



“เกษตรศาสตร์วิถีถัดไป พลิกวิกฤติสู่ความยั่งยืน”

“Next Normal KASETSART: Turning Crisis into Sustainability”

Proceedings No. 2

SCIENCE TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT

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



เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
The Proceedings of the 60th Kasetsart University Annual Conference
21-23 กุมภาพันธ์ 2565 (February 21-23, 2022)

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)

การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60

The Proceedings of the 60th Kasetsart University Annual Conference

วันที่ 21-23 กุมภาพันธ์ 2565 (February 21-23, 2022)

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ครั้งที่ 1 เดือน เมษายน 2565

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์เป็นของ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0-2579-5548

ISBN (e-book) (ชุด): 978-616-278-689-1



เครือข่ายวิจัยประชาชน
Prochacchen Research Network

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60
ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
และการได้ตีพิมพ์ลงในเอกสารบทความย่อ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: kuannualconf@gmail.com

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

<http://www.rdi.ku.ac.th>

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้จัดการประชุมวิชาการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกปี โดยร่วมกับ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และเครือข่ายวิจัยประชาชน จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60 ระหว่างวันที่ 21-23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ภายใต้ Theme “เกษตรศาสตร์วิถี ถัดไป พลิกวิกฤติสู่ความยั่งยืน” (Next Normal KASETSART : Turning Crisis into Sustainability) เพื่อมุ่งส่งเสริมให้นักวิชาการและคณาจารย์จากสาขาต่างๆ นำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ และความชำนาญ ระหว่างนักวิชาการ คณาจารย์ของภาครัฐและภาคเอกชน ซึ่งจะนำไปสู่ความร่วมมือทางการวิจัยและยังเปิดโอกาสให้นิสิต นักศึกษา ได้แสดงผลงานทางวิชาการ โดยความรู้และวิทยาการใหม่ๆ ดังกล่าว ยังได้ถ่ายทอด เผยแพร่สู่สาธารณชน อันจะนำมาซึ่งความกินดี อยู่ดี และการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

การนำเสนอผลงานวิชาการประกอบด้วยภาคบรรยายจำนวน 142 เรื่อง และภาคโปสเตอร์จำนวน 79 เรื่อง รวม 221 เรื่อง แบ่งออกเป็น 12 สาขา ได้แก่ สาขาพืช สาขาสัตว์ สาขาสัตวแพทยศาสตร์ สาขาประมง สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สาขาศึกษาศาสตร์ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ โดยได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็มใน E-Proceedings จำนวน 177 เรื่อง

เอกสารฉบับนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยเรื่องเต็ม ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ เล่มที่ 2 ประกอบด้วย สาขาวิทยาศาสตร์ จำนวน 21 เรื่อง สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ จำนวน 29 เรื่อง สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จำนวน 20 เรื่อง และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำนวน 10 เรื่อง ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60 ขอขอบคุณ คณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิต นักศึกษา ที่ได้ร่วมนำเสนอผลงานวิจัย และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



(ดร. จงรัก วาชรินทร์รัตน์)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประธานคณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60

สารบัญ

สาขาวิทยาศาสตร์ (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	วท.3/O22	การจำลองการลดทอนอนุภาคนิวตรอนและสมบัติการต้านทานการสึกหรอ/ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับปรุงผิวของสารตัวเติม ธิดิสรณ์ เอนกวัฒน์มนตรี, เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง, ดลฤดี ไตเย็น, เอกชัย วิมลมาลา	2
2	วท.19/O89	อิทธิพลของวิธีการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยต่อสมบัติในการป้องกันรังสีแกมมา นภเกตน์ สมชื้อ, พวงทิพย์ แก้วทับทิม, สมัญญา สงวนพรรค	9
3	วท.27/O161	การหาปริมาณสารสกัดหมึกปากกาและวัสดุภาคเคลือบที่ ที่เหมาะสมสำหรับเทคนิครังสีเอกซ์และการวิเคราะห์ด้วย ภาพถ่าย พัชรภรณ์ จรุงเสมอ, ภาณุพล ไชยชนะโทก, อาภาภรณ์ สุกุลการะเวก	18
4	วท.11/O55	การบริหารจัดการการประชุมรัฐสภาไทย เหนือฝัน พิมพ์วงศ์, พบสิทธิ์ กมลเวชช	26

สาขาวิทยาศาสตร์ (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	วท.6/P97	Hydrothermal synthesis of zinc oxide nanoparticles under different reaction times and zinc sources Khemmanich Khamenkit, Suthee Wattanasiriwech, Chuleeporn Thanomsilp, Darunee Wattanasiriweach	39

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
2	วท.15/P58	Extraction of the metal from used zinc-carbon primary batteries Prakornkit Taphat, Supak Pattaweepaiboon, Weekit Sirisaksoontorn	48
3	วท.9/P40	Enhanced cytoplasmic Polyhydroxybutyrate (PHB) granule production by recombinant <i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803 overexpressing PhaP protein Authen Promariya, Chanchanok Duangsri, Nat-Anong Mudtham, Khomson Satchasataporn, Supochana Charoensin, Suchanit Ngamkala, Nattaphong Akrimajirachote, Wuttinun Raksajit	56
4	วท.21/P96	การหาเงื่อนไขการทำความเย็นที่เหมาะสมของเทอร์โมอิเล็กทริก ด้วยการจำลองการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมเพื่อการประยุกต์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บวัคซีน วนัสนันท์ งามทรัพย์มณี, อภาภรณ์ สกุลภาวะเวก, ภาณุพล ไชลอนกระโทก	64
5	วท.4/P23	การออกแบบและสร้างตัวแปลงสัญญาณแรงบิดมาตรฐานอ้างอิง 1 นิวตันเมตร โชคชัย วาดทอง, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ	73
6	วท.5/P24	ประสิทธิภาพของตัวเข้ารหัสแบบหมุนเพื่อการเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็ก วศิน ชมโฉม, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ	79
7	วท.2/P6	ผลของอุณหภูมิและค่า pH ต่อการสกัดและสมบัติของเพกทินจากเปลือกโกโก้ รวิษฎา ผลสิน, กิติพงษ์ อัครสกุล	85
8	วท.17/P61	ผลของการอบแห้งต่อปริมาณไฮยาโนตีนในมันสำปะหลังพิมพ์ัก ทวีวงษ์, จิรารัตน์ อนันตกุล	92
9	วท.25/P69	การผลิตรวมกันของไฟโคอีริทริน เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ และกรดไขมัน จาก <i>Porphyridium cruentum</i> ภายใต้ความเข้มแสงที่แตกต่างกัน กันยต์นัย ทรัพย์อุดมมาก, สุรียัน ธิญูกิจจานุกิจ, จันทนา ไพบูรณ์	101

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
10	วท.24/P68	การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึงด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง อภิษฐา บุหงารัตน์, ธนภูมิ มณีบุญ, ประภัสสร รักถาวร, เกสรี่ กลิ่นสุคนธ์, ลลิตา คชารัตน์, สุริสา สากยโรจน์, อุดมลักษณ์ สุขอัสตะ	110
11	วท.16/P59	การสกัดเปลือกมังคุดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับตัวทำละลาย: ปริมาณแอลฟา-แมงโกสทินและฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย วิมลรัตน์ อินศวรร, นันทิยา หาญศุภลักษณ์, ทิพย์รัตน์ ซาหอมชื่น	118
12	วท.10/P41	การศึกษาการต้านออกซิเดชันของนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลาที่เตรียมด้วยเทคนิค ultrasonication ชนิกานต์ ชูสิทธิ์, อุบลรัตน์ สิริภัทรารวรรณ	127
13	วท.7/P29	ผลของการเสริมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติกในอาหารต่อการเจริญเติบโตและระบบภูมิคุ้มกันของปลากัดไทย วลัยพร เจริญทรัพย์ศรี, จันทร์ประภา อิมจงใจรัก, ปิติ อ่ำพ่ายพ	135
14	วท.8/P32	องค์ประกอบของกรดไขมันและการแสดงออกของยีน methyl-end desaturases ในโคฟีพอด <i>Apocyclops royi</i> ศุภกานต์ สังข์แก้ว, วลัยพร เจริญทรัพย์ศรี, ปิติ อ่ำพ่ายพ, จันทร์ประภา อิมจงใจรัก	143
15	วท.14/P52	เปรียบเทียบฤทธิ์ในการฆ่าแบคทีเรีย <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC9027 ด้วยพลาสมาชนิดไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จและเครื่องกำเนิดไอออนประจุลบ ต้นติกร เหล่าสุข, นฤสรณ์ แน่นหนา, บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง, ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์, ธนาภัทร ปาลกะ	151

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
16	วท.23/P66	การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติและการแสดงออกของ crustacean hyperglycemic hormone (CHH)-like peptide ในโคฟีพอด <i>Apocyclops royi</i> พัชรี โยควิบูล, วลัยพร เจริญทรัพย์ศรี, ปวีณา ตปนียวรวงศ์, ปาริชาติ ชุมทอง, ประรณนา ปานทอง, ปิติ อ่ำพ่ายพ์	157
17	วท.26/P72	ปริมาณผลผลิตและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดคอลลาเจนจากกระดูกจระเข้พันธุ์ไทย (<i>Crocodylus siamensis</i>) กัญญารัตน์ ไชคตระกุล, จินดาวรรณ สิริันทวิเนติ, สูดาวรรณ เขยชมศรี, วิน เขยชมศรี	165

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	สท.วศ.14/O69	ประสิทธิภาพของปล่องรังสีอาทิตย์ร่วมกับเครื่องทำความชื้นแบบอัลตราโซนิกส์เพื่อลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน สุปรียา ผ่องใส, ธนา อนันต์อาชา	173
2	สท.วศ.15/O70	ประสิทธิภาพของตู้เสื้อผ้าบิวทอินระบายอากาศ จอร์จ เคตารี, ธนา อนันต์อาชา	181
3	สท.วศ.27/O109	การพัฒนาหน้าต่างบานฝาไหลลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารพักอาศัย กฤษฎิ์ ปัดลี, ธนา อนันต์อาชา	189
4	สท.วศ.11/O53	การประเมินความเป็นไปได้ในการนำแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนจากรถยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่เป็นระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาในประเทศไทย นิติชัย เหลืองอร่าม, กุสกานา กุบาฮา, รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ	196
5	สท.วศ.17/O74	ออกแบบโปรแกรมแบบจับต้องสำหรับหุ่นยนต์แขนกลชนิด 6 แกนด้วยรหัสแท่งแบบ 2 มิติชนิด Apriltag วัชรินทร์ ขาวบุบผา, ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว	205

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
6	สท.วศ.36/O169	แบบจำลองการพยากรณ์ต้นทุนของโครงการอาคารเขียว โดยพิจารณาการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น ภายใต้สถานการณ์ โควิด-19 <u>กรรณิการ์ บรรจงรักษา, ฌนิตา รุ่งแจ้ง, พงษ์ศักดิ์ สุริยวนากุล</u>	213
7	สท.วศ.37/O170	การประยุกต์ใช้กล้อง 360 องศาควบคุมงานก่อสร้าง ในสถานการณ์โควิด-19 <u>ชนันพัฒน์ อินทร, มานพ แก้วโมราเจริญ</u>	222
8	สท.วศ.26/O103	การพัฒนาแบบจำลองอ้างอิงความแข็งแรงสำหรับทำนากำลังของ คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย พอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา <u>ทวิภัทร หอเหมรัตน์, ธิดาร์ตัน จิระวัฒนาสมกุล,</u> <u>สุเชษฐ ธิขิตเลอสรวง</u>	229
9	สท.วศ.35/O166	การเสริมกำลังจุดต่อเสา-คานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยใช้ระบบ แผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัตรอบภายหลัง <u>สรายุทธ สำราญบึงแก, อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ,</u> <u>ทงศักดิ์ อิมใจ</u>	238
10	สท.วศ.6/O29	การศึกษาลักษณะเฉพาะของสถานีบริการรถยนต์ร่วม ในกรุงเทพมหานคร <u>สโรช บุญศิริพันธ์, กฤติน กังวาลกุลกิจ</u>	247
11	สท.วศ.8/O33	การประเมินความเสี่ยงในงานก่อสร้างโดยประยุกต์เทคโนโลยี อากาศยานไร้คนขับ: กรณีศึกษางานก่อสร้างอาคารสูง <u>วรพัชร จอมทีร์ักษ์, อนุเภา อบแพทย์</u>	256
12	สท.วศ.18/O76	การประเมินความเสี่ยงและแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้สำหรับ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลังคาลาดเอียง <u>อารีญา หมัดสุสัน, อนุเภา อบแพทย์</u>	264
13	สท.วศ.10/O52	การวิเคราะห์แบบจำลองการอพยพ และการจัดการเหตุฉุกเฉิน กรณีเกิดเหตุฉุกเฉินภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทย <u>พัจนา ศิลป์สโมสร, อนุเภา อบแพทย์</u>	272

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
14	สธ.วศ.13/O67	การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์การก่อสร้างอาคาร: กรณีศึกษา งานก่อสร้างอาคารในพื้นที่กรุงเทพมหานครในการควบคุมของ กรมโยธาธิการและผังเมือง <u>นิตินัย พระไชยบุญ, วชิรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ</u>	280
15	สธ.วศ.3/O17	การศึกษาการใช้เก้าอี้พาล์มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ของดินซีเมนต์สำหรับวัสดุงานทาง <u>ตมฤณ ศรีนังคะมาลี, ก่อโชค จันทรวงกูร, วีระเกษตร สนวนผกา</u>	287
16	สธ.วศ.4/O26	การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเดือยเสริมในรูกลอง ของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบแรงเหวี่ยง <u>ชำนาญ น้อยพิทักษ์, สนธยา ทองอรุณศรี, วันดี พูนพจน์มาศ</u>	295
17	สธ.วศ.12/O60	อิทธิพลของระดับความเค็มแบบกระทำซ้ำที่มีผลต่อพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของดินเหนียวเคโอลิน <u>ปริตตา ศุภโกวิทย์, พงษ์พิพัฒน์ อานันทนสกุล</u>	303
18	สธ.วศ.24/O90	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จของการอนุญาต วางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่ กรุงเทพมหานคร ของการประสานครหลวง <u>วิจิตรา ไสมสูงเนิน, วีระเกษตร สนวนผกา</u>	312
19	สธ.วศ.25/O96	การนำวัสดุเหลือทิ้งจำพวกกระเบื้องเซรามิคมาผสมกับหินคลุก เพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง <u>กฤต อินทรกุล, ก่อโชค จันทรวงกูร, วีระเกษตร สนวนผกา</u>	320
20	สธ.วศ.1/O10	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในโรงควบคุม คุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร <u>วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์, พรรณทิวา จิตรชวาล, สุชีลา พลเรือง</u>	329
21	สธ.วศ.2/O11	การศึกษาปริมาณ รูปร่าง และขนาด ไมโครพลาสติกใน โรงควบคุมคุณภาพน้ำกรุงเทพมหานคร <u>สุชีลา พลเรือง, อารยา คงขวัญเมือง, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์</u>	338

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
22	สท.วศ.7/O31	การศึกษาชนิดปริมาณและลักษณะของขยะทะเลบริเวณ เกาะสีชังประเทศไทย วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์, กฤษฎา สุริศรี, สุชีลา พลเรือง	346
23	สท.วศ.21/O81	การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการกวนผสม ในบ่อแอน็อกซิกของระบบบำบัดน้ำเสีย โรงงานชำแหละ และแปรรูปสุกร ศตวรรษ เพชรล่อ, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ	353
24	สท.วศ.23/O88	การเสื่อมสภาพของพลาสติก LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene) ภายใต้การจำลองสภาวะการทดสอบแบบแห้ง สุชีลา พลเรือง, อัญชิสมา สมประสงค์, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์	361
25	สท.วศ.9/O36	การศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปขยะเศษอาหารเป็น ก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ ศูนย์บริการและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรประจำตำบล บางม่วง จังหวัดนนทบุรี สุชุมาล เมฆิน, ซาติ เจียมไชยศรี	369
26	สท.วศ.5/O27	การพัฒนาโปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิต เครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารด้วยโปรแกรมแอปชีท อัญชิสมา ประมวลเจริญกิจ, ณัฐพร ณ เชียงใหม่	377
27	สท.วศ.20/O80	การศึกษาและปรับปรุงระบบระบายอากาศในห้องพันทราย ศิริสิทธิ์ แก้วม่วง, ชนินทร์ ตรงจิตภักดี	385
28	สท.วศ.30/O127	การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด ความหนาบางของบรรจุภัณฑ์แก้วในกระบวนการขึ้นรูป สรวุฒิ กุลบุตร, ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, สุวิภรณ์ วิชกุล	396
29	สท.วศ.28/O114	ผลของสารไดคิมิวเปอร์ออกไซด์และสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุลที่ มีต่อสมบัติเชิงกลและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทอเรพทาเลต สารวิษุทธิ์ สุขวัฒนจัญญ, วีระศักดิ์ หมากผิน, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ	405

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	อก.22/O92	รูปแบบการบริโภคหวานและความตระหนักในสื่อออนไลน์ การลดบริโภคหวาน พัชรินทร์ คมเดช, อภิชาญา ลีลาวณิชกุล	414
2	อก.9/O32	ผลของกระบวนการไฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงต่อคุณภาพ ทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าว ผสมน้ำมะม่วง วิชุดา สุมาลัย, วรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ	422

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	อก.2/P7	Chemical properties and inhibitory effect on nitric oxide production of five mushroom extracts in RAW264.7 macrophages Kwanchanok Hunthayung, Sassy Bhawamai	431
2	อก.4/P14	ผลของโปรตีนจากถั่วเหลืองและเห็ดนางฟ้าต่อคุณภาพมีทบอลจากเห็ด ฐิตินันท์ โรจน์เพ็ญเพียร, กมลวรรณ แจ่มชัด, อนุวัตร แจ่มชัด	439
3	อก.5/P19	ผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อคุณภาพด้านเคมีและกายภาพของเค้กกล้วยหอม ปรียา รักษาเจริญ, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, นันทวัน เทอดไทย	447
4	อก.6/P25	ผลของคาร์ราจีแนนและระยะเวลาการอบแห้งต่อคุณภาพบางประการของกัมมีเยลลี่ วรพรต สอนคร้ามดี, เบญจมาศ จิรคชาพร, เทพกัญญา หาญศิ่วัด	455
5	อก.7/P27	การสำรวจตลาดผลิตภัณฑ์บะหมี่และการสำรวจความต้องการของผู้บริโภคสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่ ปภาวี บำรุงพงษ์, ทานตะวัน พิทักษ์	461

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
6	อก.10/P33	การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพรด้วยวิธีอบแห้งฟนฝอยโดยใช้มอลโตเดกซ์ทรินและกัมอาราบิก ณพวรรณ ทองพิมพ์ใหญ่, วรรณิ จิรภาคย์กุล	469
7	อก.13/P35	การพัฒนาวัสดุปลูกธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร ชลิดา ตาน้อย, หทัยรัตน์ ริมศรี, อุศมา สุนทรนฤงษ์	477
8	อก.15/P36	ผลของการเตรียมมะเขือเทศต่อคุณภาพเหี่ยวระ่มะเขือเทศและแนวทางการใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ศศิภรณ์ อ้นสืบสาย, เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล	484
9	อก.16/P34	Effects of compost obtained from food waste recycling system on lettuce's growth (<i>Lactuca sativa</i> var. <i>Crispa</i> L.) <u>Aunkamol Kumngan</u> , Usmana Meehae, Pattamavadee Kunwadee, Siwapong Leunram, Noodchanath Kongchouy, Jutarut lewkittayakorn	491
10	อก.17/P47	Effect of drying temperature on physical and chemical properties of duckweed (<i>Wolffia globosa</i>) <u>Phattharaphum Inta</u> , Saowanee Lertworasirikul	499
11	อก.19/P51	การย่อยจีวรผ้าฝ้ายจากแก่นขนุนด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ พชรพล ศิริสุนทร, คริสตา ผลคิมหันต์, จุฑามาศ มุ่ยแดง, ปวีณ์สุดา ขุนนุ้ย, ขนิษฐา วัชรภรณ์	506
12	อก.20/P53	การตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายโดยการเคลือบสารเซลลูโลส-ไททานเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้มีความแข็ง และคงรูปสำหรับการผลิตกระเป๋า ธีร์จุฑา อินทรสว, ขนิษฐา วัชรภรณ์	513
13	อก.21/P60	Effect of different pretreatments on drying characteristics, color and chlorophyll contents of duckweeds (<i>Wolffia globosa</i>) <u>Orayanee Pannuan</u> , Saowanee Lertworasirikul	519

