai Pornprommin
20. Assoc.Prof.Surachai Lipiwattanakarn
21. Asst.Prof.Dr.Prem Rangsiwanichpong
22. Assoc.Prof.Dr.Oratai Jongprateep
23. Assoc.Prof.Dr.Pornthipa Ongkunaruk
24. Assoc.Prof.Dr.Chansiri Singhtaun
25. Asst.Prof.Dr.Ramidayu Yousuk
26. Asst.Prof.Dr.Chana Raksiri
27. Asst.Prof.Dr.Papis Wongchaisuwat
28. Assoc.Prof.Dr.Pongsak Noophan
29. Assoc.Prof.Dr.Chalermraj Wantawin
30. Asst.Prof.Dr.Kanisa Rungjang
31. Asst.Prof.Dr.Chakrapan Tuakta
32. Asst.Prof.Dr.Soravis Supavetch
33. Assoc.Prof.Piphat Sornwong
34. Asst.Prof.Dr.Anuphao Aobpaet
35. Asst.Prof.Thanutch Sukwimolseree
36. Assoc.Prof.Dr.Weerakaset Suanpaga
37. Assoc.Prof.Dr.Korchoke Chantawarangul
38. Assoc.Prof.Dr.Suttisak Soralump
39. Assoc.Prof.Dr.Sutharin Sthapitanonda
40. Assoc.Prof.Dr.Apiniti Jotisankasa
41. Assoc.Prof.Chavalek Vanichavetin
42. Assoc.Prof.Dr.Piyanut Wethyavivorn
43. Assoc.Prof.Dr.Ratcha Chaichana
44. Asst.Prof.Dr.Nisa Leksungnoen

Subject: Engineering and Architecture (External)

1. Assoc.Prof.Dr.Sasima Charoenkit
2. Assoc.Prof.Dr.Wanarat Konisranukul
3. Asst.Prof.Dr.Supat Patvichaichod
4. Dr.Thana Phuphuakrat
5. Mr.Bundit Inseemeesak
6. Asst.Prof.Dr.Chaiyaporn Silawatchananai
7. Asst.Prof.Dr.Srisit Chianrabutra
8. Asst.Prof.Dr.Kreetha Somkeattikul
9. Mr.Poom Jatunitanon
10. Assoc.Prof.Dr.Chakrit Suvanjumrat
11. Dr.Sansanee Boonsalee
12. Asst.Prof.Dr.Nantachai Kantanantha
13. Asst.Prof.Dr.Petcharat Limsupreeyarat
14. Assoc.Prof.Dr.Boonsap Witchayangkoon
15. Prof.Dr.Chavalit Chaleeraktrakoon
16. Dr.Apivat Jotisankasa
17. Assoc.Prof.Dr.Nathee Athigakunagorn
18. Dr.Wittaya Srisomboon
19. Assoc.Prof.Dr.Suwasa Kantawanichkul
20. Assoc.Prof.Dr.Paradee Chuaybamroong
21. Dr.Sumeth Wongkiew
22. Dr.Kritanai Torsri

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ดร.กฤษณา ตรีศีลวัฒนกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
2. ผศ.ดร.ขนิษฐา วัชราภรณ์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
3. รศ.ดร.ฆรณี ตุ้ยเต็มวงศ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
4. รศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
5. ผศ.ดร.ทานตะวัน พิรักษ์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
6. รศ.ดร.นพรัตน์ ปราบสงบ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
7. ดร.นราพร พรหมไกรวร	ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
8 รศ.ดร.นันทวัน เทอดไทย	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
9. รศ.ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
10. ดร.ปฐมา จาตกานนท์	ฝ่ายเทคโนโลยีชีวมวลและพลังงานชีวภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร
11. ดร.ประมวล ทรายทอง	ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
12. รศ.ดร.ปริศนา สุวรรณาภรณ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
13. รศ.ดร.ปาริฉัตร หงสประภาส	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
14. รศ.ดร.พรธิภา องค์คุณารักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
15. ดร.พรรณภัทร พรหมเพ็ญ	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
16. นายพิสุทธิ์ บุตรสุวรรณ	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
17. ผศ.ดร.มาศอุบล ทองงาม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
18. ดร.รังสิมา ชลคุป	ฝ่ายเทคโนโลยีชีวมวลและพลังงานชีวภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร
19. รศ.ดร.รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
20. รศ.ดร.วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

21. ดร.วิชชา ตรีสุวรรณ	ฝ่ายโภชนาการและสุขภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
22. รศ.ดร.วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
23. รศ.ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
24. ผศ.ดร.สุดาทิพย์ แซ่ตั้น	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
25. รศ.ดร.สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
26. รศ.ดร.สุนทรี สุวรรณสิชณน์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
27. ผศ.ดร.สุวิมล เจริญสิทธิ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
28. รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมคีรี	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
29. ผศ.ดร.อภิชญา ลีลาวณิชกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
30. ผศ.ดร.อัจฉรา เกษสุวรรณ	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
31. ผศ.ดร.อุศมา สุนทรนฤรังษี	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. รศ.ดร.กิติพงศ์ อัศตรกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. รศ.ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รศ.ดร.จิรวรรณ อภิรักษากร	สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
4. รศ.ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. ผศ.ดร.ชโลทร แก่นสันติสุขมงคล	คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
6. รศ.ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. รศ.ดร.นีลวรรณ พงศ์ศิลป์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
8. ผศ.ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
9. ผศ.ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์	ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

10. ผศ.ดร.พิสิฏฐ์ ธรรมวิถี	คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
11. รศ.ดร.วรางคณา สมพงษ์	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
12. ผศ.ดร.ศิรินันท์ แก่นทอง	ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
13. ผศ.ดร.สมโภช พจนพิมล	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (เกษียณอายุ)
14. ดร.สาวิตรี ดือราแม	สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (หลักสูตรจุลชีววิทยา) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
15. ศ.ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เกษียณอายุ)

Editorial Board

Subject: Agro-Industry (Internal)