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
14	อก.25/P95	การพัฒนาชุดสำหรับสุนัขที่มีภาวะผิดปกติที่ผิวหนัง ตวงรัตน์ บุญคำภา, ศุภสิริวีร์ เจิมประไพ, พรรณภักดิ์ พรหมเพ็ญ, ปวริน ตันตริยานนท์	525
15	อก.26/P73	ศักยภาพของอนุภาคนาโนซึ่งค็อกออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วย เทคโนโลยีสีเขียวจากเปลือกถั่วลิสงในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุของ การเน่าเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว สุริสา สากยโรจน์, ประภัสสร รักถาวร, อุดมลักษณ์ สุขอัสตะ, เกสรี่ กลิ่นสุคนธ์, ลลิตา ศุขรัตน์, ณัฐภรณ์ เปรมสันเทียะ, ทิพาพร ทองคำ	532
16	อก.27/P74	Influence of pH, autolysis time and temperature on meaty volatile compounds formation of yeast autolysate Songpun Surasieng, Wanee Jirapakkul, Sumallika Morakul	540
17	อก.28/P75	Dietary to acrylamide exposure from instant noodles to Thai population Arati Kokabthong, Kanithaporn Vangnai	548
18	อก.29/P78	Impact of high amylose starch on non-additive behaviors of starch-blend pastes Ployfon Boonkor, Namfone Lumdubwong	556

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	ทส.2/O21	Preparation biofertilizer precursor from waste latex sludge digestion with sulfuric acid Praewpan Chantarapong, Wirach Taweepreda	565
2	ทส.4/O34	การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ และคุณภาพน้ำประปาจากระบบประปาหมู่บ้าน กรณีศึกษา จังหวัดสิงห์บุรี พิชญานิน จันทรีใบเล็ก, จีมา ศรีลัมพ์	571

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
3	ทส.1/O8	การพัฒนาและทดสอบแนวคิดของการบำบัดน้ำปนเปื้อนไนเตรตด้วยวิธีอิเล็กโตรไลซิส อุทัยภัทร บัวงาม, นันทกาญจน์ มุรคิต, พิศาล สุขวิสูตร	580
4	ทส.3/O23	อิทธิพลของเวลาและปริมาณ Materials Institute Lavoisier-88A (MIL-88A) ในการบำบัดซีโอไซด์จากน้ำมัน หล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟ้นต้นแบบอากาศประยุกต์ ขวัญฤดี สุวรรณสังข์, วรพจน์ กนกกันทพงษ์, สุเมธ วงศ์เขียว	588
5	ทส.5/O24	การประเมินผลผลิตไม้ยืนต้นเพื่อเป็นหลักประกันทางธุรกิจ: กรณีศึกษาไม้สักในสวนป่าเกริงกระเวีย จังหวัดกาญจนบุรี อดิگانต์ บุรณะจันทร์, กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ, ปัสสิ ประสมสินธ์	596
6	ทส.18/O137	การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการปรากฏปัจจัยคุกคาม บริเวณ อุทยานแห่งชาติทับลาน ป่าเหนือ ชีวะธรรม, วรงค์ สุขเสวต, ปานวิศิษฐ์ ปานศรี, อิงอร ไชยยศ, ประทีป ดั่งวงแค	604
7	ทส.6/O56	การประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ของปัจจัยคุกคามในอุทยาน แห่งชาติเขาใหญ่ วัฒน์ โรจนเกษตร, วรงค์ สุขเสวต, ปานวิศิษฐ์ ปานศรี, อิงอร ไชยยศ, ประทีป ดั่งวงแค	612
8	ทส.9/O117	ความมากมายและช่วงเวลาการทำกิจกรรมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วย นม ด้วยการติดกล้องดักถ่ายภาพบริเวณจัดการทุ่งหญ้า ในอุทยานแห่งชาติทับลาน ภาคภูมิ อร่ามศิริวิจิเวทย์, วรงค์ สุขเสวต, อิงอร ไชยยศ, ประทีป ดั่งวงแค	618

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	ทส.5/P38	การกำจัดสารปฏิชีวนะออกซีเตตราไซคลินโดยสารสกัดหยาบจากเชื้อ <i>Xylaria sp.</i> ที่ตรึงในแคลเซียมแอลจีเนต <u>ปิยาภรณ์ สมสมัคร</u> , ชาญวิช อมาตยกุล, เกศรัตน์ คำเสนาะ, กัญชิกา นนทามิตร, ชนกันันท์ ก้องสมุทร, ประไพพิศ ชัยรัตน์มโนกร	627
2	ทส.7/P43	การใช้ตะกรันเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไอโซเนซันเพื่อบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสีย <u>ฉัญญกันต์ รัตนวรรณ</u> , ชลอ จารุสุทธิรักษ์	635

สาขาวิทยาศาสตร์
(Subject: Science)

ภาคบรรยาย
(Oral Presentation)

การจำลองการลดทอนอนุภาคนิวตรอนและสมบัติการต้านทานการสึกหรอ/ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการปรับปรุงผิวของสารตัวเติม

Simulation of neutron attenuation and wear resistance/hardness properties of Gd₂O₃/UHMWPE composites with surface treatment of the filler

ธิติสรณ์ เอนกรัตน์มนตรี^{a,*}, เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง^a, ดลฤดี โตเย็น^b, เอกชัย วิมลมาลา^c

Thitisorn Anekratmontre^{a,*}, Kiadtisak Saenboonruang^a, Donruedee Toyen^b, Ekachai Wimolmala^c

^aภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^cกลุ่มวิจัย P-PROF คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

^aDepartment of Applied Radiation and isotopes, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bScientific Equipment and Research Division, Kasetsart University Research and Development Institute, Bangkok 10900, Thailand

^cPolymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thitisorn.an@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติการลดทอนอนุภาคนิวตรอน โดยการจำลองความสามารถในการลดทอนความเข้มของอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (Ultrahigh molecular weight polyethylene; UHMWPE) ที่มีการเติมสารตัวเติมแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gadolinium oxide; Gd₂O₃) ในอัตราส่วน 0–50% wt ด้วยโปรแกรม NGCal ผลจากการจำลองพบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นและเชิงมวล (μ และ μ_m) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติม Gd₂O₃ นอกจากนี้ งานวิจัยได้มีการศึกษาผลของการปรับปรุงผิวสารตัวเติม Gd₂O₃ ด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลนชนิด KBE-903 ที่ปริมาณ 5% wt 10% wt และ 20% wt ที่มีต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอและความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ ผลการวิจัยพบว่าการปรับปรุงผิวของสารตัวเติม Gd₂O₃ ที่ปริมาณ 20% wt ทำให้วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดีและมีความแข็งของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับบรรจุสารกัมมันตรังสีที่มีประสิทธิภาพสูงได้

คำสำคัญ: การต้านทานการสึกหรอ, วัสดุเชิงประกอบ, สมบัติการลดทอนอนุภาคนิวตรอน, สารคู่ควบไซเลน, สารตัวเติม

Abstract

This work aimed to investigate neutron shielding properties of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) with the addition of 0–50%wt Gd₂O₃ through the simulation using NGCal. The results showed that both linear and mass attenuation coefficient (μ and μ_m) of the UHMWPE composites were increased with increasing Gd₂O₃ contents. This work also determined effects of surface modification of Gd₂O₃ on wear resistance and hardness properties of the composites. The surface modification of Gd₂O₃ was carried out using a silane coupling agent, namely KBE903, with varying contents of 5% wt, 10% wt, and 20% wt. The results indicated that Gd₂O₃/UHMWPE composites with 20% wt of a silane coupling agent exhibited the highest wear resistance, with slightly increases in hardness properties. In summary, the outcomes from this work could be applied for the development of highly effective transporting casks for the containment of radioactive materials.

Keywords: Composites, Filler, Neutron attenuation, Silane coupling agent, Wear resistance

คำนำ

ในปัจจุบัน มีการนำรังสีโดยเฉพาะอนุภาคนิวตรอนมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น การรักษาผู้ป่วยโรคมะเร็งด้วยเทคนิค Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) เป็นต้น ทั้งนี้อนุภาคนิวตรอนจัดเป็นรังสีประเภทก่อกอไอออน ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์ในสิ่งมีชีวิตต่างๆ ได้ (Toyen et al., 2019) ดังนั้น เพื่อป้องกันอันตรายจากการได้รับรังสีหรืออนุภาคนิวตรอนในปริมาณที่สูงเกินกำหนด ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีต้องปฏิบัติตามหลักความปลอดภัยทางรังสีที่เรียกว่า “As Low As Reasonably Achievable” หรือ “ALARA” ซึ่งประกอบด้วยหลักการสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ (1) การควบคุมระยะเวลา (2) การควบคุมระยะห่างระหว่างปฏิบัติงาน และ (3) การใช้อุปกรณ์กำบังรังสีที่มีความเหมาะสม (นวลฉวี, 2004) ทั้งนี้ในส่วนของวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนนั้น วัสดุกำบังควรมีองค์ประกอบของธาตุไฮโดรเจนในปริมาณที่สูง เนื่องจากอะตอมของธาตุไฮโดรเจน มีความสามารถในการลดทอนพลังงานของอนุภาคนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) ได้อย่างรวดเร็วด้วยอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) ทั้งนี้วัสดุพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE) โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนโมเลกุลสูงพิเศษ (Ultra-high-molecular-weight-polyethylene หรือ UHMWPE) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์เป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน เนื่องจาก UHMWPE ประกอบด้วยอะตอมของธาตุไฮโดรเจนในปริมาณที่สูง อีกทั้งมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ที่ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่น (สุรศักดิ์, 2556) ยกตัวอย่างเช่น มีความทนทานต่อการสึกหรอ การกระแทก การเสียดสี และการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี เป็นต้น อย่างไรก็ตามอนุภาคนิวตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ UHMWPE ออกมาได้ นั้น ยังสามารถเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้เข้ารับบริการได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุ UHMWPE จึงมีการเติมสารตัวเติมที่มีความสามารถในการจับอนุภาคนิวตรอนที่สูง ยกตัวอย่างเช่น แกโดลิเนียมออกไซด์ (Gadolinium oxide; Gd_2O_3) ลงในวัสดุ UHMWPE ทั้งนี้เนื่องจากแกโดลิเนียม (Gd) มีความสามารถในการจับเทอร์มัลนิวตรอนหรือมีค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron absorption cross section) สูงถึง 48860×10^{-24} ตารางเซนติเมตร (48860 barns) ส่งผลทำให้สามารถลดจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่ผ่านวัสดุกำบังรังสีออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังเห็นได้จากงานวิจัยของ Tiamduangtawan et al. (2020) ซึ่งได้ทำการศึกษามวลของการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) ที่มีต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน พบว่าวัสดุพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ใส่สารตัวเติม มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ) เพียง 0.05/cm ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 10.5% wt มีค่า μ เท่ากับ 1.91/cm (เพิ่มขึ้น 38 เท่า)

อย่างไรก็ตาม การเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีในวัสดุเชิงประกอบในปริมาณมาก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุมีค่าลดลง (Toyen et al., 2019) ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์และสารตัวเติมส่วนใหญ่มีการเกาะกลุ่มกันเอง จึงไม่สามารถยึดเกาะกันด้วยพันธะทางเคมี ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้ากันได้ของสารตัวเติมและวัสดุพอลิเมอร์ จึงควรมีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ซึ่งจะสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุได้ ดังเห็นได้จากงานวิจัยของ Arslan and Dogan (2019) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบ Basalt fiber (BF)/Poly (butylene terephthalate) ทั้งที่มีและไม่มีสารปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติม BF ด้วยสารคู่ควบไซเลน ชนิด 3-aminopropyltriethoxysilane พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติม ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าวัสดุที่ไม่มีสารปรับปรุงพื้นผิวสารตัวเติม

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการลดทอนอนุภาคนิวตรอนโดยการจำลองผลการลดทอนอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของ Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0–50% wt ด้วยโปรแกรม NGCal (Saenboonruang et al., 2021) ทั้งนี้ การจำลองการลดทอนอนุภาคนิวตรอนดังกล่าว ทำการศึกษาสมบัติการลดทอนอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอนและอนุภาคนิวตรอนเร็วของวัสดุเชิงประกอบ โดยการพิจารณา

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ) และค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) ของวัสดุ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้มีการศึกษาผลของการปรับปรุงผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด 3-Aminopropyltriethoxysilane (KBE903) ที่ปริมาณ 5% wt 10% wt และ 20% wt ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE เพื่อหาปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ส่วนประกอบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Chemical names and their contents, roles, and producers for the fabrication of Gd_2O_3 /UHMWPE composites

Chemical	Content (% wt)	Role	Producer
UHMWPE	75	Matrix	PTT Public Co., Ltd, Thailand
Gd_2O_3	25	Radiation protecting filler	Richest Group Shanghai, China
Paraffinic oil	10% wt of UHMWPE	Processing aids	Facobis Co., Ltd., Thailand
Silane coupling agent	5, 10, 20 of Gd_2O_3	Silane coupling agent	KISCO(T) Ltd., Thailand

การปรับปรุงผิวสารตัวเติม Gd_2O_3

นำสารคู่ควบไซเลน ชนิด KBE903 ผสมกับสารละลายเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99% และน้ำกลั่นในอัตราส่วน 20:72:8 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารตัวเติม Gd_2O_3 เดิมลงในสารละลายเอทานอล และทำการกวนผสม เวลา 30 นาที ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที และทำการกวนผสมต่อเนื่องในอ่างน้ำ (Water bath) ที่อุณหภูมิ 90°C เวลา 60 นาที จากนั้นอบสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80°C ด้วยตู้อบลมร้อน เพื่อระเหยสารละลายเอทานอลออกจากสารตัวเติม Gd_2O_3 โดยใช้เวลา 3 ชั่วโมง

การผสมและขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

จากส่วนประกอบและสารเคมี ดังแสดงใน Table 1 นำสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวผสมกับสารช่วยในการผสมชนิดน้ำมันพาราฟินที่ปริมาณ 10% wt ของ UHMWPE (Toyen et al., 2019) และผง UHMWPE ด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High speed mixer) รุ่น LMXS จากบริษัท Lab tech engineering จำกัด ประเทศไทย จากนั้นนำผง UHMWPE ที่มีสารตัวเติม Gd_2O_3 ผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น CTW 1000 C จากบริษัท Haake Rheomix จำกัด ประเทศเยอรมนี โดยใช้อุณหภูมิในการผสมจาก Feed zone ถึง Die zone ดังนี้คือ 170°C 175°C 180°C และ 185°C ตามลำดับ ความเร็วในการหมุนสกรูที่ 40 รอบต่อนาที จากนั้นนำสารที่ผ่านการผสมแช่ในสารละลายเฮกเซน (n-Hexane) เวลา 24 ชั่วโมง เพื่อขจัดน้ำมันพาราฟินออกจากสารผสม และอบในตู้อบลมร้อน รุ่น GT-7017-L จากบริษัท GOTECH Testing Machine ประเทศไทยได้หวั่น อุณหภูมิ 80°C เพื่อขจัดความชื้นและสารละลายเฮกเซนส่วนที่เหลือออก เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบวัสดุเชิงประกอบในแม่พิมพ์ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot compression molding) รุ่น LP-20M LMXS จากบริษัท Lab tech engineering จำกัด ประเทศไทย อุณหภูมิ 185°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 15 MPa เวลา 14 นาที

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE

นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของสารตัวเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3900 ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ความต่างศักย์เท่ากับ 10 kV

การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE

ทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ด้วยการตรวจสอบอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ด้วยเทคนิค Pin on disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-95 ในสภาวะแบบแห้ง โดยใช้ลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร กดลงบนชิ้นงานตัวอย่างด้วยน้ำหนักคงที่ 5 นิวตัน โดยลูกบอลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที ระยะทาง 1000 เมตร โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง ทั้งนี้สามารถคำนวณพื้นที่และอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ ตาม Equation 1

$$\text{wear rate} = \frac{\text{wear volume loss}}{\text{sliding distance} \times \text{applied load}} \quad (1)$$

โดยที่	wear rate	คือ อัตราการสึกหรอ (mm ³ /Nm)
	wear volume loss	คือ ปริมาตรที่วัสดุสูญเสียไป (mm ³)
	sliding distance	คือ ระยะทางที่ลูกกลิ้งลื่นไถลบนพื้นผิววัสดุ (m)
	applied load	คือ แรงกดลูกกลิ้ง (N)

การทดสอบความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE

นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ทดสอบความแข็งที่ผิวของวัสดุ (Hardness (Shore D)) ด้วยเครื่องวัดความแข็งดูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness Tester) รุ่น GS-719G จากบริษัท Teclock ประเทศญี่ปุ่น โดยทดสอบการวัดแรงต้านของวัสดุต่อแท่งกดด้วยแรงกด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง

การจำลองสมบัติการก้ำกับนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ด้วยโปรแกรม NGCal

การจำลองและศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงมวล (μ_m) สัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงเส้น (μ) และค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) เพื่อศึกษาความสามารถในการก้ำกับนุภาคนิวตรอนและอนุภาคนิวตรอนเร็วที่ 2 ช่วงพลังงาน ได้แก่ 0.025 eV และ 4 MeV ตามลำดับ ด้วยโปรแกรม NGCal โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd₂O₃ ตั้งแต่ 0–50% wt (Saenboonruang et al., 2021) ทั้งนี้ ค่า μ , μ_m และ HVL สามารถคำนวณได้จาก Equations 3–5

$$I = I_0 e^{-x} \quad (3)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

$$\text{HVL} = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (5)$$

โดยที่	I_0	คือความเข้มเริ่มต้นของอนุภาคนิวตรอน
	I	คือความเข้มของอนุภาคนิวตรอนหลังวัสดุก้ำกักรังสี
	x	คือความหนาของชิ้นงาน
	ρ	คือความหนาแน่นของวัสดุ

การกระเจิงของนิวตรอนแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงมีการชนแบบยืดหยุ่นกับสสารที่มีเลขเชิงอะตอมต่ำ ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน (Diffraction) จากนิวตรอนที่กระเจิงออกมาจากลำของนิวตรอนที่ตกกระทบกับวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ โดยการกระเจิงแบบนี้ไม่เมตัมรวมและพลังงานรวมไม่มีการสูญเสีย โดยที่อนุภาคนิวตรอนสามารถถ่ายเทพลังงานให้กับนิวเคลียสของสสาร ทำให้พลังงานของอนุภาคนิวตรอนลดลง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการจำลองการลดทอนอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$

ผลการจำลองสมบัติการลดทอนอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ได้แก่ μ_m , μ และ HVL ดังแสดงใน Fig. 1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุ UHMWPE ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ มีความสามารถในการลดทอนความเข้มของอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอนได้สูงขึ้น สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่า μ_m และ μ และการลดลงของค่า HVL เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม Gd_2O_3 ทั้งนี้เนื่องจาก Gd ในสารตัวเติม Gd_2O_3 มีค่าภาคตัดขวางที่สูงมากถึง 48860 barns ส่งผลทำให้วัสดุสามารถเกิดอันตรกิริยาแบบจับกับอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอน ได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ มีความสามารถในการลดทอนความเข้มของอนุภาคนิวตรอนเร็วที่ลดลง ดังเห็นได้จากการลดลงของค่า μ_m และ μ หรือการเพิ่มขึ้นของค่า HVL เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม Gd_2O_3 ทั้งนี้เนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุที่มีธาตุไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นกับอนุภาคนิวตรอนเร็วได้ดีกว่า Gd_2O_3 ที่มีขนาดและมวลที่สูงกว่าไฮโดรเจน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุ UHMWPE ส่งผลทำให้ปริมาณของธาตุไฮโดรเจนและความสามารถในการลดทอนความเข้มของอนุภาคนิวตรอนเร็วโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ มีค่าลดลง (Saenboonruang et al., 2021)

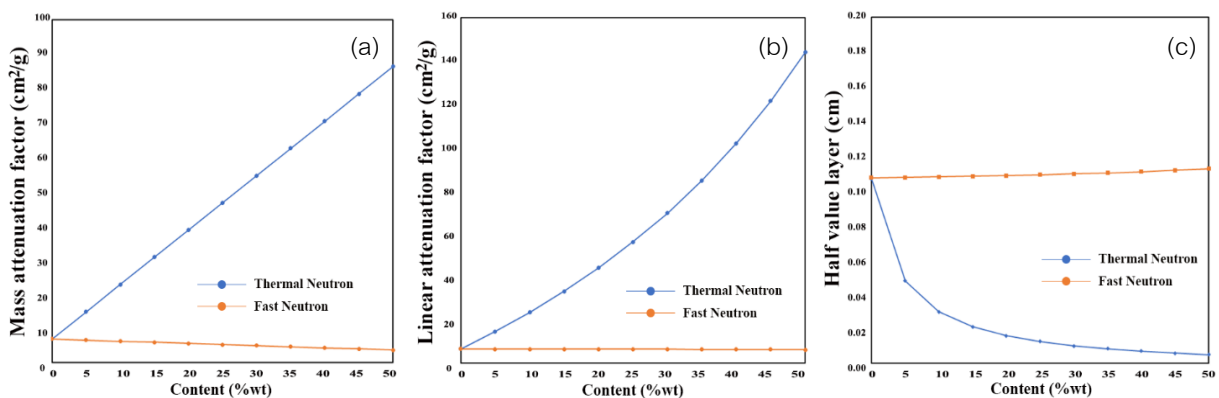


Fig. 1 Simulated results of (a) μ_m , (b) μ , and (c) HVL for $Gd_2O_3/UHMWPE$ composites with varying Gd_2O_3 contents of 0–50% wt