1. Dr.Krissana Treesilvattanakul
2. Asst.Prof.Dr.Kanitta Watcharaporn
3. Assoc.Prof.Dr.Kooranee Tuitemwong
4. Assoc.Prof.Dr.Jantip Setthayanond
5. Asst.Prof.Dr.Tantawan Pirak
6. Assoc.Prof.Dr.Nopparat Prabsangob
7. Dr.Naraporn Phomkaivon
8. Assoc.Prof.Dr.Nantawan Therdthai
9. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong
10. Dr.Pathama Chatakanonda
11. Dr.Pramuan Saithong
12. Assoc.Prof.Dr.Prisana Suwannaporn
13. Assoc.Prof.Dr.Parichat Hongsprabhas
14. Assoc.Prof.Dr.Pornthipa Ongkunaruk
15. Dr.Phannaphat Phromphen
16. Mr.Pisut Butsuwan
17. Asst.Prof.Dr.Masubon Thongngam
18. Dr.Rungsima Chollakup
19. Assoc.Prof.Dr.Rungnaphar Pongsawatmanit
20. Assoc.Prof.Dr.Wannasawat Ratphitagsanti
21. Dr.Witcha Treesuwan
22. Assoc.Prof.Dr.Weerachet Jittanit
23. Assoc.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
24. Asst.Prof.Dr.Sudathip Sae-tan
25. Assoc.Prof.Dr.Suttipun Keawsompong
26. Assoc.Prof.Dr.Suntaree Suwonsichon
27. Asst.Prof.Dr.Suvimol Charoensiddhi
28. Assoc.Prof.Dr.Hathairat Rimkeeree
29. Asst.Prof.Dr.Apichaya Lilavanichakul
30. Asst.Prof.Dr.Ajchara Kessuvan
31. Asst.Prof.Dr.Aussama Soontrunnarudrungsri

Subject: Agro-Industry (External)

1. Assoc.Prof.Dr.Kitipong Assatarakul
2. Assoc.Prof.Dr.Kanitha Tananuwong
3. Assoc.Prof.Dr.Jirawan Apiraksakorn
4. Assoc.Prof.Dr.Jirarat Anuntagool
5. Asst.Prof.Dr.Chalotorn Kansuntisukmongkol
6. Assoc.Prof.Dr.Chaleeda Borompichaichartkul
7. Assoc.Prof.Dr.Neelawan Pongsilp
8. Asst.Prof.Dr.Bootsrapa Leelawat
9. Asst.Prof.Dr.Parinda Penroj
10. Asst.Prof.Dr.Pisit Dhamvithee
11. Assoc.Prof.Dr.Warangkana Sompongse
12. Asst.Prof.Dr.Sirinun Kaenthong
13. Asst.Prof.Dr.Sompoche Pojjanapimol
14. Dr.Sawitree Dueramae
15. Prof.Dr.Onanong Naivikul

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
2. ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
3. รศ.ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
4. รศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
5. รศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
6. ผศ.ดร.ภาสิณี วรชนะนันท์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
7. อ.ดร.ปิยาภรณ์ สมสมัคร	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
8. ผศ.ดร.ปวีร์ คล่องเวสสะ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
9. อ.ดร.แอน กำภู ณ อยุธยา	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
10. อ.ดร.มณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
11. อ.ดร.อาทิตยา ช่างด้วง	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
12. ผศ.ดร.อรอนงค์ ผิวนิล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
13. อ.ดร.นฤชิต ดำปิน	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
14. ผศ.ดร.ธนิศร์ ปัทมพิฑูร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
15. ผศ.ดร.นพวรรณ เสมวิมล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
16. ผศ.ดร.วัชรพงษ์ วาระรัมย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
17. อ.ดร.สุธี จรรยาสุทธิวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
18. อ.ดร.ภาคภูมิ ชูมณี	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
19. รศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
20. รศ.ดร.ออ พรานไชย	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์

21. ผศ.ดร.วิรงรอง ดวงใจ ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
22. ผศ.ดร.ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์
23. ผศ.ดร.ขรรค์ชัย ประสานัย ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์
24.อ.ดร.ฉัตรพรรษ พงษ์เจริญ ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
25. ผศ.ดร.นิสา เหล็กสูงเนิน ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
26. ดร.ศุภลักษณ์ ศิริ ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
27. ผศ.ดร.วรงค์ สุขเสวต ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
28. ผศ.ดร.กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
29. ผศ.ดร.พิชิต ลำใย ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
30. ดร.นรเศรษฐ์ เขียวศรี ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ผศ.ดร.อิงอร ไชยเยศ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
2. ดร.โดม ประทุมทอง พิพิธภัณฑ์ธรรมชาติวิทยา องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ (อพวช.)
3. ผศ.ดร.ต่อลาภ คำโย สาขาวิชาเกษตรป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ
4. ผศ.ดร.สุธีระ เหิมฮึก คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
5. อ.ดร.ยุพเยาว์ โตศีรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์
6. ดร.วินันท์ดา หิมะมาน กลุ่มงานวิจัยกีฏวิทยาและจุลชีววิทยาป่าไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช

Editorial Board

Subject: Natural Resources and Environment (Internal)

1. Asst.Prof.Dr.Jukkrit Mahujchariyawong
2. Asst.Prof.Dr.Prapaipid Chairattanamanokorn
3. Assoc.Prof.Dr.Patthra Pengthamkeerati
4. Assoc.Prof.Dr.Ratcha Chaichana
5. Assoc.Prof.Dr.Chalor Jarusutthirak
6. Asst.Prof.Dr.Pasinee Worachananant
7. Dr.Piyapawn Somamak
8. Asst.Prof.Dr.Pawee Klongvessa
9. Dr.Ann Kambhu Na Ayudhya
10. Dr.Maneekarn Yoo-iam
11. Dr.Athitaya changduang
12. Asst.Prof.Dr.Onanong Phewnil
13. Dr.Narouchit Dampin
14. Asst.Prof.Dr.Thanit Pattamaptoon
15. Asst.Prof.Dr.Noppawan Semvimol
16. Asst.Prof.Dr.Watcharapong Wararam
17. Dr.Suthee Janyasuthiwong
18. Dr.Parkpoom Choomanee

19. Assoc.Prof.Dr.Suchat Leungprasert
20. Assoc. Prof.Dr.Aor Pranchai
21. Asst.Prof.Dr.Wirongrong Duangjai
22. Asst.Prof.Dr.Chakrit Na Takuathung
23. Asst.Prof.Dr.Khanchai Prasanai
24. Dr.Chattraphas Pongcharoen
25. Asst.Prof.Dr.Nisa Leksungnoen
26. Dr.Supalak Siri
27. Asst.Prof.Dr.Warong Suksavate
28. Asst.Prof.Dr.Kritsadapan Palakit
29. Asst.Prof.Dr.Pichit Lumyai
30. Dr.Noraset Khiowsree

Subject: Natural Resources and Environment (External)

1. Asst.Prof.Dr.Aingon Chaiyes
2. Dr.Dome Pratumtong
3. Asst.Prof.Dr.Torlarp Kamyo
4. Asst.Prof.Dr.Sutheera Hermhuk
5. Dr.Yuppayao Tokeeree
6. Dr.Winanda Himaman

ประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๑ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ด้วยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยกลุ่มเครือข่ายวิจัยประชาชื่น จัดให้มีการประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๑ ในปีพุทธศักราช ๒๕๖๖ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความรู้ความคิดเห็น ประสบการณ์ และเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาต่าง ๆ สู่สาธารณชน

เพื่อให้การประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๑ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จึงแต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๑ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดังต่อไปนี้

คณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ

๑.	นายกสภามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒.	ปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	ที่ปรึกษา
๓.	ปลัดกระทรวงศึกษาธิการ	ที่ปรึกษา
๔.	ปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์	ที่ปรึกษา
๕.	ปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	ที่ปรึกษา
๖.	ปลัดกระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม	ที่ปรึกษา
๗.	ผู้อำนวยการสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	ที่ปรึกษา
๘.	ผู้อำนวยการสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ	ที่ปรึกษา
๙.	ประธานกลุ่มมหาวิทยาลัยเครือข่ายวิจัยประชาชื่น	ที่ปรึกษา
๑๐.	อธิบดีกรมการข้าว	ที่ปรึกษา
๑๑.	อธิบดีกรมชลประทาน	ที่ปรึกษา
๑๒.	อธิบดีกรมประมง	ที่ปรึกษา
๑๓.	อธิบดีกรมปศุสัตว์	ที่ปรึกษา
๑๔.	อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน	ที่ปรึกษา
๑๕.	อธิบดีกรมส่งเสริมการเกษตร	ที่ปรึกษา
๑๖.	ผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาธุรกิจสหกรณ์ กรมส่งเสริมสหกรณ์	ที่ปรึกษา
๑๗.	อธิบดีกรมวิชาการเกษตร	ที่ปรึกษา
๑๘.	อธิบดีกรมป่าไม้	ที่ปรึกษา

๑๙.	อธิบดีกรมควบคุมมลพิษ	ที่ปรึกษา
๒๐.	อธิบดีกรมทรัพยากรธรณี	ที่ปรึกษา
๒๑.	อธิบดีกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง	ที่ปรึกษา
๒๒.	อธิบดีกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม	ที่ปรึกษา
๒๓.	อธิบดีกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช	ที่ปรึกษา
๒๔.	นายกสมาคมนิสิตเก่ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในพระบรมราชูปถัมภ์	ที่ปรึกษา
๒๕.	นายกสมาคมเศรษฐศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒๖.	นายกสมาคมเศรษฐศาสตร์เกษตรแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์	ที่ปรึกษา
๒๗.	นายกสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี	ที่ปรึกษา
๒๘.	นายกสมาคมอารักขาพืชไทย	ที่ปรึกษา
๒๙.	นายกสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางการอาหาร แห่งประเทศไทย	ที่ปรึกษา
๓๐.	ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ	ที่ปรึกษา
๓๑.	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานกรรมการ
๓๒.	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์	รองประธานกรรมการ
๓๓.	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ	รองประธานกรรมการ
๓๔.	รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร	กรรมการ
๓๕.	รองอธิการบดีฝ่ายเทคโนโลยีดิจิทัล	กรรมการ
๓๖.	รองอธิการบดีฝ่ายนวัตกรรมและกิจการเพื่อสังคม	กรรมการ
๓๗.	รองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิตและพัฒนาอย่างยั่งยืน	กรรมการ
๓๘.	รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาคุณภาพ	กรรมการ
๓๙.	รองอธิการบดีฝ่ายการเงินและทรัพย์สิน	กรรมการ
๔๐.	รองอธิการบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์	กรรมการ
๔๑.	รองอธิการบดีฝ่ายกิจการสภามหาวิทยาลัยและพัฒนา ทรัพยากรมนุษย์	กรรมการ
๔๒.	รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาบัณฑิตขั้นสูงและโครงการจัดตั้ง วิทยาเขตสุพรรณบุรี	กรรมการ
๔๓.	รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
๔๔.	รองอธิการบดีวิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๔๕.	รองอธิการบดีวิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร	กรรมการ
๔๖.	คณบดีคณะเกษตร	กรรมการ
๔๗.	คณบดีคณะประมง	กรรมการ
๔๘.	คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์	กรรมการ

๔๙.	คณบดีคณะเทคนิคการสัตวแพทย์	กรรมการ
๕๐.	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์	กรรมการ
๕๑.	คณบดีคณะสิ่งแวดล้อม	กรรมการ
๕๒.	คณบดีคณะวนศาสตร์	กรรมการ
๕๓.	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	กรรมการ
๕๔.	คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	กรรมการ
๕๕.	คณบดีคณะอุตสาหกรรมเกษตร	กรรมการ
๕๖.	คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์	กรรมการ
๕๗.	คณบดีคณะบริหารธุรกิจ	กรรมการ
๕๘.	คณบดีคณะศึกษาศาสตร์	กรรมการ
๕๙.	คณบดีคณะสังคมศาสตร์	กรรมการ
๖๐.	คณบดีคณะมนุษยศาสตร์	กรรมการ
๖๑.	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย	กรรมการ
๖๒.	ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด	กรรมการ
๖๓.	ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมและฝึกอบรม	กรรมการ
๖๔.	ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์	กรรมการ
๖๕.	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการและเลขานุการ
๖๖.	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๖๗.	หัวหน้าสำนักงานเลขานุการ สถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๖๘.	นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ให้ข้อคิดเห็นและอำนวยการให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๑ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

๑.	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์	ที่ปรึกษา
๒.	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ	ที่ปรึกษา
๓.	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
๔.	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร	ประธานกรรมการ
๕.	นายปิยวัตน์ ดิลกสัมพันธ์	รองประธานกรรมการ
๖.	นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร	กรรมการและเลขานุการ
๗.	นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	ผู้ช่วยเลขานุการ
๘.	นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์	ผู้ช่วยเลขานุการ