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$

ผลการศึกษาอัตราการสึกหรอ (Wear rate) และค่าความแข็งที่ผิว (Hardness (Shore D)) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ โดยมีการเลือกใช้ปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 25% wt เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบจะทำให้วัสดุหลักมีสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง จึงเลือกปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ปริมาณมากที่สุดอยู่ที่ 25%wt เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ โดยมีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5% wt, 10% wt และ 20% wt ดังแสดงใน Table 3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลน ส่งผลให้อัตราการสึกหรอมีค่าลดลง (ต้านทานการสึกหรอได้มากขึ้น) ในขณะที่ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลน ที่ปริมาณ 20% wt มีค่าอัตราการสึกหรอน้อยที่สุดและมีค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน สามารถลดการจับกลุ่มกันเองของสารตัวเติม โดยสามารถสังเกตได้จากการกระจายตัวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุหลัก UHMWPE ที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงใน Fig. 2 โดยสามารถเห็นได้ว่า Fig. 2(c) ซึ่งมีการใช้สารคู่ควบไซเลนปริมาณ 20%wt สารตัวเติม Gd_2O_3 มีการกระจายตัวได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ Fig. 2(a) และ 2(b) ที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 5 และ 10% wt ตามลำดับ จึงส่งผลทำให้วัสดุ UHMWPE และสารตัวเติม Gd_2O_3 สามารถยึดจับกันด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง จนทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงโดยรวมเพิ่มขึ้น

Table 3 Wear rates and hardness (Shore D) of $Gd_2O_3/UHMWPE$ composites prepared using different silane coupling agent contents of 5% wt, 10% wt, and 20% wt

Silane coupling agent content (% wt)	Wear rate (mm^3/Nm)	Hardness (Shore D)
5	6.847±0.922	64±1
10	3.820±0.344	65±1
20	0.332±0.044	66±1

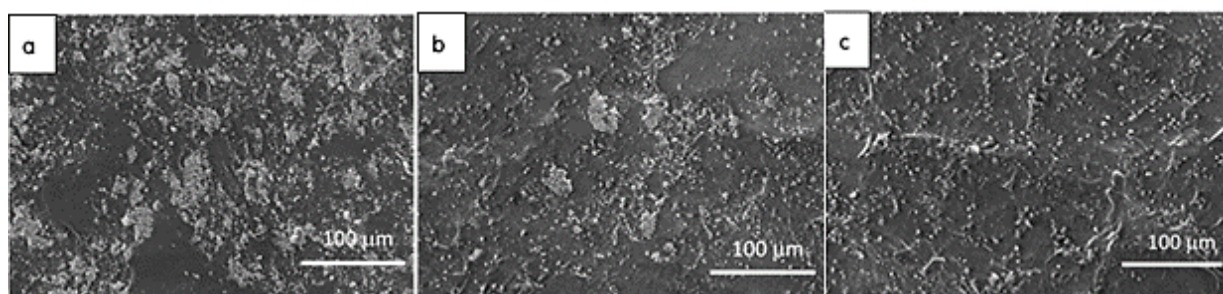


Fig. 2 Morphological images of $Gd_2O_3/UHMWPE$ composites prepared using (a) 5% wt, (b) 10% wt, and (c) 20% wt of a silane coupling agent (KBE903)

สรุปผลการทดลอง

1. การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE มีแนวโน้มทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่า μ_m และ μ_m ของอนุภาคเทอร์มินัลนิวตรอนเพิ่มขึ้น และค่า HVL ของอนุภาคเทอร์มินัลนิวตรอนมีค่าลดลง

2. การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE มีแนวโน้มทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่า μ และ μ_m ของอนุภาคนิวตรอนเร็วลดลง และค่า HVL ของอนุภาคนิวตรอนเร็วมีค่าลดลง
3. การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมไฮดรอกซีอะลาไนด์ลง 20% wt มีความสามารถในการต้านทานต่อการสึกกร่อนและความแข็งแรงของผิวเพิ่มขึ้น โดยปริมาณของสารตัวเติมไฮดรอกซีอะลาไนด์ 20% wt มีความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนและความแข็งแรงที่ดี

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และขอขอบคุณภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. 2547. พลังงานนิวเคลียร์เพื่อมนุษยชาติ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สุรศักดิ์ มะธิโตปะนำ, ศิริชัย ต่อสกุล, สุรรัตน์ วรรณศรี. 2556. การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกกร่อนของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion the influence of forming variable on wear resistance property of UHMWPE in ram extrusion process. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- Arslan, C., Dogan, M. 2019. The mechanical and thermal properties of chopped basalt fiber-reinforced poly (Butylene terephthalate) composites: Effect of fiber amount and length. J. Compos. Mater. 53: 002199831983077. doi.org/10.1177/0021998319830775
- Saenboonruang, K., Poltabtim, W., Thumwong, A., Pianpanit, T., Rattanapongs, C. 2021. Rare-earth oxides as alternative high-energy photon protective fillers in HDPE composites: Theoretical aspects. Polymers 13(12): 1930. doi.org/10.3390/polym13121930
- Tiamduangtawan, P., Wimolmala, E., Meesat, R., Saenboonruang, K. 2019. Effect of Sm_2O_3 and Gd_2O_3 in poly (Vinyl alcohol) hydrogels for potential use as self-healing thermal neutron shielding materials. Radiat. Phys. Chem. 172(30): 108818. doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108818
- Toyen, D., Wimolmala, E., Sombatsompop, N., Teerasak Markpin, T., Saenboonruang, K. 2019. Sm_2O_3 /UHMWPE Composites for radiation shielding applications: Mechanical and dielectric properties under gamma irradiation and thermal neutron shielding. Radiat. Phys. Chem. 164: 108366. doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108366

อิทธิพลของวิธีการขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย ต่อสมบัติในการป้องกันรังสีแกมมา**Influence of fly ash-based geopolymer forming method on gamma radiation shielding properties****นภเกตน สมชี้อ^{a,*}, พวงทิพย์ แก้วทับทิม^b, สมัญญา สงวนพรรค^c****Napakeat Somchue^{a,*}, Pungtip Keawtubtim^b, Samunya Sanguanpak^c**^aนักศึกษาระดับปริญญาโท, สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 94000^bสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี 94000^cศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120^aGraduated Student, Faculty of science and technology, Prince of Songkhla University, Songkhla 94000, Thailand^bApplied Physics, Faculty of science and technology, Prince of Songkhla University, Pattani 94000, Thailand^cNational Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author. Email address: Napakeat26@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของวิธีการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ (แบบอัด และ แบบหล่อ) จากเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าในจังหวัดสงขลา เพื่อใช้เป็นวัสดุในการป้องกันรังสีแกมมา โดยทดลองขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ด้วยวิธีการอัดและวิธีการหล่อ จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติในการป้องกันรังสีแกมมา (ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น และค่าความหนาครึ่งค่า) ของจีโอพอลิเมอร์ จากผลการทดลอง พบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดให้ค่ากำลังอัด และให้ค่าในการป้องกันรังสีมากกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ โดยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการแบบอัดสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นอยู่ในช่วง 1.3498–1.3662/cm และค่าความหนาครึ่งค่าอยู่ในช่วง 0.5134–0.5073 cm นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด ยังสามารถให้ค่าการป้องกันรังสีแกมมาได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์, ซีเมนต์เพสต์, เถ้าลอย**Abstract**

This research is to study the influence of geopolymer forming methods (press and cast) from fly ash from power plants in Songkhla Province. To be used as a material to shield gamma rays by experimenting with forming the geopolymer by compression and casting method then compare the physical properties and gamma radiation protection properties. From the experimental results, it was found that the geopolymer formed by the compression method gave compressive strength and provides a greater radiation protection value than cast-molded geopolymers. Compression method was able to provide a linear gamma attenuation coefficient in the range is 1.349–1.366/cm and half-thickness values are in the range is 0.513–0.507 cm. In addition, the Compression method better protection against gamma radiation than extruded cement.

Keywords: Cement paste, Fly Ash, Geopolymer

คำนำ

ปัจจุบันวัสดุซีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มการนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงทนทาน สามารถรับกำลังแรงอัดได้ คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ (อาปีเต็ง และคณะ, 2556) อย่างไรก็ตามการพัฒนาวัสดุซีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุป้องกันรังสียังพบได้น้อย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์วัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยด้วยวิธีการอัดและการหล่อ (Prasanphan et al., 2019) เพื่อใช้เป็นวัสดุในป้องกันรังสีแกมมา โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ (ได้แก่ ค่าความหนาแน่น, ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ และค่ากำลังอัด) และคุณสมบัติในการป้องกันรังสีแกมมา (ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น และค่าความหนาแน่น) ของวัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่ได้กับซีเมนต์เพสต์ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันรังสีแกมมา ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์หรือการใส่ตะกั่ว (Buchwald et al., 2011)

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าจังหวัดสงขลา โดยตัวอย่างเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีดำ และมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ SiO_2 และ Al_2O_3 ดังแสดงรายละเอียดใน Table 1

Table 1 Chemical composition of fly ash and ordinary portland cement (Zhiyuan et al., 2019)

Chemical composition	Concentration (%)	
	Fly ash	Cement
SiO_2	22.679	19.9
Al_2O_3	3.445	4.6
CaO	23.183	63.7
SO_3	10.279	2.70
K_2O	13.057	0.690
Fe_2O_3	1.794	2.57

สูตรผสมในการทดลองด้วยวิธีการอัดและวิธีการหล่อ

Table 2 Cement-paste and formulation by forming with a compression method and casting method

Forming	Cement-Paste		Geopolymer	
	Cement	Water	Fly-ash	Na ₂ SiO ₃ : NaOH 3:2
Compression method	100	40	100	40
Casting method	100	95	100	95

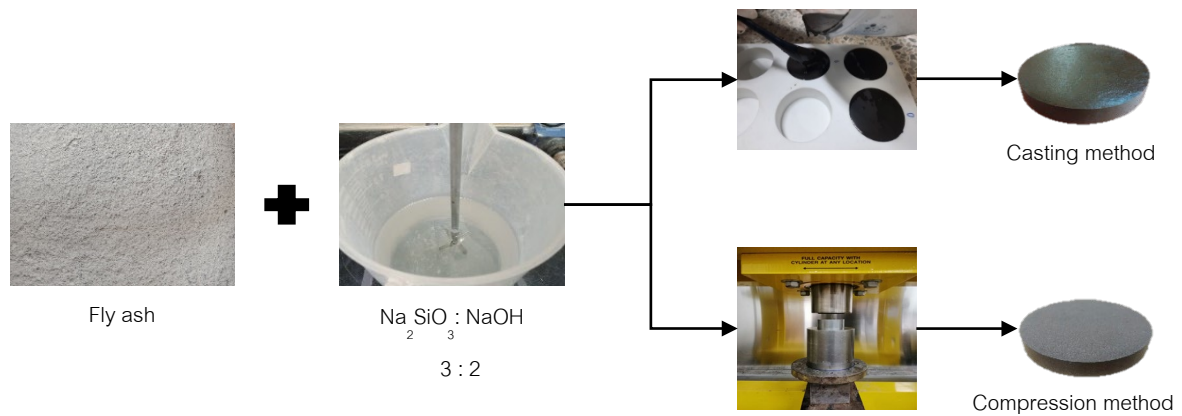


Fig. 1 Fly ash-based geopolymer formulation by forming with a compression method and casting method

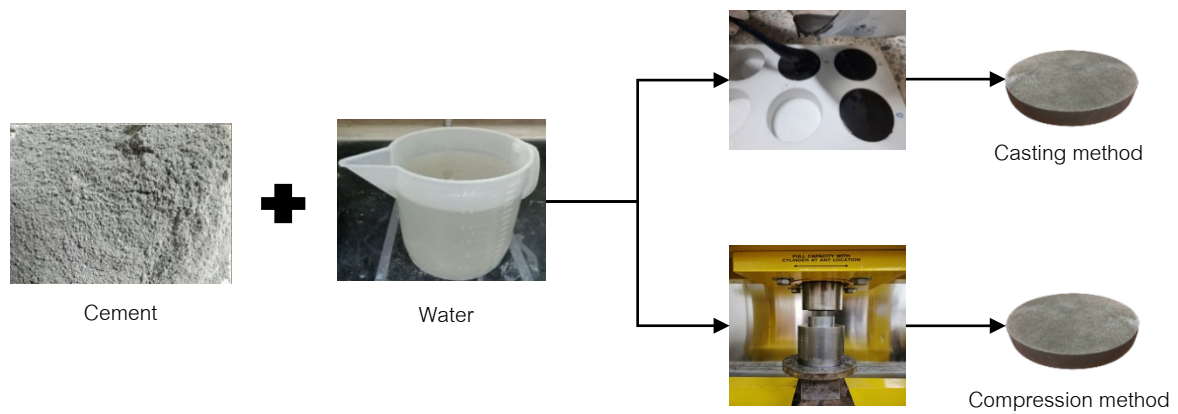


Fig. 2 Cement by forming with a compression method and casting method

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ด้วยการขึ้นรูปแบบวิธีการอัด และวิธีการหล่อ

การทดสอบกำลังอัด

ทำการขึ้นรูปโดยวิธีการแบบอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก และทำการขึ้นรูปโดยวิธีการแบบหล่อ เทตัวอย่างลงในแม่พิมพ์ จากนั้นปิดผิวหน้าตัวอย่างทั้ง 2 แบบด้วยการหุ้มแผ่นพลาสติกใสบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM C109 สามารถหาค่ากำลังรับแรงอัด ดัง Equation 1 ได้ดังนี้

$$\text{Compressive strength} = \left[\frac{\text{Force}}{\text{Area}} \right] \quad (1)$$

ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ ได้แก่ ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) โดยยึดตาม มาตรฐาน ASTM C 642

ค่าการดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างมวลของน้ำที่ดูดซับต่อมวลแห้งของชิ้นตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ดัง Equation 2 ดังนี้

$$\text{Water Absorption} = \frac{[\text{Mass of sample in air after immersion} - \text{Mass of dry sample in air}]}{\text{Mass of sample in air after immersion}} \times 100 \quad (2)$$

ความหนาแน่นทั้งก้อน

ความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของชิ้นทดสอบตาม Equation 3 ดังนี้

$$\text{Bulk density} = \frac{\text{Mass of dry sample in air}}{[\text{Mass of sample in air after boiling} - \text{The apparent mass of sample in water after boiling}]} \quad (3)$$

การทดสอบการป้องกันรังสี ด้วยการขึ้นรูปแบบวิธีการอัด และวิธีการหล่อ

ทำการขึ้นรูปโดยวิธีการแบบอัด และทำการขึ้นรูปโดยวิธีการแบบหล่อ ในการป้องกันรังสี สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (μ) ของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ คำนวณหาค่าจาก Equation 4 (Suleiman, 2018) และคำนวณหาค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) ตาม Equation 5 เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งวิเคราะห์ชิ้นตัวอย่างโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาคือ ^{60}Co (1,172.2 และ 1,332.5 keV)

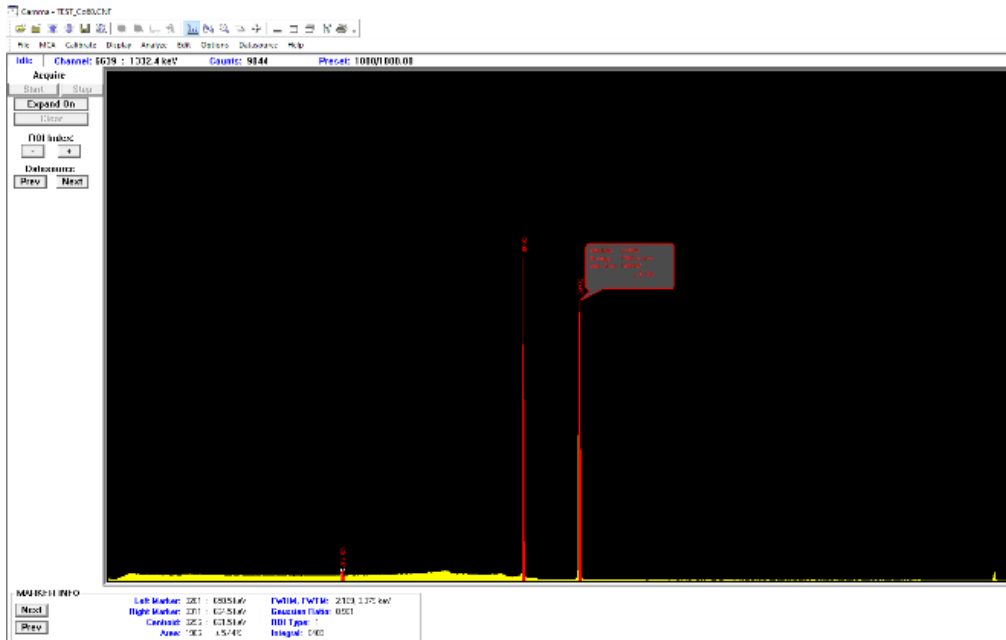


Fig. 3 Linear radiation attenuation coefficient of geopolymer materials

$$\text{Gamma ray intensity} = [\text{Gamma ray intensity at zero absorber thickness}] \exp^{-(\mu)(\text{Thickness of the absorbers})} \quad (4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) สามารถหาค่าได้ตาม Equation 5

$$\text{HVL} = \frac{\ln(2)}{\text{Linear attenuation Coefficient of the absorber}} \quad (5)$$

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาด้วยเทคนิค XRF

จาก Table 1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF พบว่า แก้วลอยมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่ปริมาณ 22.679% และ 3.445% ตามลำดับ มี Fe_2O_3 มีที่ปริมาณ 1.794% ทำให้แก้วลอยมีสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กล่าวคือ ปฏิกิริยาปอซโซลานิก มีความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรง เพิ่มค่าการทนแรงอัด และช่วยลดการดูดซึมน้ำของวัสดุโพลิเมอร์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับจากงานวิจัยของ Kaur et al. (2018) ที่ศึกษากระบวนการผลิตวัสดุโพลิเมอร์ที่ใช้แก้วลอยเป็นวัตถุดิบหลัก พบว่า วัสดุโพลิเมอร์ที่ได้มีคุณสมบัติทางกลที่ดี กล่าวคือ ให้ค่าความแข็งแรง เท่ากับ 39.95 MPa และจากงานวิจัยของ Zhiyuan et al. (2019) พบว่าปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบทางเคมีคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีปริมาณ 19.9% 4.6% และ 2.57% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีปูนซีเมนต์มีปริมาณของ SiO_2 น้อยกว่าแก้วลอย

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของเถ้าลอย ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าจังหวัดสงขลา ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าโครงสร้างผลึกหลักของเถ้าลอย คือ ควอตซ์ (Quartz) และมีโครงสร้างผลึกอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น ซินเจนไต์ (Syngenite) และ อาร์แคนไนต์ (Arcanite) เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanjitsuwan et al. (2013) ที่กล่าวว่า เถ้าลอย มีโครงสร้างผลึกหลัก คือ Quartz ดัง Fig. 4

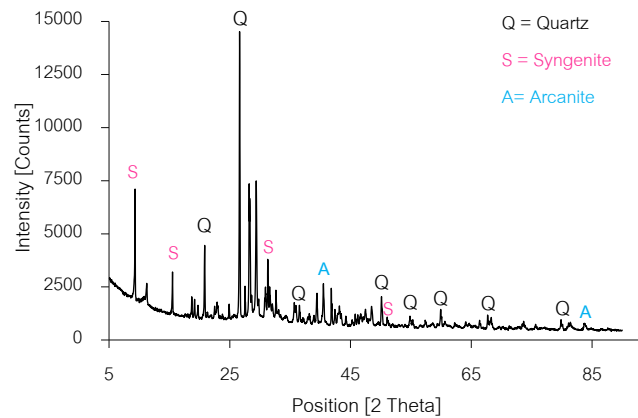


Fig. 4 XRD pattern of fly-ash

ผลการศึกษาสมบัติของวัสดุซีโอพอลิเมอร์

ผลการศึกษาหาค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ และค่ากำลังอัดของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย และซีเมนต์เพสต์

การทดลองหาค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ และค่ากำลังอัดของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย ของการขึ้นรูป 2 รูปแบบ เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Density, water absorption and compressive strength of geopolymer and cement paste

Forming	Formula	Density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Compressive strength (MPa)
Pressing	Cement-Paste	1.907	7.983	19.87
	Geopolymer	1.858	4.068	27.58
Casting	Cement-Paste	1.824	8.750	19.76
	Geopolymer	1.776	10.08	20.04

จาก Table 3 พบว่า ค่าความหนาแน่นของวัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดและการหล่อ มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.858 g/cm³ และ 1.776 g/cm³ ตามลำดับ และมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 4.068% และ 10.08% ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า วัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อ กล่าวคือ วัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดให้ค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 27.58 MPa และวัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูป

ด้วยวิธีการหล่อให้ค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 20.04 MPa ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Prasanphan et al. (2019) พบว่าการขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์ด้วยวิธีการแบบอัดทำให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่าในการรับแรงอัดสูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการหล่อ เนื่องจากวิธีการอัดทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันบนพื้นผิวที่อยู่ติดกันระหว่างอนุภาคของสารและสารละลายต่าง เมื่อพื้นผิวของของสารถูกละลายด้วยสารละลายต่าง จึงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันซึ่งเมื่ออนุภาคเรียงชิดติดกัน จึงเกิดเมทริกซ์ที่หนาแน่นกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยที่เล็กกว่า ไม่เพียงส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์เท่านั้น แต่ยังส่งผลถึงค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์อีกด้วย และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์เพสต์ จะเห็นได้ว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์แบบอัด มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.58 MPa ซึ่งมากกว่าซีเมนต์เพสต์แบบอัดที่มีค่าเท่ากับ 19.87 MPa

ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นและค่าความหนาครั้งค่าของจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์เพสต์

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นของวัสดุจีโอพอลิเมอร์เฝ้าลอยเทียบกับซีเมนต์เพสต์ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดและวิธีการหล่อโดยศึกษารังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1,173.2 และ 1,332.5 keV ตามลำดับ จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา คือ ^{60}Co

Table 4 The gamma attenuation coefficient (μ) and the half-thickness value (HVL) of geopolymer and cement paste

Forming	Formula	μ (/cm)		HVL (cm)	
		1,173.2 keV	1,332.5 keV	1,173.2 keV	1,332.5 keV
Pressing	Cement-Paste	0.9541	0.9465	0.7263	0.7322
	Geopolymer	1.3498	1.3662	0.5134	0.5073
Casting	Cement-Paste	0.9539	0.9462	0.7266	0.7325
	Geopolymer	0.9327	0.9335	0.7430	0.7424

จากTable 4 พบว่า การขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์แบบอัดให้ประสิทธิภาพในการป้องกันรังสีแกมมาได้ดีกว่าการขึ้นรูปแบบหล่อ ประมาณ 37.63–36.55% กล่าวคือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์แบบอัดให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นในช่วง 1.349–1.366/cm และค่าความหนาครั้งค่าในช่วง 0.507–0.513 cm

ในขณะที่วัสดุจีโอพอลิเมอร์แบบหล่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นในช่วง 0.932–0.933/cm และค่าความหนาครั้งค่าในช่วง 0.743–0.742 cm นอกจากนี้ พบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดให้ประสิทธิภาพในการป้องกันรังสีแกมมาได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์แบบอัดประมาณ 36.29–34.35% ในขณะที่การขึ้นรูปแบบหล่อให้ประสิทธิภาพในการป้องกันรังสีแกมมาได้ใกล้เคียงกัน

สรุป

จากการศึกษาพบว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์และซีเมนต์เพสต์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดมีค่าความหนาแน่น และสามารถรับกำลังอัดและมีค่าการป้องกันรังสีได้มากกว่าวิธีการแบบหล่อ เนื่องจากวิธีการอัดทำให้อนุภาคเรียงชิดติดกัน จึงทำให้เกิดเมทริกซ์ที่หนาแน่นกว่า ส่งผลทำให้มีค่ากำลังอัดและค่าในการป้องกันรังสีมากกว่าวิธีการหล่อ นอกจากนี้ยังพบว่า

วัสดุซีโอพอลิเมอร์ในการขึ้นรูปแบบวิธีการอัดสามารถป้องกันรังสีได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์วิธีการอัดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่พลังงาน 1,173.2 keV เท่ากับ 1.3498 และ 0.9541/cm ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นที่พลังงาน 1,332.5 keV เท่ากับ 1.3662 และ 0.9465 /cm ตามลำดับ สันนิษฐานว่าถ้าลดยังมีองค์ประกอบทางเคมี ผลสมธาตุหนัก ที่มีเลขอะตอมสูงอยู่ด้วย เช่น Si, Al, Mg, N, K และ P เป็นต้น ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติในการกำบังรังสีของวัสดุซีโอพอลิเมอร์ ทำให้สามารถลดทอนพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้ามาตกกระทบกับวัสดุซีโอพอลิเมอร์ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ จึงสรุปได้ว่าวัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ถ้อยยั้งรังสีดวงซาลาเป็นวัตถุดิบหลัก มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีแกมมาได้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม ดร.สมัญญา สงวนพรรค อาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบคุณคุณวิทยา ทรงกิตติกุล ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัยจากห้อง M 208 หน่วยวิจัยเซรามิกส์และวัสดุก่อสร้าง ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี รวมถึง โรงไฟฟ้าจังหวัดสงขลา สำหรับความกรุณาในการอนุเคราะห์ถ้อยยั้งในการทำวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณความดีนี้ผู้เขียนขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- ณพล อยู่บรรพต. 2554. การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง.วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อาบีแดง ฮาวา, ดนุพล ตันนโยภาส, วรพจน์ ประชาเสรี, พิชัย ธานีรณานนท์. 2556. สมบัติวัสดุประสานซีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเพื่องานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2002. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens): C 109/C 109M – 02. In ASTM. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, USA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2006. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete: ASTM C642. In ASTM. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 704.02, USA.
- Buchwald, A., Zellman, H., Kaps, C. 2011. Condensation of aluminosilicate gels—model system for geopolymer binders. : J. Non-Cryst. Solids. 357: 1376–1382.
- Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P. 2013. Influence of fineness of high calcium fly ash on properties of geopolymer paste. KMUTT Res. Dev. J. 36: 399–408.
- Kaur, K., Singh, J., Kaur, M. 2018. Compressive strength of rice husk ash based geopolymer. The effect of alkaline activator. Constr. Build. Mater. 169: 188–192.
- Prasanphan, S., Wannagon, A., Kobayashi, T., Jiemsirilors, S. 2019. Reaction mechanisms of calcined kaolin processing waste-based geopolymers in the presence of low alkali activator solution. Constr. Build. Mater. 221: 409–420.

Suleiman, I. 2018. Determination of linear absorption coefficient for different materials. *Int. J. Modern Res. Eng. Technol.* 3(8): 28–38.

Tonnayopas, D., Nokkaew, W. 2008. Effects of Thai natural perlite on properties of heavyweight concrete containing barite aggregate. In: *Proceeding of the 13th National Convention on Civil Engineering*, Jomtien Palm Beach Hotel and Resort, Chonburi, pp. 154.

Zhiyuan, Z., Massoud, S., Elisa, L., Rackel, S., Gideon, H., Priyan, M. 2019. Strength development and thermogravimetric investigation of high-volume fly ash binders. *Materials* 12: 3344.

การหาปริมาณสารสกัดหมึกปากกาและวัฏภาคเคลื่อนที่ที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคแรงคเลขผิวบางและการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย

Quantification of blue ballpoint pen ink extract and mobile phase for thin layer chromatography technique and image analysis

พัชราภรณ์ จรเสมอ, ภานุพล โขลนกระโทก*, อภาภรณ์ สกุกการเวก

Patcharaporn Jornsamer, Bhanupol Klongratog*, Aparporn Sakulkalavek

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Applied Physics, Faculty of science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Bangkok 10520, Thailand

*Corresponding author. Email address: bhanupol.kl@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงการวิเคราะห์ด้วยแรงคเลขผิวบางของหมึกเพื่อใช้ในทางนิติวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่ายและรวดเร็วไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน ในกระบวนการวิเคราะห์ความแตกต่างของหมึกปากกาลูกกลิ้งที่หาได้จากร้านสะดวกซื้อทั่วไป ผู้วิจัยคำนึงถึงตัวทำละลายที่ใช้สกัดหมึกและวัฏภาคเคลื่อนที่ เพื่อให้แรงคเลขผิวบางแสดงแถบสำหรับแยกความแตกต่างของหมึกปากกาได้ดีที่สุด ซึ่ง Ethanol เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการสกัดหมึกและวัฏภาคเคลื่อนที่ที่ใช้เป็น n-Butanol : Ethanol : H₂O อัตราส่วน 50:15:15 v:v:v ให้ภาพของโครมาโตแกรมแสดงการแยกได้เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพ, การวิเคราะห์ข้อมูล, ปากกาลูกกลิ้ง, พิสูจน์หลักฐาน, แรงคเลขผิวบาง

Abstract

This article is an analysis of thin layers of chromatography ink for forensic use. The researchers looked at the solvents used to separate inks and mobile phases so that thin layers of chromatography showed the best differences between pen inks. Ethanol is solvent for ink extraction and mobile phase n-Butanol : Ethanol : H₂O. The ratio of 50:15:15 v:v:v provides the best separation of chromatogram images.

Keywords: Ballpoint pen, Data analytic, Forensic, Image analysis, Thin-layer chromatography

คำนำ

ในปัจจุบันกระบวนการพิสูจน์หลักฐานมีความจำเป็นต่อการพิจารณาคดีเพื่อให้คดีเป็นไปอย่างเที่ยงตรงและเป็นธรรมต่อรูปคดี ในการพิสูจน์หลักฐานจะใช้กระบวนการทางนิติวิทยาศาสตร์เป็นการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์ทุกสาขา มาประยุกต์ใช้ในการเก็บและพิสูจน์หลักฐาน ตรวจร่างกาย สภาพแวดล้อม และวัตถุพยาน เช่น ชีววิทยา ฟิสิกส์ เคมี คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งจะต้องมีการรวบรวมพยานหลักฐาน มายืนยันให้สามารถพิสูจน์ความผิดได้อย่างชัดเจน กระบวนการทางนิติวิทยาศาสตร์ที่พบในส่วนใหญ่ เป็นการพิสูจน์ลายนิ้วมือ ตรวจดีเอ็นเอ ตรวจเขม่าป็น และการตรวจสอบด้านเอกสาร(ณัฐดนัย, 2560) โดยการตรวจสอบด้านเอกสารจะมีทั้งพินัยกรรม เอกสารที่เป็นธุรกรรมทางการเงิน และเอกสารอสังหาริมทรัพย์ เป็นต้น ซึ่งเอกสารจะสามารถถูกปลอมแปลงได้ง่าย

การปลอมแปลงเอกสารจะทำให้รูปคดีเปลี่ยนแปลงได้ง่ายจึงมีความจำเป็นต้องพิสูจน์การปลอมแปลงเอกสาร การพิสูจน์การปลอมแปลงเอกสารนั้นได้แก่ ตรวจลายเซ็น ลายมือเขียน แรงกดปากกา (พิชศาล, 2560) และตรวจสอบชนิดของน้ำหมึกปากกา ซึ่งในการตรวจสอบชนิดของน้ำหมึกปากกาจะมีหลายเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบได้แก่ ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี(UV-visible spectroscopy)(Mehwish et al., 2019) เทคนิคฟูเรียทรานส์ฟอร์มสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) (Muhammad et al., 2015) เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) (Mohamed et al., 2013) เทคนิค X-ray fluorescence spectroscopy (Daniela and Aurelia, 2014) เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography/Mass spectrometry, GC/MS) (Weyermann et al., 2006) และเทคนิคครกเลขแบบผิวนาง(Thin layer chromatography, TLC) (Djavanshir et al., 2008; Mehwish et al., 2019) จะเป็นการนำเทคนิคต่างๆ ไปตรวจสอบด้วยวิธีประมวลผลภาพเพื่อทราบข้อมูล

การประมวลผลภาพเป็นการนำภาพมาประมวลผลหรือคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยมีขั้นตอนต่างๆ ที่สำคัญ คือ การกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ การทำให้ภาพมีความคมชัดมากขึ้น การแบ่งส่วนของวัตถุที่สนใจออกมาจากภาพ โดยเปลี่ยนภาพที่ต้องการวิเคราะห์ออกมาเป็นกราฟ เพื่อนำกราฟที่ได้ไปวิเคราะห์หาข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด รูปร่าง และทิศทางการเคลื่อนของวัตถุในภาพ จากนั้นเราสามารถนำข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์ และสร้างเป็นระบบ โดยระบบที่ใช้ได้แก่ ระบบคัดกรองภาวะตัวเหลืองในทารกแรกเกิด(อภิชาติ และสุรเดช, 2558) ระบบรู้จำใบหน้า(ธัญญาวุฒิ และคณะ, 2562) เป็นต้น จากนั้นนำข้อมูลจากระบบที่ใช้ประมวลผลภาพไปจำแนกความแตกต่างเพื่อระบุข้อมูลให้ชัดเจน

ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยของ Djavanshir Djozan จากมหาวิทยาลัย Tabriz Tabriz ประเทศอิหร่าน (Djavanshir et al., 2008) และได้ศึกษางานวิจัยของ มยุรี สัมบูรณ์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร ประเทศไทย (มยุรี, 2553) ที่เลือกใช้วิธีแบบ Thin layer chromatography โดยใช้มือฝนปากกาลงบนกระดาษนำไปสแกนด้วยตัวทำละลาย จุดลงบนวงกลมเคลื่อนที่เพื่อให้สารเกิดการแยกองค์ประกอบ มาใช้การวิเคราะห์ความแตกต่างโดยการนำภาพสีที่ได้จากการสแกนโครมาโตแกรมด้วยเครื่องสแกนมาประมวลผลโดยการคำนวณความคล้ายคลึงกันของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) งานวิจัยได้แนวคิดมาเพื่อปรับปรุงและพัฒนาโดยลำดับแรกจะคำนึงถึงการทดสอบของแรงกดปากกาเนื่องจากน้ำหนักมือในการกดของปากกาแต่ละครั้งไม่เท่ากันโดยใช้เครื่อง XY plotter pen และปรับเปลี่ยนวิธีการประมวลผลภาพเป็นแบบเกรย์สเกล โดยจะใช้ภาพโครมาโตแกรมที่ได้จากเทคนิคครกเลขผิวนาง มาประมวลผลที่ได้ออกมาเป็นกราฟ แล้ววิเคราะห์องค์ประกอบหลักที่เป็นจุดเด่นของกราฟออกมาเพื่อหาตัวทำละลายที่ใช้สกัดหมึกปากกาถูกลื่นและหาวงกลมเคลื่อนที่เพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมในการทดลองเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ความแตกต่างของหมึกปากกาถูกลื่นทั้ง 25 ชนิด

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารตัวอย่าง

สุ่มเลือกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน 25 แบบจากผู้ผลิตหลายราย แสดงใน Table 1

Table 1 The trademarks of collected samples are listed

No.	Commercial characteristics	Size(mm)
1	G'soft fizz101	0.38
2	Java Russian blue naong	0.38
3	Quantum GeloPlus Sport1250	0.50
4	San-x Rilakkuma	0.38
5	Lancer spiral 825	0.50
6	Java Slim Ball 400	0.38
7	Yoyo 1301	0.50
8	M&G MF 1011	0.50
9	M&G tropical	0.50
10	G'soft Titus	0.38
11	Yoyo 1031	0.50
12	Quantum Rhythm	0.50
13	Quantum GeloPlus Cute 1245	0.70
14	Faster daily patt CX911	0.38
15	Faber Castell RX5	0.50
16	Horse H-402	0.70
17	Quantum Skate 222 duo	0.50
18	Quantum snow bear	0.38
19	M&G TR1	0.50
20	Quantum point	0.38
21	Java e-office ball	0.70
22	M&G QBP888R6	0.38
23	Staedler 4273F	0.70
24	Yoyo 1037	0.50
25	Quantum liner2233	0.38

การสกัดหมึกปากกาจากหลอดน้ำออกจากกระดาษ

การสกัดหมึกออกจากกระดาษ

สุ่มปากกาหลอดน้ำ 1 ด้ามจากปากกาจำนวน 25 ด้าม ใช้เครื่อง XY plotter pen ที่มีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตรโดยมีการถ่วงด้วยตุ้มถ่วงน้ำหนัก 20 กรัม วาดวงกลมที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลงบนกระดาษขาว A4 โดยตัดกระดาษตามวงกลมที่วาดเป็นชิ้นจำนวน 10 ชิ้น นำตัวทำละลาย 5 ชนิด ได้แก่ Ethyl acetate, Ethanol, Methanol, Acetone และ n-Butanol นำตัวทำละลายแต่ละชนิดมาใส่หลอดทดลองอย่างละ 5 หลอด หลอดละ 1 ml นำตัวอย่างปากกาที่ตัดเตรียมไว้มาใส่หลอดทดลอง เขย่า 1 นาทีเพื่อสกัดหมึก

การทดลอง TLC เพื่อไปประมวลผลข้อมูล

นำหมึกที่ได้จากการสกัดออกจากกระดาษหยดลงบนแผ่น TLC โดยใช้ไมโครปิเปต หยดจุดละ 2.5 ไมโครลิตร ที่จุดเริ่มต้น นำแผ่น TLC ดังกล่าวไปวางลงในภาชนะที่บรรจุวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) Ethyl acetate : Ethanol : H₂O อัตราส่วน 70:35:30 (v/v/v) รอจนวัฏภาคเคลื่อนที่ เคลื่อนที่ไปถึงจุดสิ้นสุด นำแผ่น TLC ไปเป่าแห้งเป็นเวลา 10 นาที เมื่อเป่าแห้งนำมาสแกนแล้วนำภาพไปวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้อัลกอริทึม image processing toolbox ประมวลผลภาพเพื่อให้ได้กราฟแล้วสังเกตความแตกต่างของกราฟเพื่อหาตัวทำละลายที่นำมาสกัดที่เหมาะสมกับปากกามากที่สุดโดยพิจารณาจากจำนวนพีคและความเข้มของสีที่มาจากกราฟวิเคราะห์ภาพ สุ่มปากกาเพิ่มอีก 4 ด้ามและทำการทดลองซ้ำ

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบวัฏภาคเคลื่อนที่โดยใช้ TLC

นำตัวอย่างปากกาที่ได้จากการสกัดหมึกออกจากกระดาษโดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมจากขั้นตอนการสกัดหมึกปากกาหลอดน้ำออกจากกระดาษ นำหมึกที่ได้หยดลงบนแผ่น TLC โดยใช้ไมโครปิเปต หยดจุดละ 2.5 ไมโครลิตร ที่จุดเริ่มต้น นำแผ่น TLC ที่ถูกหยดด้วยหมึกปากกาที่สกัดออกจากกระดาษดังกล่าวไปวางลงในภาชนะที่บรรจุวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) ที่ใช้ศึกษา 3 ระบบ ได้แก่ n-Butanol : Ethanol : H₂O อัตราส่วน 50:15:10 (v/v/v) Ethyl acetate : Butanol : NH₃ อัตราส่วน 60:35:5 (v/v/v) และ Ethyl acetate : Ethanol : H₂O อัตราส่วน 70:35:30 (v/v/v) รอจนวัฏภาคเคลื่อนที่ เคลื่อนที่ไปถึงจุดสิ้นสุด นำแผ่น TLC ไปทำให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที เมื่อแห้งนำเข้าเครื่องสแกนเพื่อประมวลผลวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB ประมวลผลภาพเพื่อให้ได้กราฟแล้วสังเกตค่า Resolution (R_s) ที่จะบอกประสิทธิภาพการทำงานของคอลัมน์และระบบโครมาโทกราฟีว่าสารประกอบที่ชะออกมานั้นถูกแยกออกจากกัน ตาม Equation 1 ต้องมีค่าตั้งแต่ 1.5 จากกราฟเพื่อหาวัฏภาคเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับการทดลองมากที่สุด

$$R_s = \frac{2(t_{R'B} - t_{R'A})}{W_A + W_B} \quad (1)$$

โดยที่ $t_{R'A}$ คือ ระยะจากจุดเริ่มต้นถึงจุดยอดของพีคที่ 1, $t_{R'B}$ คือ ระยะจากจุดเริ่มต้นถึงจุดยอดของพีคที่ 2, W_A คือความกว้างของพีคที่ 1, W_B คือความกว้างของพีคที่ 2 แสดงดัง Fig. 1

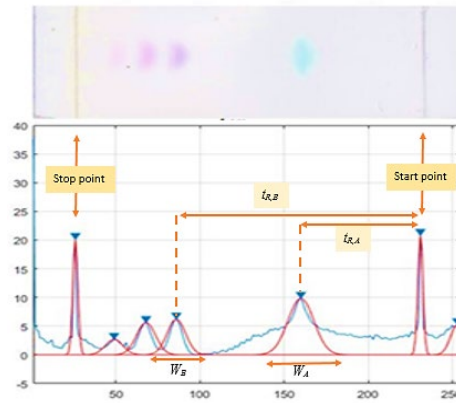


Fig. 1 Resolution of chromatogram

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยได้ทำการหาตัวทำละลาย 5 ชนิด ได้แก่ Ethyl acetate, Ethanol, Methanol, Acetone และ n-Butanol เพื่อได้ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการใช้สกัดหมีก โดยการนำหมีกมาหยดลงบนแผ่นโครมาโตแกรมและ ใช้วัฏภาคเคลื่อนที่เป็น Ethyl acetate : Ethanol : H₂O อัตราส่วน 70:35:30 (v/v/v) (Djavanshir et al., 2008) เมื่อนำโครมาโตแกรมที่ได้ไปประมวลผลภาพ จะแสดงดัง Fig. 2 โดยแสดงให้เห็นว่ากราฟของ Ethanol และ Acetone สามารถแยกแถบองค์ประกอบของสีหมีกปากกาเป็นแถบสีฟ้ากับสีชมพูได้ชัดเจน โดย Ethanol ให้จำนวนพีคมากที่สุดเพราะเป็นการบอกที่สามารถแยกองค์ประกอบของสารในหมีกปากกาได้ดี จึงเลือกใช้สารละลาย Ethanol เป็นตัวทำละลายหลักในการทดลอง