๙. **กรรมการหมวดวิชาการเกษตรศาสตร์**

๙.๑ สาขาพืช

๑.	คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริชาติ พรมโชติ	ประธานกรรมการ
๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจินต์ เจนวีรวัฒน์	รองประธานกรรมการ
๔.	รองศาสตราจารย์เฉลิมพล ภูมิไชย์	กรรมการ
๕.	รองศาสตราจารย์ชูศักดิ์ จอมพุก	กรรมการ
๖.	รองศาสตราจารย์ธิดา เดชฮวบ	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์ปิติพงษ์ โตบันลือภพ	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์พัชรียา บุญกอแก้ว	กรรมการ
๙.	รองศาสตราจารย์วรชาติ วิศวพิพัฒน์	กรรมการ
๑๐.	รองศาสตราจารย์สุขุมาลย์ เลิศมงคล	กรรมการ
๑๑.	รองศาสตราจารย์สุตเขตต์ นาคะเสถียร	กรรมการ
๑๒.	รองศาสตราจารย์เสาวนุช ถาวรพฤกษ์	กรรมการ
๑๓.	รองศาสตราจารย์อรอุมา เพียซ้าย	กรรมการ
๑๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุฑามาศ ร่มแก้ว	กรรมการ
๑๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุติภรณ์ ทัสสกุลพนิช	กรรมการ
๑๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจนจิรา ชุมภูคำ	กรรมการ
๑๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมชาติ วงศ์ลี้เจริญ	กรรมการ
๑๘.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฌอมาลย์ วงศ์ชาวจันท์	กรรมการ
๑๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล	กรรมการ
๒๐.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงยศ โชติชุติมา	กรรมการ
๒๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทัศไนย จารุวัฒนพันธ์	กรรมการ
๒๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนพล ไชยแสน	กรรมการ
๒๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพ ตัณมุขยกุล	กรรมการ
๒๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนตรนภิส เขียวขำ	กรรมการ
๒๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เบญญา มะโนชัย	กรรมการ
๒๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริยานุช จุลกะ	กรรมการ
๒๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปวีณา ชื่นวาริน	กรรมการ
๒๘.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ กิตติภาดากุล	กรรมการ
๒๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะณัฏฐ์ ผกามาศ	กรรมการ
๓๐.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิจิตรา แก้วสอน	กรรมการ
๓๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เพชรดา ปินใจ	กรรมการ
๓๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัสสร วรรณพินิจ	กรรมการ
๓๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์รักศักดิ์ เสริมศักดิ์	กรรมการ
๓๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาวรรณ เงินกลั่น	กรรมการ

๓๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภธิดา อับดุลลากาซิม	กรรมการ
๓๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม	กรรมการ
๓๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สราวุธ รุ่งเมฆารัตน์	กรรมการ
๓๘.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพจน์ กาเซ็ม	กรรมการ
๓๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพงษ์ ดำรงกิตติกุล	กรรมการ
๔๐.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนงค์นุช สาสนรักกิจ	กรรมการ
๔๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญมณี อาวุชานนท์	กรรมการ
๔๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัณณ์ชญาน์ มงคลชัยพฤกษ์	กรรมการ
๔๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัศเลข รัตนวรรณี	กรรมการ
๔๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อารยา อาจเจริญ เทียนหอม	กรรมการ
๔๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุดมศักดิ์ เลิศสุชาตวนิช	กรรมการ
๔๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกพันธ์ ไกรจักร	กรรมการ
๔๗.	นางสาวกาญจนา บุญเรือง	กรรมการ
๔๘.	นางสาวจรีรัตน์ ฉันทวุฒิพร	กรรมการ
๔๙.	นายเจตษฎา อุตรพันธ์	กรรมการ
๕๐.	นางสาวนิตยา ชูเกาะ	กรรมการ
๕๑.	นางสาววรรณสิริ วรรณรัตน์	กรรมการ
๕๒.	นายวีรชัย มัธยัสถ์ถาวร	กรรมการ
๕๓.	นางสาวอรุณี วงษ์แก้ว	กรรมการ
๕๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัศจี คงศีล	กรรมการและเลขานุการ
๕๕.	นางสาวเพ็ชรลดา แจ้งสี	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๒ สาขาสัตว์

๑.	คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒.	นายกสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี	ที่ปรึกษา
๓.	รองศาสตราจารย์พรรณวดี โสพรรณรัตน์	ประธานกรรมการ
๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาทิพย์ สุวรรณโสภี	รองประธานกรรมการ
๕.	ศาสตราจารย์ชัยภูมิ บัญชาศักดิ์	กรรมการ
๖.	รองศาสตราจารย์ศกร คุณวุฒิฤทธิรณ	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์จำเริญ เที่ยงธรรม	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์วิริยา ลุ้งใหญ่	กรรมการ
๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวิทย์ เปี่ยคำภา	กรรมการ
๑๐.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัจฉรา ขยัน	กรรมการ
๑๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กนกพร พ่วงพงษ์	กรรมการ
๑๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์วิทย์ ระฆังทอง	กรรมการ
๑๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญวิทย์ แก้วตาปี	กรรมการ
๑๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ธร คงมั่น	กรรมการ

๑๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ สโรช แก้วมณี	กรรมการ
๑๖.	สัตวแพทย์หญิง มัธย์ฤน โล่ทอง	กรรมการ
๑๗.	นายดนัย จัตวา	กรรมการ
๑๘.	นายสมบัติ ประสงค์สุข	กรรมการ
๑๙.	นางสาวอัญชลี บวดขุนทด	กรรมการ
๒๐.	นางสาวนิภารัตน์ โคตะนนท์	กรรมการ
๒๑.	นางสาวทิพย์มนต์ ใยเกษ	กรรมการ
๒๒.	นายพัลลภ ตั้งตระกูลทรัพย์	กรรมการ
๒๓.	นายพีรยุทธ นิลชื่น	กรรมการ
๒๔.	นางสาวพนัดดา บึงศรีสวัสดิ์	กรรมการและเลขานุการ
๒๕.	นางสาว ก. ทีปลักษณ์ ระงับเหตุ	กรรมการและเลขานุการ
๒๖.	นางสาววัชราภรณ์ ศรีพลน้อย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๗.	นางสาวสุภาพร ย้อนโคกสูง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๘.	นางสาวพิจิตรา เปียธัญญา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๓ สาขาประมง

๑.	คณบดีคณะประมง	ที่ปรึกษา
๒.	ศาสตราจารย์อุทัยรัตน์ ณ นคร	ที่ปรึกษา
๓.	ศาสตราจารย์สุภาวดี พุ่มพวง	ที่ปรึกษา
๔.	ศาสตราจารย์เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์	ที่ปรึกษา
๕.	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะประมง	ประธานกรรมการ
๖.	หัวหน้าศูนย์บริหารงานวิจัยและสนับสนุนวิชาการ คณะประมง	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์อรพินท์ จินตสถาพร	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์วราห์ เทพาหุดี	กรรมการ
๙.	รองศาสตราจารย์กังสดาลย์ บุญปราบ	กรรมการ
๑๐.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประพันธ์ศักดิ์ ศีรษะภูมิ	กรรมการ
๑๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาทิต ฉัตรชัยพันธ์	กรรมการ
๑๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาย วรชนะนันท์	กรรมการ
๑๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพงศ์ ด้วงดี	กรรมการ
๑๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมธี แก้วเนิน	กรรมการ
๑๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิราภรณ์ ไตรศักดิ์	กรรมการ
๑๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรี ครูขยัน	กรรมการ
๑๗.	นายถิรวัฒน์ รายรัตน์	กรรมการ
๑๘.	นายวชิระ ใจงาม	กรรมการ
๑๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนัสพงษ์ โภควนิช	กรรมการและเลขานุการ
๒๐.	นางสาวกาญจนา ทองเครือ	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๑.	นางสาวสุมิตตรา สุพรรณ์นอก	ผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๔ สาขาสัตวแพทยศาสตร์

๑.	คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒.	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะสัตวแพทยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๓.	รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ กัญจน์ แก้วมงคล	ประธานกรรมการ
๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ อลงกต บุญสูงเนิน	รองประธานกรรมการ
๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ เกรียงไกร วิฑูรเสถียร	กรรมการ
๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง ขนิษฐา เพชรอุดมสินสุข	กรรมการ
๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง ปัจฉิมา สิทธิสาร	กรรมการ
๘.	สัตวแพทย์หญิง ปริญทิพย์ วงศ์ไทย	กรรมการ
๙.	นางสาวญาดา หาญปัญญาพิชิต	กรรมการและเลขานุการ
๑๐.	นางสาววริศรา มารยาท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๑.	นางสาวศรัณยา อร่ามศิริรุจิเวทย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๒.	นายวงศ์วิศว์ เจริญผล	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๕ สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์

๑.	คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒.	รองศาสตราจารย์สาวิตรี รังสิภัทร์	ที่ปรึกษา
๓.	รองศาสตราจารย์จำนงรักษ์ อุดมเศรษฐ์	ที่ปรึกษา
๔.	รองศาสตราจารย์พัฒนา สุขประเสริฐ	ที่ปรึกษา
๕.	รองศาสตราจารย์ทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ	ที่ปรึกษา
๖.	รองศาสตราจารย์สิริพันธุ์ จุลกรังคะ	ที่ปรึกษา
๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ เลิศศิริ	ที่ปรึกษา
๘.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ	ที่ปรึกษา
๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขจีจรัส ภิรมย์ธรรมศิริ	ที่ปรึกษา
๑๐.	นางสาวศรันยา เผือกผ่อง	ที่ปรึกษา
๑๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพร เรียบร้อย คิม	ประธานกรรมการ
๑๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้องนุช ศิริวงศ์	รองประธานกรรมการ
๑๓.	นางสาวนริศรา อินทะสิริ	รองประธานกรรมการ
๑๔.	รองศาสตราจารย์พิชัย ทองดีเลิศ	กรรมการ
๑๕.	รองศาสตราจารย์สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ	กรรมการ
๑๖.	รองศาสตราจารย์พัชราวดี ศรีบุญเรือง	กรรมการ
๑๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนามาศ ตรีวรรณกุล	กรรมการ
๑๘.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพัตรา ศรีสุวรรณ	กรรมการ
๑๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธานินทร์ คงศิลา	กรรมการ
๒๐.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชลาธร จูเจริญ	กรรมการ
๒๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมตตา เร่งขวนขวาย	กรรมการ
๒๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปพิชญา จินตพิทักษ์สกุล	กรรมการ
๒๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์	กรรมการ

๒๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจิตตา เรืองรัศมี	กรรมการ
๒๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำพร แจ่มผล	กรรมการ
๒๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานต์สุดา วันจันทึก	กรรมการ
๒๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร	กรรมการ
๒๘.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งทิพย์ ลุยเลา	กรรมการ
๒๙.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชุติมา ชวลิตมณเฑียร	กรรมการ
๓๐.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลภา แต้มทอง	กรรมการ
๓๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีรานุช เลิศวัฒนารักษ์	กรรมการ
๓๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต	กรรมการ
๓๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทิพวรรณ ดวงปัญญา	กรรมการ
๓๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฤทัย เรืองธรรมสิงห์	กรรมการ
๓๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวิตรี พังงา	กรรมการ
๓๖.	นายปรีดา สามงามยา	กรรมการ
๓๗.	นางสาวนิโลบล วงศ์ภัทรนันท์	กรรมการ
๓๘.	นางทิพากร ม่วงถึก	กรรมการ
๓๙.	นางกรกฎ แพทย์หลักฟ้า	กรรมการ
๔๐.	นายวิภูษณะ ศุภนคร	กรรมการ
๔๑.	นางสาววสพร นิชรัตน์	กรรมการ
๔๒.	นางสุขกมล ปัญญาจันทร์	กรรมการ
๔๓.	นางศรัญญา ศรีโยธิน	กรรมการ
๔๔.	นางสาวพิมพ์อร สุขแล้ว	กรรมการ
๔๕.	นางสาวทิวาพร มณีรัตนศุภร	กรรมการและเลขานุการ
๔๖.	นางภิญญาพัชญ์ โทนหงส์ษา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๗.	นางสาวจุฬาลักษณ์ บุตรฟองดา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๘.	นายศตพล ศิริบำรุงชาติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๙.	นางสาวสุภิญญา ขาวผ่อง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๐.	นางสาวมณินทร เดชแห้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๑.	นางสาวกรรณิกา พุ่มสาหร่าย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๒.	นายภูคิษฐ์คมณ์ แสงตรีเพชรกล้า	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๓.	นางสาวสวรรณา แย้มวันเพ็ง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๔.	นายสหภาพ ศรีโท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๕.	นางสาวเจนจุฑา บุญยานุสิทธิ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๖.	นายเสถียร แสงแถวทิม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐. กรรมการหมวดวิชาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

๑๐.๑ สาขาวิทยาศาสตร์

๑.	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒.	ศาสตราจารย์อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต	ประธานกรรมการ

๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐสมน เพชรแสง	รองประธานกรรมการ
๔.	รองศาสตราจารย์ปกรณ์ วรรธนะอมร	กรรมการ
๕.	รองศาสตราจารย์โชติกา หยกทองวัฒนา	กรรมการ
๖.	รองศาสตราจารย์อัญชณี คูเบอร่า	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์ศิริกาญจนา ทองมี	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์มีนา เลา	กรรมการ
๙.	รองศาสตราจารย์วชิรญาณ์ ธงอาสา	กรรมการ
๑๐.	รองศาสตราจารย์พงศ์เทพ ประจงทัศน์	กรรมการ
๑๑.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์แคทลียา ดาวสุด	กรรมการ
๑๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานิตย์ จิตรภักดี	กรรมการ
๑๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลัดดา แต่งวัฒนานุกูล	กรรมการ
๑๔.	นางสาวจุรีภรณ์ เชื้อดวงผุย	กรรมการ
๑๕.	นางสาวจรัสวัน วารกานนท์	กรรมการ
๑๖.	นางสาวสุนทรี คุ้มไพโรจน์	กรรมการ
๑๗.	นายรัฐพันธ์ ตรงวิวัฒน์	กรรมการ
๑๘.	นางสาวพรทิพย์ บุญมหามงคล	กรรมการและเลขานุการ
๑๙.	นายสาธิต ประเสริฐมานะกิจ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๐.	นายวรพงศ์ สิงห์ชาติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๑.	นางสาวแพรวไพลิน กังวานสุระ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๒.	นางสาวภัสรา นวะบุศย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๓.	นางสาวจิระประภา ขันสุข	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๔.	นางสาววริศษา นรินทร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕.	นางสาวกัลยาณี เศลาอนันต์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๒ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