จากนั้นเมื่อได้ตัวทำละลายหลักแล้ว ทางผู้วิจัยทำการหาวัฏภาคเคลื่อนที่ในลำดับต่อไป โดยนำแผ่น TLC ที่ถูกหยดด้วยหมีกปากที่ถูกสกัดออกจากกระดาษดังกล่าวไปวางลงในภาชนะที่บรรจุวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) ใช้ศึกษา 3 ระบบ แสดงผลการประมวลผลภาพใน Fig. 2

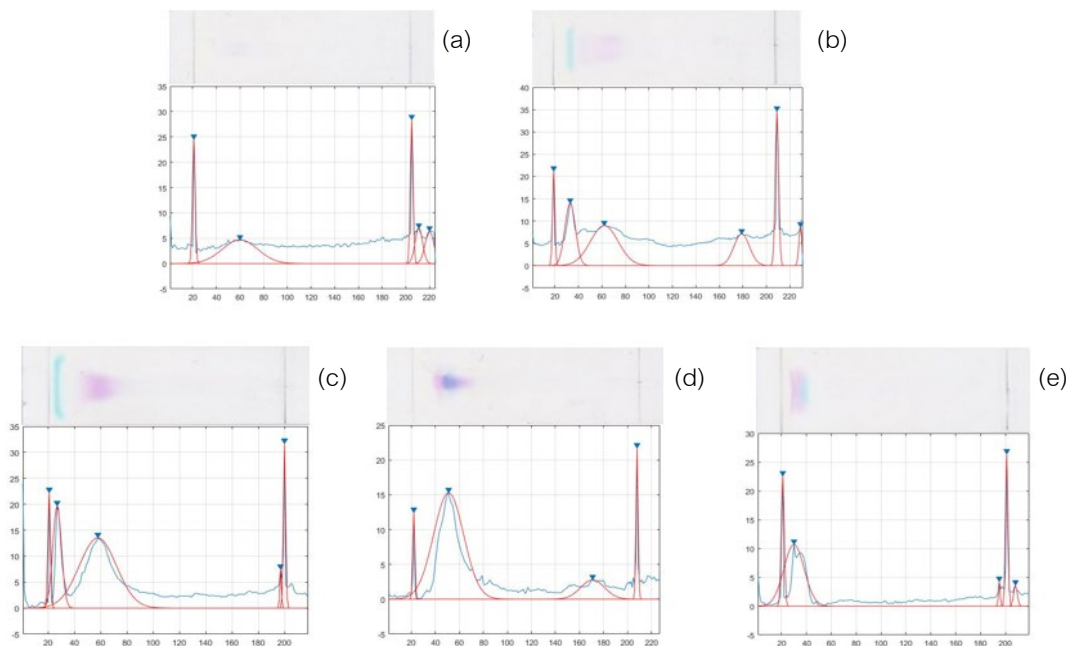


Fig. 2 Chromatograms obtained from the droplets of 5 types: (a) Ethyl acetate, (b) Ethanol, (c) Methanol, (d) Acetone, and (e) n-Butanol of solutions were processed for image processing

จาก Fig. 3 จะแสดงให้เห็นว่าวัฏภาคเคลื่อนที่ อัตราส่วน 50:15:10 สามารถแยกแถบโครมาโตแกรมออกมาได้ดีกว่าวัฏภาคระบบอื่นๆ ทางผู้วิจัยจึงนำอัตราส่วน 50:15:10 มาหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการทดลองโดยคำนึงจากค่า R_s ได้ผลดัง Table 2

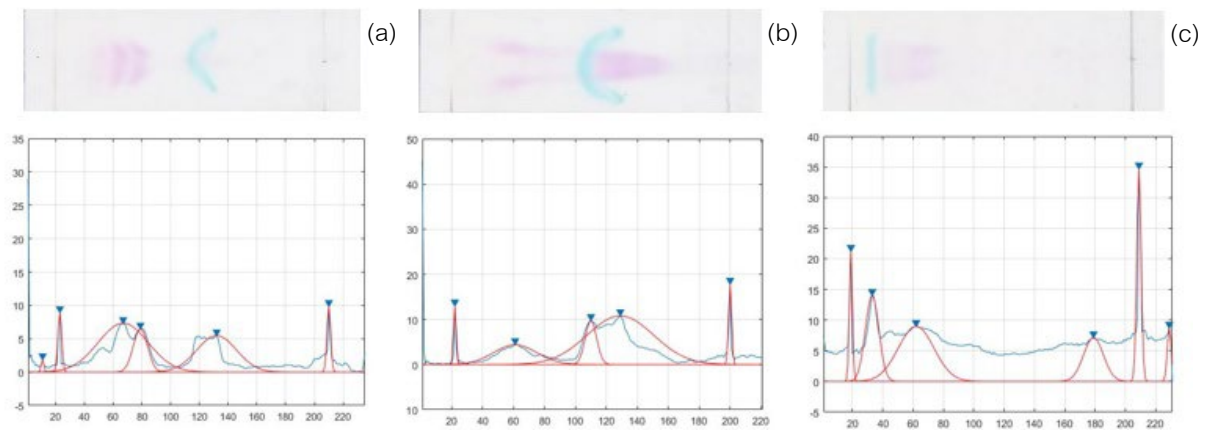


Fig. 3 Chromatograms using mobile phase 3 systems (a) 50:15:10 v:v:v (b) 60:35:5 v:v:v (c) 70:35:30 v:v:v

Table 2 R_s values of mobile phases of various systems

Ratio (v/v/v)	R_s																				
	Pen1				Pen2				Pen3				Pen4				Pen5				
	R_{s12}	R_{s23}	R_{s34}	R_{s45}	R_{s12}	R_{s23}	R_{s34}	R_{s45}	R_{s12}	R_{s23}	R_{s34}	R_{s45}	R_{s12}	R_{s23}	R_{s34}	R_{s45}	R_{s12}	R_{s23}	R_{s34}	R_{s45}	
50:15:10	8.07	2.37	2.23		2.28	1.97			1.58	1.42	19.4			3.34	8.18	2.26	2.37	2.28	1.97		
50:15:15	8.43	2.28	2.03		2.4	4.94	2.17		20.26	2.51	2.18			2.40	4.94	2.17	2.05	7.97	2.63	2.24	
50:20:10	4.01	1.43	3.22		0.97	2.24			2.6	5.82				0.81	2.47	1.86	2.24	2.25	2.72	2.30	
55:15:10	2.97	0.73	2.23	10.77	1.91	2.03			2.85	2.45				5.34	2.54	2.65	3.36	2.24	2.65		
55:20:10	5.71	1.92	2.37		6.81	1.46	1.75		1.75	1.77	6.16			2.91	6.87	2.79	2.92	2.76	5.18		
55:25:05	1.67	2.43	4.07		0.91	3.47	14.59		1.57	3.44				4.06	1.65	2.43		4.36	2.79	2.6	2.24
60:20:10	6.14	2.05	3.00		10.83	1.94	2.4	2.97	0.92	7.78	0.66			5.32	1.68	2.69		1.25			
60:25:05	1.6	2.36	3.21		2.09	2.63			6.98	1.82	1.92	3.31		6.94	1.43	2.57	2.79	0.8			

จาก Table 2 ค่า R_{s12} หมายถึง ค่าประสิทธิภาพการทำงานในการแยกของพีคเริ่มต้นกับพีคที่ 1, ค่า R_{s23} หมายถึง ค่าประสิทธิภาพการทำงานในการแยกของพีคที่ 1 กับพีคที่ 2, ค่า R_{s34} หมายถึง ค่าประสิทธิภาพการทำงานในการแยกของพีคที่ 2 กับพีคที่ 3 และ ค่า R_{s45} หมายถึง ค่าประสิทธิภาพการทำงานในการแยกของพีคที่ 3 กับพีคที่ 4 โดยอัตราส่วนที่ 50:15:15 ให้จำนวนพีคที่มากกว่าในแต่ละปากกา และมีค่า R_s มากกว่า 1.5 ของทุกปากกา ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของภูมิภาคเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับระบบมากที่สุด

สรุป

งานวิจัยฉบับนี้เพื่อวิเคราะห์หมึกปากกาถูกลิ้นด้วยเทคนิคแรงคเลซผิวบางและการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายในการตรวจสอบทางพิสูจน์หลักฐานสามารถหาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดหมึกปากกาถูกลิ้น คือ Ethanol เพราะสามารถแยกแถบองค์ประกอบของหมึกปากกาได้และให้ความเข้มข้นที่เหมาะสม และสามารถหาระบบของวัฏภาคเคลื่อนที่คือ n-Butanol : Ethanol : H₂O ที่อัตราส่วน 50:15:15 v:v เพราะให้ค่าประสิทธิภาพการทำงานในการแยกของพีคมีค่าตั้งแต่ 1.5 ขึ้นไปเพื่อนำไปใช้เป็นวัฏภาคเคลื่อนที่หลักในการหาความแตกต่างของหมึกปากกาถูกลิ้นแต่ละชนิดได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนผู้ช่วยวิจัยและผู้ช่วยสอน ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การสนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐดนัย เนียมทอง. 2560. พิสูจน์หลักฐานคืองานตำรวจ. <https://www.scimath.org/article-biology/item/7466-2017-09-08-02-55-47>, 15 มิถุนายน 2564.
- อภิชาติ อาสนาทิพย์, สุรเดช บุญลือ. 2558. การประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ เพื่อคัดกรองภาวะตัวเหลืองในทารกแรกเกิด. วารสารพยาบาลตำรวจ 7: 166–182.
- ธัญญาวุฒิ ว่องวุฒิไกร, อัจฉรา นันทนา, ศิริรัตน์ พรหมดวง, มหศักดิ์ เกตุจำ. 2562. ระบบตรวจจับบุคคลเพื่อเฝ้าระวังในพื้นที่ที่กำหนด. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม 1: 35–41.
- พิชศาล พันธุ์วัฒนา. 2560. การตรวจสอบลายมือเขียนที่ปรากฏในเอกสาร. วารสารวิชาการอาชีวศึกษาและนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ 3: 28–36.
- มยุรี สมบูรณ์. 2553. การวิเคราะห์หมึกสีน้ำเงินจากปากกาถูกลิ้นด้วยเทคนิคทินเลเยอร์โครมาโตกราฟีและการวิเคราะห์ภาพ. Veridian E – Journal 3: 1.
- Daniela, L.F., Aurelia, M. 2014. Possibilities to differentiate ballpoint pen inks by spectroscopic and chromatographic techniques. U.P.B. Sci. Bull. Series B, 76: 113–126.
- Djavanshir, D., Tahmineh, B., Ghader, K., Shahidi, M. 2008. Forensic discrimination of blue ballpoint pen inks based on thin layer chromatography and image analysis. Forensic Sci. Int. 179: 199–205. doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.05.013
- Mehwish, S., Madeeha, B., Sohail, C., Farooqi, Z.H., Tirmazi, S.A.A.S., Athar, M. 2019. Forensic discrimination potential of blue, black, green, and red colored fountain pen inks commercially used in Pakistan, by UV/Visible spectroscopy, thin layer chromatography, and fourier transform infrared spectroscopy. Int. J. Environ. Anal. Chem. 1: 1–11. doi.org/10.1155/2019/5980967
- Mohamed, I.A.H., Norashikin, S., Rozita, O., Jasmani, H. Abidin, N.N.Z. 2013. Discrimination of black ballpoint pen inks by High Performance Liquid Chromatography (HPLC). Malays. J. Anal. Sci. 17(2): 230–235.
- Muhammad, N.M., Wan, N.S.M.D., Dzulkiflee, I. 2015. Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy with chemometric techniques for the classification of ballpoint pen inks. Arab J. Forensic Sci. Forensic. Med. 1(2): 194–200. doi.org/10.12816/0017699
- Weyermann, C., Kirsch, D., Costa, V.C. 2006. A GC/MS study of the drying of ballpoint pen ink on paper. Forensic. Sci. Int. 168(2–3): 119–127. doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.06.076

การบริหารจัดการการประชุมรัฐสภาไทย Administration of meeting of Thai parliament

เหนือฝัน พิมพ์วงศ์^{a,*}, พบสีทธิ กมลเวชช^b

Nueafun Pimwong^{a,*}, Pobsit Kamolvej^b

^aสำนักสารสนเทศ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร กรุงเทพฯ 10300

^bภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^aBureau of Information, The secretariat of The House of Representatives, Bangkok 10300, Thailand

^bDepartment of Computer Science, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: nueafun.p@parliament.go.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา ออกแบบและบริหารจัดการการประชุมของรัฐสภาแห่งใหม่ เพื่อสนับสนุนการขับเคลื่อนแผนพัฒนารัฐสภาดิจิทัลการให้ความสำคัญกับการนำเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาใช้สนับสนุนการปฏิบัติงานและระบบบริการ รัฐสภาได้พัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐาน จัดทำระบบรักษาความปลอดภัย อีกทั้งบูรณาการสารสนเทศและฐานข้อมูล รวมถึงนำสื่อหลายๆ ประเภทมาใช้ร่วมกับการปฏิบัติงานด้านการประชุมให้มีประสิทธิภาพ การวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาระบบบริหารจัดการประชุมผ่านอุปกรณ์ สมาร์ทดีไวซ์ และเทคโนโลยีคลาวด์ เป็นแนวทางของการปรับใช้เทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการปฏิบัติงานรัฐสภาอัจฉริยะ ผลการวิจัยในครั้งนี้ปรากฏว่าคุณภาพการใช้งานระบบบริหารจัดการห้องประชุมมีค่าอยู่ในระดับดี ($\bar{x} = 3.93$, $SD = 0.51$)

คำสำคัญ: บริหารจัดการประชุม, รัฐสภาดิจิทัล, สมาร์ทดีไวซ์

Abstract

This research study Design and administer the meetings of the new parliament. To support the drive of the Digital Parliamentary Development Plan, the focus is on the use of information and communication technology to support operations and service systems. Parliament has developed an infrastructure system. Set up a security system as well as integrate information and databases including bringing many media Type to be used in conjunction with meeting operations to be effective. This research has developed a meeting management system through smart devices and cloud technology. It is a guideline for deploying technology to support the operation of the Smart Parliament. The results of this research show that the quality of meeting room management system usage is at a good level. ($\bar{x} = 3.93$, $SD = 0.51$)

Keywords: Digital parliament, Manage meetings, Smart drive

คำนำ

ปัจจุบันรัฐสภาได้ย้ายจากคู่มือของในมายังอาคารรัฐสภาแห่งใหม่ เป็นสถานที่ปฏิบัติงานของหน่วยงานในสังกัดรัฐสภาได้แก่สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร และสำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา รัฐสภาดำเนินการติดตั้งระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารพร้อมอาคารประกอบ เพื่อรองรับการปฏิบัติงานของสมาชิกสภาผู้แทนราษฎร สมาชิกวุฒิสภา ข้าราชการ บุคลากรในวงงานรัฐสภา โดยให้บริการสถานที่ปฏิบัติงาน บริการระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร การประชุมเป็นหนึ่งในภารกิจหลักของรัฐสภา ซึ่งต้องจัดสรรการใช้พื้นที่อาคารรัฐสภาแห่งใหม่มีหลายประเภท และจำนวนมาก อีกทั้งการให้บริการต่างๆ เช่น บริการเครื่องดื่ม บริการเจ้าหน้าที่ชวเลข บริการโสตทัศนอุปกรณ์ ซึ่งการให้บริการต่างๆ นั้น อาจเกิดปัญหาจากขั้นตอนการปฏิบัติงาน เช่น การจองห้องประชุมพร้อมกันแล้วเกิดความซ้ำซ้อน ไม่มีข้อมูลห้องประชุมที่สืบค้นได้ เจ้าหน้าที่ให้บริการไม่เพียงพอ จากปัญหาข้างต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานและภาพลักษณ์ของรัฐสภา จึงต้องการให้มีการพัฒนาระบบสารสนเทศและบูรณาการฐานข้อมูลเพื่อช่วยในการบริหารจัดการการประชุมรัฐสภา

ด้วยเหตุผลนี้ผู้วิจัยได้ศึกษา ออกแบบและบริหารจัดการการประชุมของรัฐสภาแห่งใหม่ บูรณาการสารสนเทศและฐานข้อมูล รวมถึงนำสื่อหลายๆ ประเภทมาใช้ร่วมกับการปฏิบัติงานด้านการประชุมให้มีประสิทธิภาพ โดยพัฒนาระบบบริหารจัดการประชุมผ่านอุปกรณ์ สมาร์ททีวี และเทคโนโลยีคลาวด์ เป็นแนวทางการปรับใช้เทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการปฏิบัติงานรัฐสภาอัจฉริยะ อีกทั้งอำนวยความสะดวกให้กับสมาชิกสภาผู้แทนราษฎร สมาชิกวุฒิสภา ข้าราชการ บุคลากรในวงงานรัฐสภา รวมถึงการบริหารจัดการการประชุมของรัฐสภาสามารถลดปริมาณการใช้กระดาษให้น้อยลง ทำให้ลดการใช้ทรัพยากรและงบประมาณเป็นไปตามนโยบายรัฐสภาสีเขียว (Green Parliament)

อุปกรณ์และวิธีการ

การบริหารจัดการการประชุมรัฐสภาไทยใช้ Unified Modeling Language (UML) เป็นแบบจำลองหลักในการแสดงโครงสร้าง ความสัมพันธ์ กิจกรรม เพื่อเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบการบริหารจัดการห้องประชุม ดังนี้ (1) แสดงให้เห็นถึงการใช้งานระบบ (2) แสดงขั้นตอนการทำงาน (3) แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล (4) การไหล (5) การเชื่อมโยงข้อมูล และ (5)สถาปัตยกรรมของระบบ อีกทั้งใช้วงจรพัฒนาระบบ SDLC (Malkovich and Tumbas,2010) เป็นเครื่องมือของดังนี้ (1) การวางแผน (Planning) หมายถึงการกำหนดระยะเวลาการดำเนินงาน ศึกษาความเป็นไปได้ของระบบ (2) การวิเคราะห์ (System Analysis) เป็นขั้นตอนในการศึกษาและวิเคราะห์ถึงขั้นตอนการดำเนินงานของระบบเดิมรวบรวมความต้องการระบบงานใหม่จากผู้ใช้งานระบบแล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และออกแบบระบบใหม่ (3) การออกแบบเชิงตรรกะ (Logical Design) การออกแบบลักษณะการทำงานของระบบตามทางเลือกที่ได้จากขั้นตอน การวิเคราะห์ระบบ ด้วยการออกแบบในเชิงตรรกะนี้ยังไม่ได้กำหนดคุณลักษณะ ของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้เป็นเพียงกำหนดถึงลักษณะของรูปแบบรายงานที่เกิดจากการทำงานของระบบ ลักษณะของการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบ และผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ (4) การออกแบบเชิงกายภาพ (Physical Design) คือการระบุถึงลักษณะการทำงานของระบบทางกายภาพหรือทางเทคนิค โดยระบุถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ วิธีการเขียนโปรแกรม ฐานข้อมูลของการออกแบบเครือข่ายที่เหมาะสมกับระบบ (5) การพัฒนาและติดตั้งระบบ (System implementation) ขั้นตอนของการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบมาเขียนโปรแกรมเพื่อให้เป็นไปตามคุณลักษณะและรูปแบบต่างๆ ที่กำหนดไว้ เมื่อทำการพัฒนาโปรแกรมเสร็จแล้ว ต่อมาทำการทดสอบโปรแกรมเพื่อหาข้อผิดพลาด และทำการติดตั้งระบบเป็นลำดับสุดท้าย (6) การซ่อมบำรุงรักษา ระบบ (System Maintenance) เป็นขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่ได้มีการนำระบบไปใช้งาน อาจเกิดปัญหาต่างๆ ของการใช้งานระบบ จึงต้องทำการแก้ไขปัญหาที่พบให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานและความถูกต้องของระบบ

การประเมินคุณภาพจากการใช้งานการบริหารจัดการการประชุมและเปรียบเทียบความสอดคล้องของการออกแบบและพัฒนาระบบกับคุณภาพการใช้งานระบบห้องประชุมมีขั้นตอนดังนี้ (1) สร้างแบบประเมินคุณภาพ (ณมน, 2555) ด้วยแบบจำลอง E-S QUAL (โอบาส , 2559) ที่ผ่านการหาค่าความเที่ยงตรง (2) กำหนดกลุ่มตัวอย่างและเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่ม (อรวรรณ, 2558) (3) วิเคราะห์ผลการประเมินคุณภาพการใช้งานห้องประชุมกับบุคลากรสำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎรและสำนักงานวุฒิสภาด้วยสถิติค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (กัลยา และฐิตา, 2562) (4) สรุปผลการประเมินคุณภาพจากการใช้งานระบบห้องประชุม

ระบบงานที่เกี่ยวข้อง

ระบบจองห้องประชุมมหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ศึกษาและพัฒนาระบบการจองห้องประชุมรูปแบบ Web Application อีกทั้งประเมินความพึงพอใจผู้ใช้งาน (ธนากร และคณะ, 2556)

การพัฒนาระบบบริหารจัดการห้องประชุมวิทยาลัยนครราชสีมา พัฒนาระบบบริหารจัดการห้องประชุม ซึ่งอยู่ในรูปแบบ Web Application โดยสามารถตรวจสอบข้อมูล เพิ่ม ลบ แก้ไข และออกรายงานสรุปผล (สุพรรณ, 2558)

ระบบการบริหารจัดการจองห้องประชุม สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ศึกษาและพัฒนาระบบการจองห้องประชุมให้สามารถสืบค้นข้อมูลการขอใช้ห้องประชุมผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตในรูปแบบ Web Application (ณัฐธรมน และคณะ, 2560)

การพัฒนาระบบจองห้องศึกษากลุ่มหอสมุดและคลังความรู้มหาวิทยาลัยมหิดล ศึกษาและพัฒนาระบบจองห้องศึกษารายกลุ่มร่วมกับการประเมินประสิทธิภาพของระบบ และความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ (ปิยวัฒน์ และโสภรัศมี, 2560)

การออกแบบและพัฒนาระบบจองคอร์สเรียนทำขนมกับผู้สอนอิสระบนอินเทอร์เน็ตด้วยวิธีเชิงโครงสร้าง ทำการออกแบบและพัฒนาระบบแบ่งเป็นสามส่วนงาน ส่วนงานผู้สอนอิสระ ส่วนงานผู้ดูแลระบบ ส่วนงานของผู้เรียน ประเมินคุณภาพการใช้งานระบบ กำหนดกลุ่มตัวอย่างและเก็บรวบรวมข้อมูลแบบการสุ่มแบบบังเอิญ (พัชรี และคณะ, 2564)

ทั้งนี้ระบบงานที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์พบว่าโดยส่วนใหญ่การออกแบบและพัฒนาระบบการจองห้อง การจองห้องประชุม การบริการจัดการจองห้องประชุม เป็นการให้บริการที่ยังไม่ครอบคลุมงานประชุมทั้งหมด จะเป็นการให้บริการจองห้องประชุมเพียงอย่างเดียว รองรับห้องประชุมที่มีจำนวนไม่มาก ให้บริการในรูปแบบของ Web Application วิเคราะห์และออกแบบระบบโดยใช้ภาษา PHP เชื่อมต่อข้อมูลที่พัฒนาจากฐานข้อมูล My SQL เพื่อช่วยในการจัดเก็บข้อมูลในระบบและนำข้อมูลมาใช้ออกรายงานต่างๆ ที่เกี่ยวกับการจองห้องประชุม ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และทำการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ ผู้วิจัยได้ศึกษาและพัฒนาขยายการทำงานระบบจองห้องประชุมให้ครอบคลุม สามารถรองรับงานประชุมที่มีจำนวนมาก และมีผู้เกี่ยวข้องหลายฝ่ายให้บริการได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถให้บริการได้หลากหลายอุปกรณ์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการออกแบบสถาปัตยกรรมการบริหารจัดการการประชุมรัฐสภาไทย

แผนภาพการออกแบบสถาปัตยกรรมการบริหารจัดการการประชุมรัฐสภาไทย (Fig.1) โดยออกแบบตามฟังก์ชันการทำงานของระบบเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้ การแสดงผลข้อมูลระบบ (User Interface) เป็นส่วนของการแสดงผลข้อมูลของระบบ ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งานระบบโดยสามารถทำงานผ่าน 3 อุปกรณ์หลักดังนี้คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ ผ่าน Window Application และ Web Browser อุปกรณ์ Smart phone ผ่าน Mobile Application (iOS และ Android) และอุปกรณ์สุดท้าย Tablet ผ่าน Mobile Application (iOS และ Android) ซึ่งมีการจัดการในเรื่องของการแสดงผลข้อมูลและเมนูการใช้งานต่างๆ ส่วนโครงสร้างพื้นฐานของระบบ (Foundation) คือโครงสร้างพื้นฐานของระบบงานที่มีการใช้งานร่วมกัน ส่วนฐานข้อมูลระบบ (Database) ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลต่างๆ ภายในระบบ งานที่เป็นฟังก์ชันหลักของระบบ (Module) ประกอบด้วย (1) ระบบบริการจองห้องประชุมเป็นส่วนงานที่เกี่ยวกับการจองห้องประชุม การอนุมัติ การยกเลิกการจอง การแจ้งสิ้นสุดการใช้ห้องประชุม การตรวจสอบผลการจองห้องประชุม การกำหนดรูปแบบห้องประชุม การกำหนดสถานะห้องประชุม ผลการจองห้องประชุม (2) ระบบบริการเครื่องดื่มเป็นส่วนงานที่ให้บริการเครื่องดื่มในห้องประชุมต่างๆ การแจ้งขอใช้บริการเครื่องดื่ม การอนุมัติ การยกเลิก โดยระบบจะทำการแจ้งเตือนไปยังเจ้าหน้าที่ที่ทราบเมื่อมีการแจ้งขอใช้บริการเครื่องดื่ม (3) ระบบบริการโสตทัศนอุปกรณ์ เป็นการแจ้งขอใช้บริการเจ้าหน้าที่โสตทัศนอุปกรณ์และอุปกรณ์สนับสนุนการประชุม การอนุมัติ การยกเลิก โดยระบบจะทำการแจ้งเตือนไปยังเจ้าหน้าที่ที่ทราบ เมื่อมีการแจ้งขอใช้บริการโสตทัศนอุปกรณ์ (4) ระบบบริการชวเลข เป็นการแจ้งขอใช้บริการเจ้าหน้าที่ชวเลขสนับสนุนการจดบันทึกการประชุม การอนุมัติ การยกเลิก โดยระบบจะทำการแจ้งเตือนไปยังเจ้าหน้าที่ที่ทราบ เมื่อมีการแจ้งขอใช้บริการชวเลข (5) ระบบบันทึกการประชุมเป็นการแจ้งเจ้าหน้าที่สนับสนุนการบันทึกการประชุม การอนุมัติ การยกเลิก และ (6) ระบบการควบคุมอุปกรณ์ห้องประชุม เป็นระบบการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งภายในห้องประชุม อาทิ เครื่องฉายภาพ กล้อง โดยใช้อุปกรณ์ iPad Tablet หรือ Smart Phone ผ่านระบบเครือข่ายไร้สายของรัฐสภา

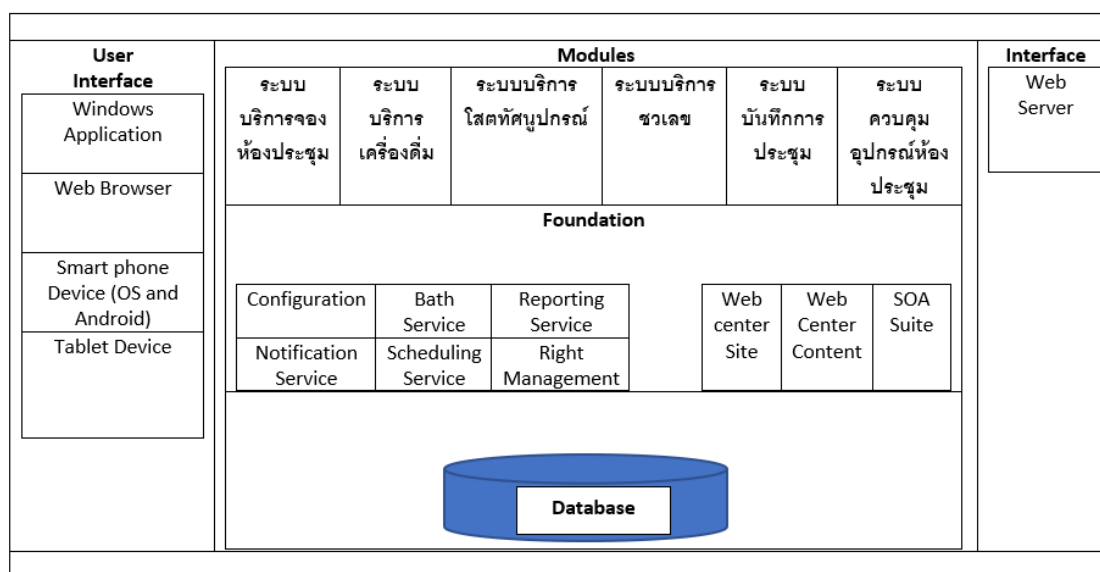


Fig. 1 Diagram showing the meeting management architecture of Thai Parliament

ผลการออกแบบระบบเครือข่ายของรัฐบาล

แผนผังระบบเครือข่ายรัฐบาล (Fig. 2) แสดงการเชื่อมต่อสายสัญญาณอุปกรณ์เครือข่ายสื่อสารต่างๆ กับระบบเทคโนโลยีสารสนเทศรัฐบาล โดยมีการรับส่งข้อมูลของระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศด้านต่างๆ ซึ่งระบบเครือข่ายของรัฐบาลประกอบด้วยส่วนต่างๆ อาทิ 1. ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet) สำหรับรองรับการเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต เพื่อเป็นช่องทางสำหรับให้บริการอินเทอร์เน็ตกับผู้ใช้บริการเครือข่ายภายในของรัฐบาล 2. ระบบเครือข่าย Campus LAN เป็นระบบเครือข่ายความเร็วสูงที่รองรับการเชื่อมต่อจากอุปกรณ์ต่างๆ ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของอาคารรัฐบาล สามารถรองรับการเชื่อมต่อทั้งในแบบมีสาย (Wired) และแบบไร้สาย (Wireless) 3. การรักษาความปลอดภัย โดยกำหนดให้ผู้ใช้ระบบเครือข่ายต้องผ่านการพิสูจน์ตัวตน (Authentication) ก่อนเข้าใช้งานระบบทุกครั้ง ซึ่งสามารถทำงานร่วมกับระบบบริหารจัดการทรัพยากรในเครือข่าย (Active Directory Domain Service) ของผู้ใช้งานได้จาก Fig. 2 ระบบเครือข่ายเป็นลำดับชั้น (Hierarchical Network) โดยสามารถแบ่งออกเป็นแต่ละชั้นได้ ดังนี้ ระดับชั้นอุปกรณ์กระจายสัญญาณหลัก (Core Layer) ระดับชั้นอุปกรณ์กระจายสัญญาณรอง (Distribution Layer) และระดับชั้นอุปกรณ์กระจายสัญญาณย่อย (Access Layer) ซึ่งการเชื่อมต่อสายสัญญาณกับอุปกรณ์จะถูกแบ่งเป็น 2 เส้นทางกระจายการใช้ งาน เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ หากระบบเครือข่ายเส้นใดเส้นหนึ่งมีปัญหาจะทำให้ไม่เกิดผลกระทบต่ออีกเส้นหนึ่ง มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจากแต่ละจุด สามารถรองรับการทำงานของอุปกรณ์ปลายทางต่างๆ เช่น Smart Phone, iPad, Tablet, Note book เป็นต้น อีกทั้งระบบเครือข่ายมีความยืดหยุ่น สามารถเพิ่มเติม ต่อขยายได้ในอนาคต

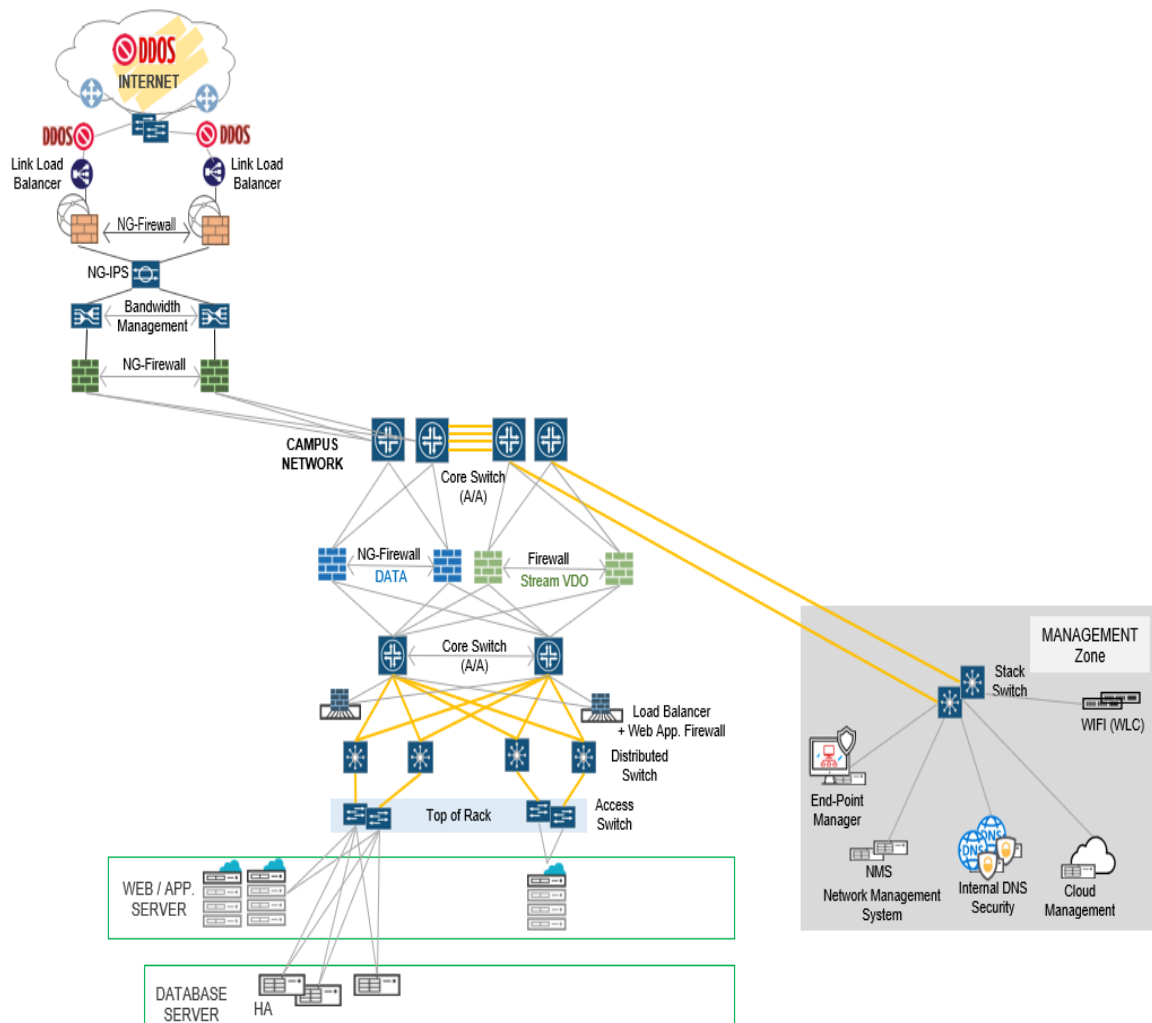


Fig. 2 Network Diagram

ผลการออกแบบภาพรวมระบบเทคโนโลยีการประมวลผลแบบคลาวด์ (Cloud Computing)

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์ระบบการบริหารจัดการการประชุมของรัฐสภา ด้านการให้บริการ ลักษณะการประมวลผล สถาปัตยกรรมระบบทั้งอุปกรณ์และโปรแกรมแสดงดัง Fig. 3

ประกอบด้วย (1) ระบบคลาวด์แบบส่วนตัว (Private Cloud) เป็นระบบคลาวด์ที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานเฉพาะรัฐสภาเท่านั้น มีความความปลอดภัยของข้อมูลและระบบสารสนเทศ (2) ระบบใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์แบบเสมือน (Physical Server) (3) ระบบพื้นที่จัดเก็บข้อมูลเสมือน (Software Defined Storage) (4) ระบบเครือข่ายเสมือน (Software Defined Network) เพื่อควบคุมระบบเครือข่ายเสมือน (Virtual Machine) และ (5) ควบคุมการเข้าถึงระบบและการใช้งานข้อมูล สารสนเทศร่วมกัน

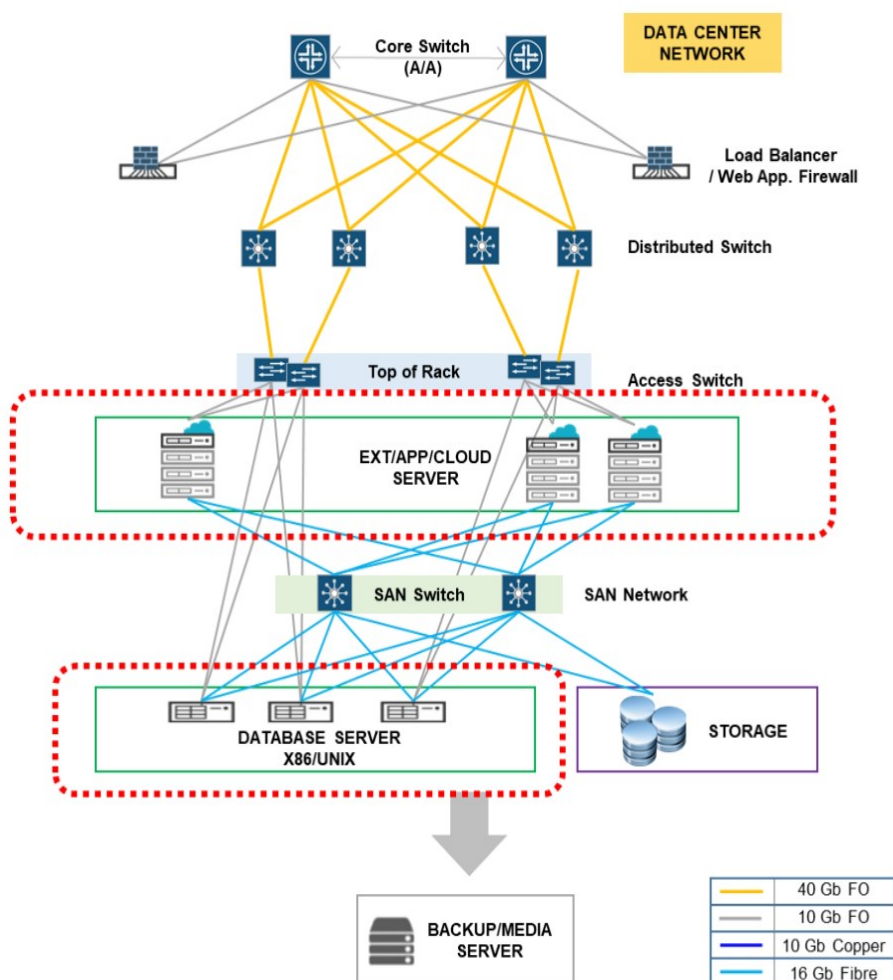


Fig. 3 Cloud computing networking overview diagram

ผลการออกแบบระบบโสตทัศนูปกรณ์

จาก Fig. 4 แสดงผังภาพระบบภาพและเสียงห้องประชุม พร้อมทั้งการเชื่อมต่ออุปกรณ์จอภาพ กล้อง ไมโครโฟน อุปกรณ์กระจายสัญญาณระบบเครือข่ายไร้สาย และคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบภาพและเสียงห้องประชุมในรูปแบบเดิมชุดประชุมมีอุปกรณ์เพียงไมโครโฟนและเครื่องฉายภาพ อีกทั้งต้องให้เจ้าหน้าที่โสตทัศนูปกรณ์เป็นผู้ดำเนินการเปิด - ปิด อุปกรณ์ ส่วนระบบใหม่มีการพัฒนาของอุปกรณ์และโปรแกรม อาทิ การใช้งานไมโครโฟนเมื่อกดปุ่มพูดกล้องในห้อง

ประชุมจะจับภาพผู้พูดและฉายภาพขึ้นจอทันที อีกทั้งผู้เข้าร่วมประชุมสามารถทำการควบคุมระบบภาพ เสียง กล้องและอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านอุปกรณ์ Smart Phone iPad Tablet โดยไม่ต้องใช้บริการเจ้าหน้าที่โสตทัศนอุปกรณ์ เป็นการลดภาระงานของเจ้าหน้าที่ที่มีจำนวนจำกัด