๑.	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒.	คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	ที่ปรึกษา
๓.	ศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ	ประธานกรรมการ
๔.	รองศาสตราจารย์นวลวรรณ ทวยเจริญ	รองประธานกรรมการ
๕.	ศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช	กรรมการ
๖.	รองศาสตราจารย์กฤษณะ ไวยมัย	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์วรดร วัฒนพานิช	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ	กรรมการ
๙.	รองศาสตราจารย์อรทัย จงประทีป	กรรมการ
๑๐.	รองศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์	กรรมการ
๑๑.	รองศาสตราจารย์จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน	กรรมการ
๑๒.	รองศาสตราจารย์ชินธันย์ อารีประเสริฐ	กรรมการ
๑๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตร์ทัศน์ ฝักเจริญผล	กรรมการ

๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิตางศุ์ พิลัยหล้า	กรรมการ
๑๕. นายพสิษฐ์ สืบสุวงศ์	กรรมการ
๑๖. นางสาวสุทัตตา พาหุมันโต	กรรมการและเลขานุการ
๑๗. นางสาวขวัญกมล บุญโปร่ง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๘. นางสาวพัชรียา บุบผาชาติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๓ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

๑. รองศาสตราจารย์อุลัยวรรณ์ วิทยเกียรติ	ประธานกรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์ประกิต สุขใย	รองประธานกรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์สุดสาย ตรีวานิช	กรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์นันทวัน เทอดไทย	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์ธนโชติ บุญวรโชติ	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชราภรณ์	กรรมการ
๑๐. นางสาวฐิติพร แก้วเพ็ชร	กรรมการ
๑๑. นางสาวพรรณภัทร พรหมเพ็ญ	กรรมการ
๑๒. นางสาวกฤษณา ตรีศีลวัฒนกุล	กรรมการ
๑๓. นางสาวฐิตาภรณ์ ตัมพานุวัตร	กรรมการ
๑๔. นางสาวศิริพร ตันจอ	กรรมการ
๑๕. นางสาวสุพนิดา วินิจฉัย	กรรมการ
๑๖. นางสาวจารุพร รักใหม่	กรรมการ
๑๗. รองศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์	กรรมการและเลขานุการ
๑๘. นางดวงสมร นามกระโทก	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๙. นางสาวอัญชนา ชมภูแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๔ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ	ที่ปรึกษา
๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กอบศักดิ์ วันธงไชย	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรอนงค์ ผิวนิล	ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร	รองประธานกรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์ฐิติมา รุ่งรัตนาอุบล	กรรมการ
๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาสิณี วรชนะนันท์	กรรมการ
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิศร์ ปัทมพิฑูร	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพวรรณ เสมวิมล	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรพงษ์ วาระรัมย์	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาพิศ ดิลกสัมพันธ์	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิวัฒน์ หาญวงศ์จิรวัฒน์	กรรมการ

๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วาทินี สวนผกา	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขรรค์ชัย ประสานัย	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พฤทธิ์ ราชรักษ์	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรงรอง ดวงใจ	กรรมการ
๑๗. นายสุธี จรรยาสุทธิวงศ์	กรรมการ
๑๘. นายปวีร์ คล่องเวสสะ	กรรมการ
๑๙. นางสาวแอน กำภู ณ อยุธยา	กรรมการ
๒๐. นายภาคภูมิ ชูมณี	กรรมการ
๒๑. นางสาวมณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม	กรรมการ
๒๒. นางสาวอุษารดี ภู่มาลี	กรรมการ
๒๓. นางสาววีนัส ต่วนเครือ	กรรมการ
๒๔. นายฉัตรพรรษ พงษ์เจริญ	กรรมการ
๒๕. นายณัฐวัฒน์ คลังทรัพย์	กรรมการ
๒๖. นางสาวละอองดาว เถาว์พิมาย	กรรมการ
๒๗. นางวราภรณ์ ลำใย	กรรมการ
๒๘. นางสาวจินตลา กลิ่นหวล	กรรมการ
๒๙. นางสาวศิรภัสสร ชมเชย	กรรมการ
๓๐. นางณิชชา ประจันตะเสน	กรรมการและเลขานุการ
๓๑. นางสาวเสาวลักษณ์ บัวจันทร์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๒. นางสาวสุภาภรณ์ แซ่ลิ้ม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๓. นางสาวมธุรา นิ่มทิม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๑. กรรมการหมวดวิชาการมนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศึกษาศาสตร์

๑๑.๑ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ

๑. คณบดีคณะบริหารธุรกิจ	ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พลวัฒน์ เลิศกุลวัฒน์	ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาภรณ์ อธิปัญญากุล	รองประธานกรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์วุฒิไกร งามศิริจิตต์	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์วิจิตต์ศรี สงวนวงศ์	กรรมการ
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ คูวัฒนเธียรชัย	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรัญพงศ์ บุญศิริธรรมชัย	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธงชัย ศรีวรรธนะ	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชิดตะวัน ชนะกุล	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นนทร์ วรพาณิชช์	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นภสม สินเพิ่มสุขสกุล	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุชุก ด้วงบุตรศรี	กรรมการ