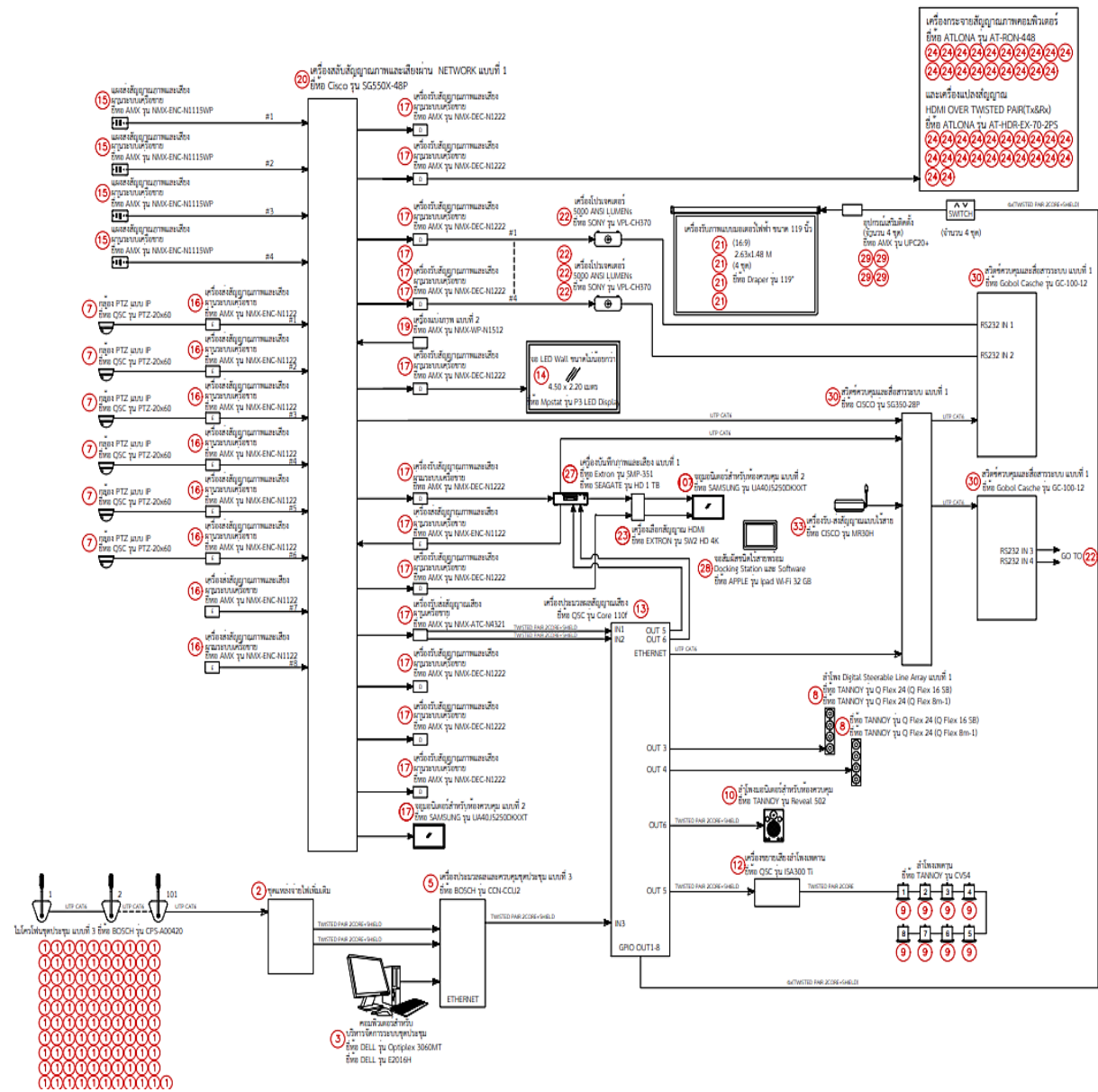


Fig. 4 Meeting room audiovisual system diagram. From the picture showing the like of the monitor, camera, speaker, microphone, access point and computer

ผลการพิสูจน์ตัวตน (Authentication) เข้าถึงระบบสารสนเทศของรัฐสภาและการเข้าใช้งานระบบของห้องประชุม

Fig. 5 แสดงหน้าจอการยืนยันตัวตนที่ผู้ใช้งานต้องทำการระบุชื่อและรหัสผ่านซึ่งเป็นระบบรักษาความปลอดภัยที่กำหนดให้เฉพาะผู้มีสิทธิให้เข้าใช้งานระบบเท่านั้น Fig. 6 แสดงตารางการจองห้องประชุมในรูปแบบปฏิทินโดยระบุวันที่ห้องประชุมถูกจองด้วยวงกลม และ Fig. 7 แสดงข้อมูลรายละเอียดการจองห้องประชุม เมื่อผู้ใช้งานทำการจองห้องประชุมเรียบร้อยแล้วระบบสามารถแสดงรายละเอียดการจองห้องประชุมให้ผู้ใช้งานทราบ ประกอบด้วยชื่อผู้จองห้องประชุม ห้องประชุม วัน เวลา สถานะการจองห้องประชุม และรายละเอียดเพิ่มเติม

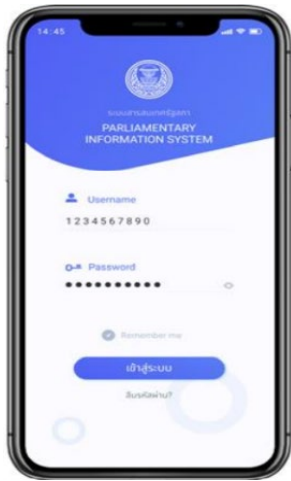


Fig. 5 shows the authentication screen

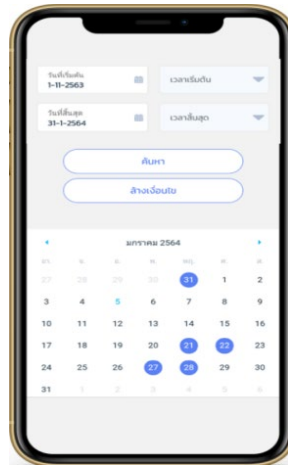


Fig. 6 Show the meeting room usage schedule screen

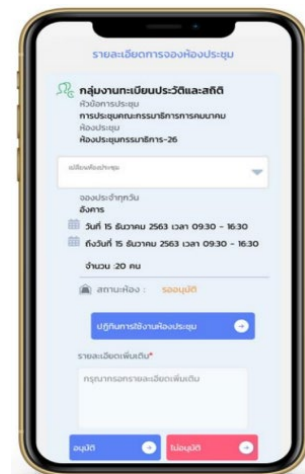


Fig. 7 Show the meeting room booking detail screen

จาก Fig. 8, Fig. 9 and Fig. 10 แสดงขั้นตอนการเข้าถึงระบบการควบคุมห้องประชุมผ่านอุปกรณ์ iPad Smart Phone Tablet โดยการใช้งานระบบควบคุมห้องประชุมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ 1. การสแกน QR code ที่ระบุไว้ในห้องประชุมต่างๆ 2. การเข้าถึงด้วยการระบุ IP address 10.21.201.121 ซึ่งเป็น IP ที่ใช้เฉพาะของระบบควบคุมห้องประชุมเท่านั้น

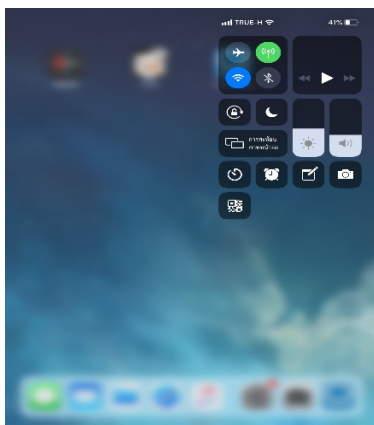


Fig. 8 shows the activation of the QR

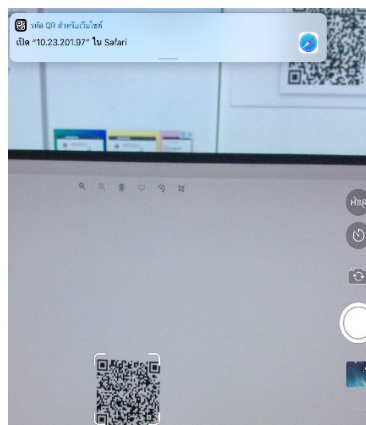


Fig. 9 access screen QR code

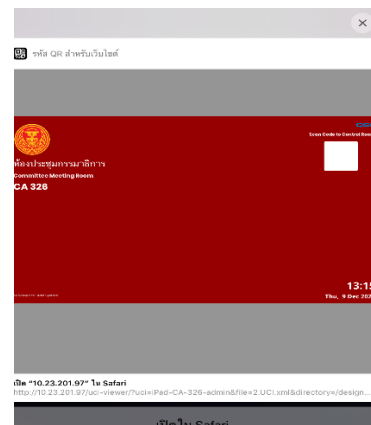


Fig. 10 QR code scan result screen

ผลการใช้งานระบบควบคุมห้องประชุม

ผลการใช้งานระบบควบคุมห้องประชุม สามารถเข้าใช้งานได้ 2 ช่องทางคือ ผ่านทาง QR code ที่ระบุไว้ในห้องประชุมประเภทต่างๆ และผ่านทาง การเชื่อมต่อไอพีแอดเดรส IP 10.21.201.121 ซึ่งเป็นการกำหนดเฉพาะให้เข้าถึงระบบได้ ผู้ใช้งานสามารถทำการควบคุมระบบภายในห้องประชุม ดังนี้ (1) การเปิด ปิด เครื่องฉายภาพ (2) การเลือกเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะนำเสนอ (3) การเลือกให้กล้องจับภาพ (4) การบันทึกการประชุม (5) การควบคุมเสียง และ (6) การขอความช่วยเหลือ

Fig. 11 แสดงการควบคุมระบบห้องประชุมเริ่มต้นที่เครื่องฉายภาพ เปิดระบบเมื่อเริ่มต้นประชุม และปิดระบบเมื่อสิ้นสุดการประชุม

Fig. 12 แสดงการควบคุมเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะนำเสนอข้อมูลโดยเลือกจากหมายเลขเครื่องคอมพิวเตอร์

Fig. 13 การควบคุมกล้องโดยรอบห้องประชุมให้จับภาพภายในการประชุม

Fig. 14 ระบบบันทึกการประชุมเมื่อกดปุ่มบันทึกระบบจะทำการบันทึกการประชุมในรูปแบบภาพและเสียงซึ่งไฟล์ที่ได้จากการบันทึกเป็นไฟล์ .mp4

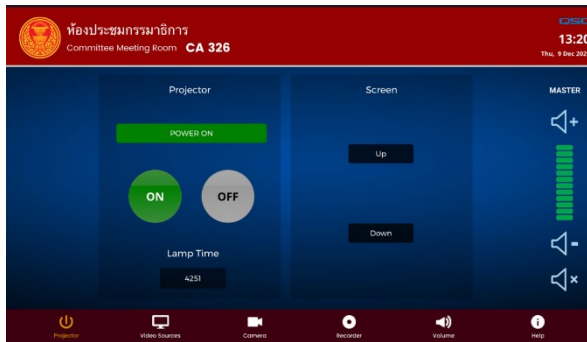


Fig. 11 The control projector

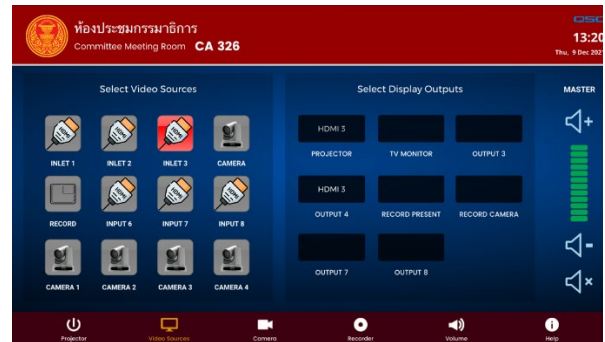


Fig. 12 The control video source

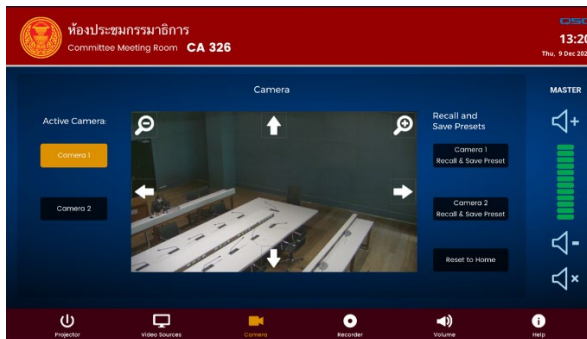


Fig. 13 The control camera

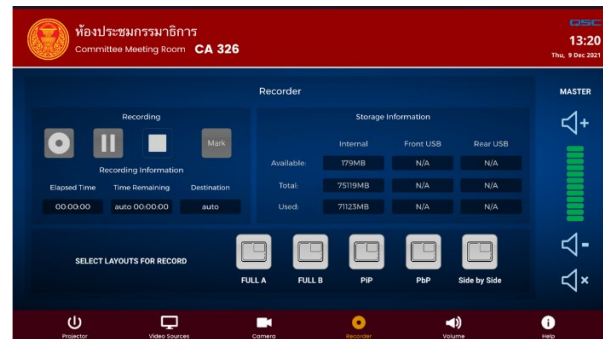


Fig. 14 The meeting recording control

ผลการประเมินคุณภาพจากการใช้งานระบบห้องประชุมรัฐสภารายละเอียดดังนี้ ประชากรคือข้าราชการรัฐสภา 23 สำนัก 3 กลุ่มงาน 1 กลุ่ม ขนาดประชากรทั้งหมดจำนวน 2,041 คน กำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยใช้สูตรการคำนวณ ทฤษฎีเชิงสถิติในการศึกษาครั้งนี้ได้ขนาดกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 334 คน โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ความคาดเคลื่อน 0.05 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลใช้ลักษณะเป็นแบบสอบถามปลายเปิด โดยเกณฑ์การวิเคราะห์ระดับการประเมินใช้การคำนวณค่าเฉลี่ย 5 ระดับดังนี้ ค่าเฉลี่ย 4.50–5.00 หมายถึงดีมาก ค่าเฉลี่ย 3.50–4.49 หมายถึงดี ค่าเฉลี่ย 2.50–3.49 หมายถึงปานกลาง ค่าเฉลี่ย 1.50–2.49 หมายถึงพอใช้ และค่าเฉลี่ย 1.00–1.49 หมายถึงปรับปรุง การเก็บรวบรวมข้อมูลประมวลผลด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งแบบสอบถามประเมินคุณภาพจากการใช้งานระบบ ห้องประชุมรัฐสภา 4 ด้าน ได้แก่ (1) การใช้งานง่ายและความเร็วในการเข้าถึงระบบ (2) การตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน (3) ความถูกต้องในการทำงานของระบบ และ (4) ระบบการรักษาความปลอดภัย การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เป็นการหาค่าทางสถิติพื้นฐาน เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ผลประเมินคุณภาพการใช้งานระบบห้องประชุมรัฐสภา เมื่อพิจารณาจะพบว่าด้านการใช้งานง่ายและความรวดเร็วในการเข้าถึงระบบมีคุณภาพอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 3.99$, $SD = 0.47$) ความสามารถในการตอบสนองของระบบต่อผู้ใช้อยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 3.95$, $SD = 0.64$) ความถูกต้องในการทำงานของระบบอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 3.84$, $SD = 0.53$) ด้านความมั่นคงปลอดภัยของระบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 3.95$, $SD = 0.14$) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงภาพรวมของคุณภาพการใช้งานระบบห้องประชุมรัฐสภามีค่าอยู่ในระดับมากคือ ($\bar{x} = 3.93$, $SD = 0.51$)

ผลการประเมินคุณภาพการบริหารจัดการระบบห้องประชุมรัฐสภารายละเอียดดังนี้

Table 1 The results of the quality assessment of the use of the meeting room management system with staff member of the Secretariat of the House of Representatives

Detail	\bar{x}	SD	Assessment results
1. Ease of use and the speed to accessing the system			
1.1 Ease of access to the system and its parts	3.97	0.43	Grate value
1.2 System accuracy and speed	3.97	0.52	Grate value
1.3 Displays images and works quickly	3.95	0.41	Grate value
1.4 Ease of use of the meeting room management system	4.08	0.53	Grate value
Average	3.99	0.47	Grate value
2. System response to users			
2.1 The working procedure of the system is correct	3.89	0.69	Grate value
2.2 System reliability	3.93	0.66	Grate value
2.3 Service request response speed	3.95	0.71	Grate value
2.4 Accuracy in responding to user requests	4.02	0.48	Grate value
2.5 The accuracy of the data according to the needs of the system user	3.95	0.68	Grate value
Average	3.95	0.64	Grate value
3. System operation accuracy			
3.1 The system can work properly	3.83	0.55	Grate value
3.2 The system can be used continuously	3.85	0.54	Grate value
3.3 The system can work without any errors	3.83	0.51	Grate value
Average	3.84	0.54	Grate value
4. System security			
4.1 Ability to protect data and information in use	3.95	0.41	Grate value
4.2 Protection of user information	3.95	0.41	Grate value
Average	3.95	0.41	Grate value

สรุป

การบริหารจัดการการประชุมรัฐสภาไทย เป็นการศึกษา ออกแบบ พัฒนาระบบ เพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงานให้กับสมาชิกสภาผู้แทนราษฎร สมาชิกวุฒิสภา ข้าราชการ บุคลากรในวงงานรัฐสภา ด้วยเทคโนโลยีคลาวด์ทำการเชื่อมโยงระบบเครือข่ายของรัฐสภา เข้าถึงระบบข้อมูล สารสนเทศหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งถ่ายโอน จัดเก็บข้อมูล และใช้เทคโนโลยี Mobile Application ผ่านอุปกรณ์ Smart Device เช่น Tablet หรือ Smart Phone ในการเข้าถึงระบบใช้งานของห้องประชุม การควบคุมอุปกรณ์ภาพ และเสียง รวมทั้งการเชื่อมต่อสัญญาณอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องประชุม โดยการพัฒนากระบวนการประชุม การออกแบบระบบข้อมูล การจัดเก็บ การเชื่อมโยงฐานข้อมูล การแสดงผลต่างๆ รวมถึงการประเมินผล จากการประเมินคุณภาพการใช้งาน พบว่าการบริหารจัดการห้องประชุมรัฐสภาดิจิทัล สามารถให้บริการระบบสารสนเทศที่มีประสิทธิภาพ ถูกต้อง รวดเร็ว มั่นคงปลอดภัย ประสิทธิภาพ สนับสนุนการปฏิบัติงานได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน เป็นการให้ประโยชน์จากเทคโนโลยีดิจิทัลและระบบสารสนเทศ ทิศทางในอนาคตรัฐสภาจะมีแผนการพัฒนารัฐสภาดิจิทัลดังนี้ (1) ปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารให้มีความทันสมัยรองรับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี (2) บูรณาการใช้ข้อมูลร่วมกันของหน่วยงานภายในสังกัดรัฐสภาและหน่วยงานภายนอก (3) พัฒนาระบบเครือข่ายสื่อสารให้มีความพร้อมใช้งานตลอดเวลาและมีความปลอดภัยตามมาตรฐาน ในส่วนของงานประชุมพัฒนาระบบการประชุมแบบออนไลน์ (Video Conference) ให้ผู้เข้าประชุมสามารถประชุมได้โดยไม่มีข้อจำกัด ด้านอุปกรณ์ ด้านเวลา และสถานที่ อีกทั้งการประชุมแบบผสมผสาน (Hybrid Meeting) เป็นการบูรณาการประชุมให้สามารถลงทะเบียน ตรวจสอบองค์ประชุมการยืนยันตัวบุคคลผ่านการตรวจจับใบหน้า (Face Detection) และรายงานผลองค์ประชุม การใช้เอกสารการประชุมร่วมกัน ตลอดไปถึงการลงคะแนนเสียง (e-Voting) ผ่านอุปกรณ์ต่างๆ (Smart Device)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักสารสนเทศ ที่ให้โอกาสและสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งบุคลากรสำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎรและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือตั้งแต่เริ่มต้นเก็บข้อมูล ตลอดถึงการทดสอบและประเมินผลจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อนึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานได้อย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- กัลยา วานิชย์บัญชา, วิฐิตา วานิชย์บัญชา. (2562). การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. กรุงเทพฯ. ธรรม จีรังสุวรรณ. (2555). หลักการออกแบบและประเมิน. กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ณัฐฐิธมน หีบจันทร์กรี, ดุษฎี เทิดบารมี, ปวิช ผลงาม. (2560). ระบบการบริหารจัดการงานของห้องประชุม สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา. วารสารก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์ 17(1): 37–58.
- ธนากร หมั่นหลุกง, อรรถพล วิรัตน์, สุรศักดิ์ ตำน้อย. (2556). ระบบของห้องประชุมมหาวิทยาลัยราชภัฏเลย. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม ครั้งที่ 2. หน้า 365–370.

- ปิยวัฒน์ ชวนวารี, โสภรัตน์ พิบูลย์มณี. 2563. การพัฒนาระบบของห้องศึกษารายกลุ่มหอสมุดและคลังความรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ PULINET. ครั้งที่10: Library Transformation in a Disrupted World. หน้า 1–12.
- พัชรี สื่อเพ็ง, ภาสกร นุชเทียน, สุริยะ พุ่มเฉลิม. 2564. การออกแบบและพัฒนาระบบของคอร์สเรียนทำขนมกับผู้สอนอิสระบนอินเทอร์เน็ตด้วยวิธีเชิงโครงสร้าง. ใน: การประชุมวิชาการเสนอผลงานระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ครั้งที่ 4. หน้า 1–8.
- สุทรรศน์ สุคำภา. 2558. การพัฒนาระบบบริหารจัดการห้องประชุมวิทยาลัยนครราชสีมา. ใน: การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ วิทยาลัยนครราชสีมา “สร้างสรรค์และพัฒนาเพื่อก้าวสู่ประชาคมอาเซียน” ครั้งที่ 2. หน้า 166–172.
- อรวรรณ ศรีโสมพันธ์. 2558. ประชากรและการสุ่มตัวอย่าง: การวิจัยเชิงปริมาณ. เอกสารประกอบโครงการอบรมโครงการ สร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ (ลูกไก่). มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- โสภาส รักแหยม. 2559. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง E-S-QUAL เพื่อวัดระดับคุณภาพบริการของระบบสอบถามปัญหาในการเรียนกวดวิชาแบบเรียนรู้ด้วยตนเองผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์: กรณีศึกษาโรงเรียนกวดวิชาอรดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Matkovic, P., Tumbas, P. 2010. A Comparative Overview of the Evolution of Software Development Models. International Journal of Industrial Engineering and Management 1(4): 163–172.