๑๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิมพ์พร โสววัฒนกุล	กรรมการ
๑๕.	หม่อมหลวงกุณฑลรัตน์ ทวีวงศ์	กรรมการ
๑๖.	นางสาวณิธิชา ธรรมธนากุล	กรรมการ
๑๗.	นางสาวณัฏฐณิชา ฉายรัศมี	กรรมการ
๑๘.	นางกนกอร สีมานนท์	กรรมการ
๑๙.	นางสาวกรรณิกา มิตรปล้อง	กรรมการ
๒๐.	นางสาวปรารถนา ประสงค์สิน	กรรมการและเลขานุการ
๒๑.	นายภคพงศ์ พวงศรี	กรรมการและเลขานุการ
๒๒.	นางสาวธัญลักษณ์ เพ็งพินิจ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๓.	นายฉัตรชัย พ่วงพลับ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๔.	นายทองปาน ขันตีกรม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕.	นางสาวอรการณ์ วีระชยาภรณ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๖.	นางสาวอารีย์ สีแสงมุข	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๗.	นางสาวภีรตา รัตนสิงหกุล	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๘.	นางสาวรัตติยา สาระโท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๙.	นางขวัญเมือง สุจริต	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๐.	นางเบญจมาศ แย้มพลอย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๑.	นางสาวรุจาภา แว่นแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๒.	นางสาวสมพิศ ทิมเทศ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๓.	นางสาวจินตนา บุญสุวรรณ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๔.	นางสาววรรณนิภา ชาวนา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๕.	นายสมชาย ตามบุญ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๖.	นายสัญชัย ทองขาว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๗.	นางสาวเพชรรัตน์ พลาชัย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๘.	นางสาวธัญลักษณ์ เกษแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๙.	นายสุทธิศักดิ์ อินทร์พงษ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๐.	นางสาวธิติพันธ์ ละอองเทพ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๑.	นางสาวพรสุดา แตงจาด	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๒.	นายปิติศักดิ์ อุปสุข	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๓.	นางสาวกชกร พิศเพ็ง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๔.	นางสาวณัฐวดี รูปสงค์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๕.	นางสาวชฎารัตน์ เรืองวงษ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๑.๒ สาขาศึกษาศาสตร์

๑.	รองศาสตราจารย์ปัทมาวดี เล่ห์มงคล	ที่ปรึกษา
๒.	รองศาสตราจารย์ชานนท์ จันทรา	ที่ปรึกษา
๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อวยพร ตั้งธงชัย	ที่ปรึกษา
๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิกุล เอกวรางกูร	ประธานกรรมการ

๕. รองศาสตราจารย์วรรณดี สุทธินรากร รองประธานกรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์ชาตรี ฝ่ายคำตา รองประธานกรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์พงศ์ประพันธ์ พงษ์โสภณ กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์ศศิเทพ ปิติพรเทพิน กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์ปัฐมาภรณ์ พิมพ์ทอง กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์ชลาธิป สมาหิโต กรรมการ
๑๑. รองศาสตราจารย์สูติเทพ ศิริพิพัฒนกุล กรรมการ
๑๒. รองศาสตราจารย์จีระวรรณ เกษสิงห์ กรรมการ
๑๓. รองศาสตราจารย์จิตตินันท์ บุญสถิรกุล กรรมการ
๑๔. รองศาสตราจารย์อังคณา ขันตรีจิตรานนท์ กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐิกา เพ็งลี กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงชัย อักษรคิด กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ เอื้องโชคชัย กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี ลัภนโชคดี กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์ กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนนันท์ ธนารัชตะภูมิ กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุษณี ลลิตผสาน กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิกร สุมาลี กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุดมลักษม์ กูลศรีโรจน์ กรรมการ
๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัตสาตรี ดิถียนต์ กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันดี เกษมสุขพิพัฒน์ กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มีชัย ออสุวรรณ กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูเบศร์ นภัทรพิทยาธร กรรมการ
๒๘. นางสาวสรียา โชติธรรม กรรมการ
๒๙. นางสาวสุวรรณา ปรมาพจน์ กรรมการและเลขานุการ
๓๐. นายณรงค์ศักดิ์ หวังรัตนปราณี กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๑. นายธีระภัณฑ์ ศิริสุวรรณ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๑.๓ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

๑. คณบดีคณะสังคมศาสตร์ ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะมนุษยศาสตร์ ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์กังสดาล เชาว์วัฒนกุล ประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์นัทธนัย ประสานนาม รองประธานกรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมขวัญ สิงห์วี รองประธานกรรมการ
๖. นางสาวอภิชา ชุติพงศ์พิสิฏฐ์ รองประธานกรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์จตุวิทย์ แก้วสุวรรณ์ กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวีณ์ บุนนาค กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพลิน กิตติเสรีชัย กรรมการ

๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พูนศักดิ์ ไม้โภคทรัพย์	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เปรมฤดี เพ็ชรกูล	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาณิภา สุขสม	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พณิตา กุลสิริสวัสดิ์	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิภาดา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกวลิน ศีลพิพัฒน์	กรรมการ
๑๖. นางสาวเอื้ออนุช ถนอมวงษ์	กรรมการ
๑๗. นางสาวพรทิพย์ ลิ้มพหะพันธ์	กรรมการ
๑๘. นางสาวมนัธญา นิลพันธุ์	กรรมการ
๑๙. นางสาวพรพรรณ เหมะพันธุ์	กรรมการ
๒๐. นางสาวพรรณรัตน์ ดิษฐ์เจริญ	กรรมการ
๒๑. นางสาวธีรพร ชื่นพี	กรรมการ
๒๒. นายชัยรัตน์ วงศ์กิจรุ่งเรือง	กรรมการ
๒๓. นางสาวสุชาดา สกลกิจรุ่งเรือง	กรรมการ
๒๔. นายเอกลักษณ์ ไชยภูมี	กรรมการ
๒๕. นางสาวนิภาพร อินคะเณย์	กรรมการ
๒๖. นางสาวอำไพพงษ์ ทวีธัญลักษณ์	กรรมการ
๒๗. นางสาวปิยะรัตน์ คล้ายแย้ม	กรรมการ
๒๘. นายสรศักดิ์ มงคลสมบูรณ์	กรรมการ
๒๙. นายภานุพงศ์ ปิยาพันธ์	กรรมการ
๓๐. นายสุรพันธ์ แสนเลิศ	กรรมการ
๓๑. นายธวัชพงศ์ หาเรือนโภค	กรรมการ
๓๒. นางสาวพรณ์ปวี สามปรุ	กรรมการ
๓๓. นางสาววิภาวี เจริญธรรมสุขใจ	กรรมการ
๓๔. นางสาวอัญชนา ต่อมแสง	กรรมการ
๓๕. นางสาวเกวริน ยุทธโกศา	กรรมการ
๓๖. นายวรรณโชค เทียนคำ	กรรมการ
๓๗. นายชิษณุพงศ์ ตันบัวคลี่	กรรมการ
๓๘. นางสาวจริยา สุพรรณ	กรรมการ
๓๙. นางสาวดารารัตน์ ชิ้มพัฒนวงษ์	กรรมการ
๔๐. นางสาวนันทนุช อุดมละมุล	กรรมการ
๔๑. นางสาวผาณิตา ชัยดิเรก	กรรมการ
๔๒. นางสาวสายทิพย์ เหล่าทองมีสกุล	กรรมการและเลขานุการ
๔๓. นางสาวพิทชญา สารภิรมย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๔. นางสาววิศนี พ่วงประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๕. นางสาวแก้วตา ต่อมแสง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๖. นางสาวรสิตา กลางประพันธ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๗. นางสาวศรีวรรณ บุญประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ จัดการเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ กำหนดหน้าที่รับผิดชอบและแนวทางการคัดเลือกผลงานที่นำมาเสนอ ประสานงานกับคณะกรรมการหมวดวิชาการ และรับนโยบายจากคณะกรรมการอำนวยการ มาปฏิบัติให้บรรลุตามวัตถุประสงค์

คณะกรรมการฝ่ายบริหารจัดการประชุมทางวิชาการ

๑.	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์	ที่ปรึกษา
๒.	ผู้อำนวยการสำนักบริหารการศึกษา	ที่ปรึกษา
๓.	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานกรรมการ
๔.	ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์	ประธานกรรมการร่วม
๕.	ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมและฝึกอบรม	ประธานกรรมการร่วม
๖.	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร	รองประธานกรรมการ
๗.	ประธานฝ่ายเลขานุการ (นางอัจฉราวรรณ คล้องช้าง)	กรรมการ
๘.	ประธานฝ่ายสารสนเทศ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์)	กรรมการ
๙.	ประธานฝ่ายสถานที่ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์)	กรรมการ
๑๐.	ประธานฝ่ายประชาสัมพันธ์ (นางผกามาศ ธนพัฒนพงศ์)	กรรมการ
๑๑.	ประธานฝ่ายโสตทัศนูปกรณ์ (นายวิเชียร คดพิมพ์)	กรรมการ
๑๒.	ประธานฝ่ายจัดการจราจรและรักษาความปลอดภัย (นายตั๋น นิลมาติ)	กรรมการ
๑๓.	ประธานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ (รักษาการแทนรองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย)	กรรมการ
๑๔.	ประธานฝ่ายการเงิน (ผู้อำนวยการกองคลัง)	กรรมการ
๑๕.	ประธานร่วมฝ่ายการเงิน (นางสาววรรณวิมล ราชอุปนันท์)	กรรมการ
๑๖.	ประธานฝ่ายประเมินผล (ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) (นางสาวสุพรรณนิจ พลเสน)	กรรมการ
๑๗.	ประธานฝ่ายพิธีการ (นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร)	กรรมการ

๑๘. ประธานฝ่ายวิเทศสัมพันธ์ (นางสาวกฤตยา เพชรผึ้ง)	กรรมการ
๑๙. ประธานฝ่ายจัดการฐานข้อมูล (ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด)	กรรมการ
๒๐. นายปฏิภักดิ์ ปัญญาพูนตระกูล	กรรมการและเลขานุการ
๒๑. นายพลากร คำแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๒. นายอนุชิต วรปัญญา	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๓. นางสาวชนิกานต์ ศักดาพิทักษ์	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๔. นายชโนดม ชูมก	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕. นายกิตติศักดิ์ แสงอรุณ	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๖. นางสาวสุภิดา เช้ากระจ่าง	ผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ประสานงาน ดำเนินการ และอำนวยความสะดวกการจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๑ เพื่อให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงและเป็นไปด้วยความเรียบร้อย โดยประธานแต่ละฝ่ายนั้นสามารถพิจารณาคัดเลือก และแต่งตั้งกรรมการภายในฝ่ายได้เอง หากต้องการจัดทำเป็นคำสั่งเพิ่มเติมให้แต่งตั้งโดยส่วนงานในสังกัด

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไปโดยมีวาระ ๑ ปี

ประกาศ ณ วันที่ ๓๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๕

(นายจงรัก วัชรินทร์รัตน์)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประกาศสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง แต่งตั้งคณะทำงานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๑ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๑ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุตามวัตถุประสงค์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงให้แต่งตั้งคณะทำงานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ ดังรายนามต่อไปนี้

๑. ผู้รักษาการแทนรองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานคณะทำงาน
๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรัณย์ธร ศศิธนากรแก้ว	คณะทำงาน
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตตินาถ เรขาลิลิต	คณะทำงาน
๔. นางสาวทักษยา วัชรสารทรัพย์	คณะทำงาน
๕. นายภานนท์ คุ้มสุภา	คณะทำงาน
๖. นางสาวทิสยา ทิศเสถียร	คณะทำงาน
๗. นางสาวรติกร สมิตไมตรี	คณะทำงาน
๘. นางสาววนิดา รัตตมณี	คณะทำงาน
๙. นายวิทวัส ยุทธโกศา	คณะทำงาน
๑๐. นายวิโรตม์ เอี๊ยะตะกูล	คณะทำงาน
๑๑. นายสิงห์อำพล จันทร์วิเศษ	คณะทำงาน
๑๒. นางสาวมณฑา ปานทิม	คณะทำงาน
๑๓. นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร	คณะทำงานและเลขานุการ
๑๔. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๕. นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์	คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะทำงานชุดนี้ มีหน้าที่ ดำเนินการผลิตสื่อวิชาการ อาทิ สื่อประชาสัมพันธ์งานประชุมวิชาการ สื่อข้อกำหนดต่างๆ จัดทำกำหนดการ หนังสือสูจิบัตร หนังสือรวบรวมบทคัดย่อ (Book of Abstracts) หนังสือตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็ม (E-Proceedings) การประสานงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ รวมไปถึงการผลิตสื่อมัลติมีเดียและการถ่ายทอดสดงานประชุม โดยประสานงานกับฝ่ายวิชาการและฝ่ายต่างๆ ให้ดำเนินงานไปด้วยความเรียบร้อยและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๑๔ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๖๕

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภา มหากาญจนกุล)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญา

เป็นสถาบันที่มีปณิธานมุ่งมั่นในการสั่งสมเสาะแสวงหา และพัฒนาความรู้
ให้เกิดความเจริญงอกงามทางภูมิปัญญาที่เพียบพร้อมด้วย
วิชาการ จริยธรรม และคุณธรรม ตลอดจนเป็นผู้ชี้นำทิศทางสืบทอด
เจตนารมณ์ที่ดีของสังคมเพื่อความคงอยู่ ความเจริญ
และความเป็นอารยะของชาติ

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ร่วมกับ
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
กระทรวงศึกษาธิการ
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม
สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ
เครือข่ายวิจัยประชาชื่น

ฝ่ายเลขานุการคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 61
สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

kuannualconf@gmail.com
http://annualconference.ku.ac.th http://www.rdi.ku.ac.th