สาขาวิทยาศาสตร์
(Subject: Science)

ภาคโปสเตอร์
(Poster Presentation)

Hydrothermal synthesis of zinc oxide nanoparticles under different reaction times and zinc sources

Khemmanich Khamenkit^a, Suthee Wattanasiriwech^a, Chuleeporn Thanomsilp^b, Darunee Wattanasiriweach^{a,*}

^aMaterials engineering Programme, School of science, Mae Fah Luang University, Chiang Rai 57100, Thailand

^bApplied Chemistry Programme, School of science, Mae Fah Luang University, Chiang Rai 57100, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: darunee@mfu.ac.th

Abstract

In this work, ZnO particles with different morphologies and particle sizes have been prepared by the hydrothermal method using various time and zinc sources. The obtained ZnO powders were characterized for phase identification, morphology, elemental composition, and photocatalyst activity by X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), energy dispersive X-ray analysis (EDS), and UV-Vis absorption spectrum, respectively. The experimental results confirm that all hydrothermally synthesised ZnO samples crystallized into a wurtzite hexagonal structure. The morphology and particle size of the product are influenced by processing parameters, e.g., reaction time and zinc sources. During which the reaction time is increased, the morphology changes from the rod-like shape to the sphere-like shapes and the size decreases, which has an influence on the photocatalytic activity, even though small particles with the rod-like shapes and the spherical-like shapes are more active in photocatalytic activity.

Keywords: Hydrothermal method, Methylene blue degradation, Photocatalyst activity, ZnO nanoparticles

Introduction

Zinc oxide (ZnO), as a material with appealing characteristics, has caused considerable interest, particularly after the advent of nanoparticle manufacturing. High luminescent efficiency, a wide band gap (3.36 eV), and a large exciton binding energy (60 meV) have triggered intense research on the production of nanoparticles using different synthesis methods and on their future applications (Gan et al., 2020).

Hydrothermal synthesis is one of the most used methods for preparation of nanomaterials because the process involves low temperature, usually between 100°C to 300°C, simple equipment, low cost and environmentally friendly. It also has excellent control over the particle size, structure, and morphology of the products (Wasly et al., 2018). According to Chen et al., 1999 report that zinc oxide powders with different particle morphologies and sizes have been obtained via the hydrothermal process using different organic compounds as template agents. The reaction temperature significantly influences the particle morphology. Increasing the temperature, the particle morphologies change from rod-like to polyhedral (Chen et al., 1999). Polsongkram et al. (2008) experiments, systemically studied the influence of $[Zn^{2+}]$ concentration, growth temperature and time on the morphology of the ZnO nanorods. The results show that the sizes of nanorods are strongly dependent on $[Zn^{2+}]$ concentration. This, in turn, has an effect on nanoparticles' physical and chemical properties on ZnO.

Photocatalytic degradation oxidizes complex organic compounds into small molecular inorganic substances, such as carbon dioxide and water, under light. Methylene blue (MB) is cationic dyes used to tone down silk colors as well as dye paper and office supplies. Due to its complex aromatic structures, hydrophilic nature, and high stability against light, temperature, water, chemicals, and other factors, it cannot be eliminated by traditional treatment processes, and it may cause significant environmental pollution (Hou et al., 2018). As a result, photocatalytic oxidation is considered as one of the most efficient ways of methylene blue degradation. consequently, the present study is aimed to investigate the synthesis of ZnO nanoparticles utilizing the hydrothermal process with various reaction times and zinc sources, as well as the effects of particle size and morphology on MB photocatalytic degradation.

Methodology

Preparation of ZnO nanoparticles by hydrothermal method

ZnO nanoparticles were synthesized by the hydrothermal method using zinc acetate, zinc nitrate and deionized water as precursors. 0.125 M zinc sources solution was prepared in 40 ml deionized water under stirring. To this solution, NaOH 5M solution was added by slowly dropping under continuous stirring until pH was 10. The solution was transferred into Teflon lined sealed autoclave and heated at 150°C for 12 hr, 15 hr, 18 hr, and 21 hr, a hours under autogenous pressure. It was then allowed to cool naturally to room temperature. After the reaction was completed, the resulting white solid product was washed with deionized water and ethanol by centrifuge filtered and then dried in the air in a laboratory oven at 60°C.

Photocatalyst activity

Photocatalytic degradation of methylene blue by the photocatalyst of the ZnO was studied under UVA light irradiation. In this experiment, ZnO weight 50 mg was dispersed in 50 ml of methylene blue solution whose initial concentration of MB is 10 ppm by various particle sizes, and the varying in concentration in methylene blue were 30 and 50 ppm, in dark conditions in order to achieve certain adsorption equilibrium on the surface of the catalysts. The suspension was irradiated by a UVA lamp. After every 15 min of irradiation, part of the suspension was collected for testing UV-Vis, and their UV-Vis spectra were recorded. and poured the suspension back into its original location. The efficiency of photocatalytic reaction of dye according to Equation 1 and the amount of dye adsorbed on adsorbent (q_e) according to Equation 2.

$$\text{The percent methylene blue concentration removal} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{The amount of dye adsorbed on adsorbent at time } (q_t) = \left(\frac{C_0 - C_t}{M} \right) \times V \quad (2)$$

Where q_t is the amount of dye adsorbed on adsorbent at time (mg/g), C_0 and C_e are the initial and equilibrium of dye concentration (mg/L) in solution, respectively, V is the volume of solution (L), and M is the weight of adsorbent (g) (Muslim et al., 2017).

Result and Discussion

Preparation of ZnO nanoparticles by hydrothermal method

From Table 1 The results show that the reaction times and zinc sources have an effect on the morphology and particle size of the ZnO nanoparticles produced. Due to the obvious difference in growth rates, rod-like, spherical-like, and wire shapes of ZnO nanoparticles were produced from different foctos. Zinc acetate reactions produces rod-like shape at 12–18 hr and spherical-like and at 21 hr Zinc nitrate reaction produces almost spherical-like shapes at 12 hr, 18 hr and 21 hr. At 15 hr, it produces a wire shape, and also all morphology has effect on methylene blue degradation.

Table 1 ZnO particle sizes and morphology at various times and zinc sources

Reaction times (hr)	Zinc source	Particle Property		
		Morphology	Particle's size (nm)	
			Length	Width
12	Zinc acetate	Rods-like	271.5	172.3
	Zinc nitrate	Spherical-like	125.6	126.51
15	Zinc acetate	Rods-like	368.7	176.95
	Zinc nitrate	Wire	327.75	133.83
18	Zinc acetate	Rods-like	227.23	128.13
	Zinc nitrate	Spherical-like	172.5	133.1
21	Zinc acetate	Rods-like	128.1	95.31
	Zinc nitrate	Spherical-like	125.5	131.1

ZnO synthesis through hydrothermal methods is a crystallization process directly from solutions that usually involves two steps: crystal nucleation and subsequent growth (Wasly et al., 2018). Reaction time and zinc sources are controlled by adjusting processing factors. With increasing reaction time from 12-21 h. of zinc acetate and zinc nitrate reactions, the ZnO nanoparticles appeared in clusters of smaller nanoparticles coalescing and forming larger particles (Wasly et al., 2018). The morphological evolution of the nanostructures occurred under excess reaction time. at higher reaction time, the morphology changed from the rod-like shape to a sphere-like shape with a decrease in particle size because of the phenomena underlying the size and morphology control through tuning the process, as a result of zinc acetate and zinc nitrate reaction, the particle size increased at 12 to 15 hr and then decrease at 18 and 21 hr. This is due to crystalline growth stopping as the solute precipitates into clusters of crystals and the particle size was analyzed by ImageJ for nanoparticle size distribution analysis.

X-ray diffraction (XRD)

Fig. 1 (a, b) presents the diffractograms of the ZnO microcrystals synthesised by the hydrothermal method for 12 hr, 15 hr, 18 hr, and 21 hr at 150°C by zinc acetate and zinc nitrate reaction. The position of the peaks in all the diffractograms presented in Fig. 1 (a, b), It is revealed that the polycrystalline hexagonal wurtzite structure of ZnO nanostructures with the observed peak positions is in agreement with reported data in the Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS, card no: 00-036-1451 obtained from ref. (Lah et al., 2021).

Three prominent peaks correspond to reflections from the ZnO phase's atomic planes (100), (002), and (101). It shows the stability, possible directions for grain growth, and is appointed as the minimum energy growth phase of the ZnO crystal (Lah et al., 2021).

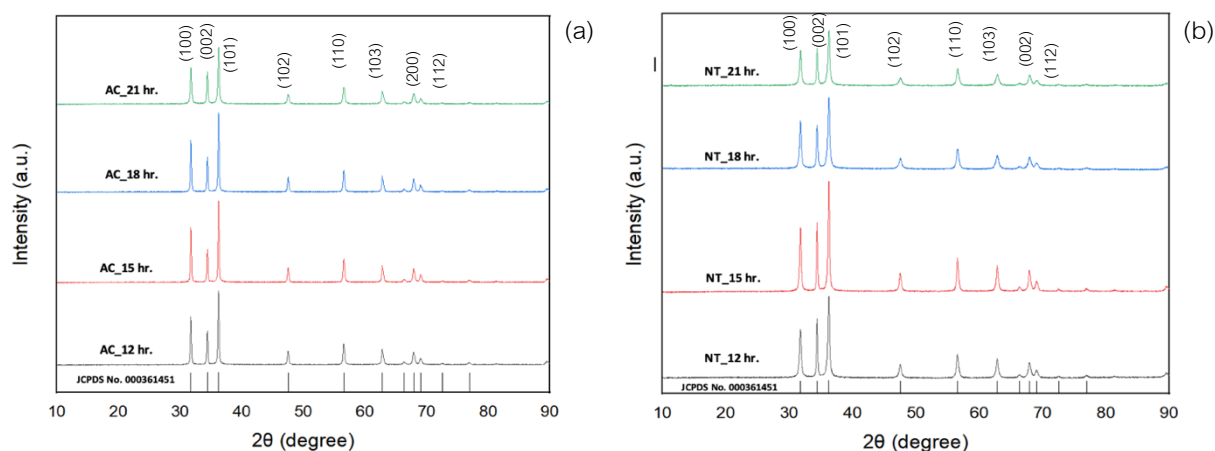


Fig. 1 The XRD diffractograms ZnO nanostructures synthesized various times and zinc sources (a) zinc acetate, (b) zinc nitrate

Table 2 presents crystal size of ZnO nanoparticles synthesized from zinc acetate with different reaction times at 150°C. The average crystal size calculated by the Scherrer equation with (100), (002), and (101) planes. The crystal size were 37 ± 1.949 , 39 ± 1.939 , 38 ± 1.867 and 31 ± 3.380 nm respectively. Similarly, when synthesized from zinc nitrate, The crystal sizes were 21 ± 5.886 , 24 ± 5.303 , 14 ± 2.161 , and 19 ± 4.872 nm respectively.

Table 2 ZnO crystal size sizes at various times and zinc sources

Zinc source	Reaction time (hr)	Crystal size (nm)
Zinc acetate	12	37 ± 1.949
	15	39 ± 1.939
	18	38 ± 1.867
	21	31 ± 3.380
Zinc nitrate	12	21 ± 5.886
	15	24 ± 5.303
	18	14 ± 2.161
	21	19 ± 4.872

Scanning Electron Microscopy (SEM)

Zinc acetate reaction at 12 hr, 15 hr, 18 hr, and 21 hr of hydrothermal synthesis. At 12 hr, 15 hr, and 18 hr, the rod-like shape appeared in Fig. 2a, 2b and 2c, but at 21 hr sphere-like shape and some rod-like shape appeared in Fig. 2d, At different reaction times of 12 hr, 15 hr, 18 hr, and 21 hr, synthesis by zinc nitrate reaction. At 12 hr, a small rod-like shape appeared in Fig. 3a, at 15 hr, a wire shape appeared in Fig. 3b, at 18 hr sphere-like and some rod-like appeared, and at 21 hr uniform sphere-like shapes appeared in Fig. 3c and

Fig. 3d respectively. Therefore, increasing of time from 12–21 hr an active site can be generated around the circumference of the ZnO nucleus, causing the ZnO to grow preferentially in the active region. According to the internal structure and growth habit of the ZnO crystal, ZnO has the behavior of preferred growth along the c-axis (Araújo et al., 2017).

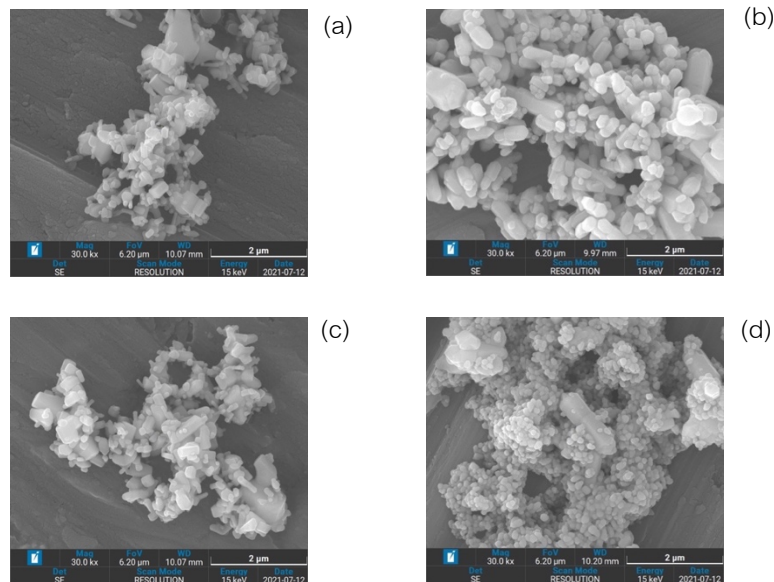


Fig. 2 Scanning electron microscopy (SEM) images of ZnO synthesis by zinc acetate at various reaction times (a) 12 hr, (b) 15 hr, (c) 18 hr, and (d) 21 hr

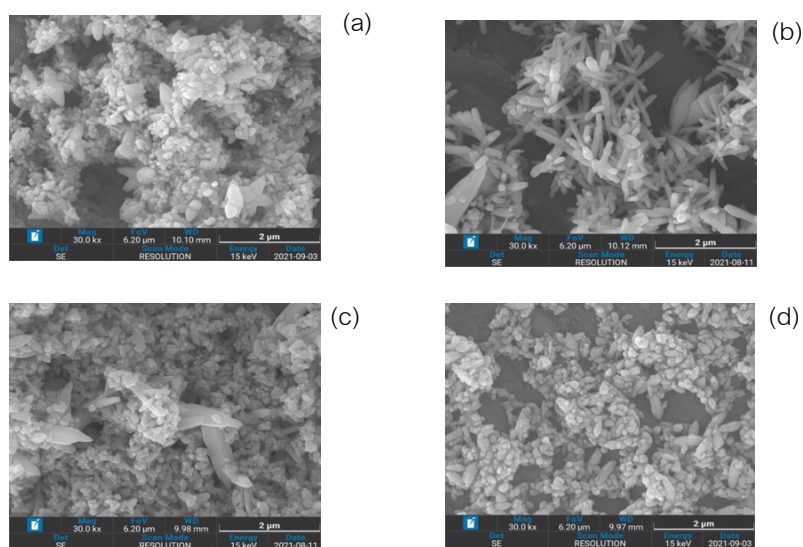


Fig. 3 Scanning electron microscopy (SEM) images of ZnO synthesis by zinc nitrate at various reaction times (a) 12 hr, (b) 15 hr, (c) 18 hr and (d) 21 hr

Photocatalyst activity

The effect of variation in particle size of ZnO for an initial MB concentration of 10 ppm was shown in Fig. 4.

The experiments were carried out using ZnO by zinc acetate reaction with several particle sizes, the results also showed that there seems to be a trend graph for the highest efficiency at 21 hr was 96% methylene blue concentration removal and qt was 9.54 mg/g, followed by 18 hr, 12 hr, and 15 hr respectively. In Fig. 5 ZnO by zinc nitrate reaction the highest efficiency at 12 hr was 92% methylene blue concentration removal and qt was 9.17 mg/g, followed by 15 hr, 21 hr, and 18 hr, respectively. As a result, efficiency is influenced by particle sizes and morphology, which increasing a reaction time from 12–21 hr The rod-like and spherical-like shapes provide greater percent methylene blue concentration removal due to the reduction in particle size (Marotti et al., 2004). Likewise, the higher adsorption with smaller adsorbent particles may be observed because smaller particles have larger surface areas. The particle size decreases, and the surface area exposed to ZnO of MB (Zuo et al., 2014).

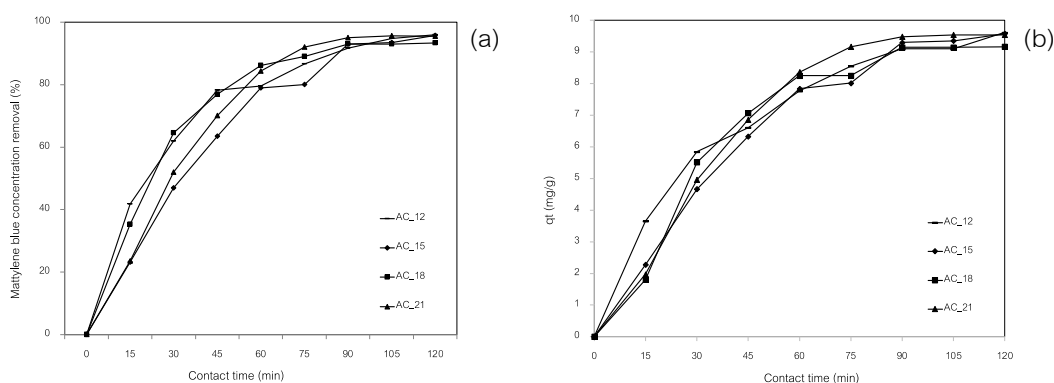


Fig. 4 Photocatalyst activity (a) Methylene blue concentration removal of ZnO by zinc acetate-synthesised, (b) The amount of dye adsorbed on adsorbent at time (qt) of ZnO by zinc acetate-synthesised

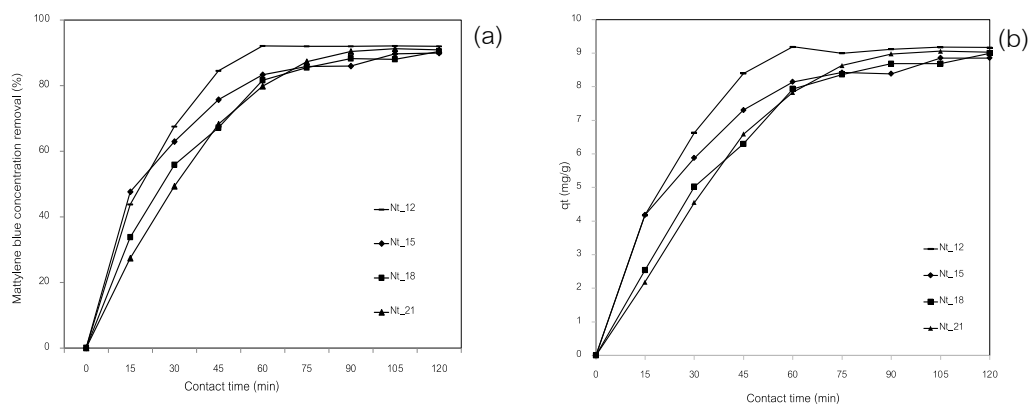


Fig. 5 Photocatalyst activity (a) Methylene blue concentration removal of ZnO by zinc nitrate-synthesised, (b) The amount of dye adsorbed on adsorbent at time (qt) of ZnO by zinc acetate-synthesised

The effect of MB concentration (between 10, 30 and 50 ppm) on the removal and adsorption of MB onto the ZnO was studied. Fig. 6 showing comparing percent Methylene blue concentration removal of ZnO synthesis by zinc nitrate at 12 hr with the hydrothermal method, shown that the highest percent removal is about 92% and the qt was 9.169 mg/g at 10 ppm, followed by 30 ppm and 50 ppm, which were 44%, 19%, 12.918 mg/g,

and 10 mg/g, respectively. It means that the adsorption is highly dependent on the initial concentration of MB. because at the lower concentrations, the ratio of the initial number of MB molecules to the available surface area is low, and subsequently the fractional adsorption becomes independent of the initial concentration. However, at high concentrations, the available sites of adsorption become fewer, and hence the percentage removal of MB is dependent upon the initial concentration (Khodaie et al., 2013).

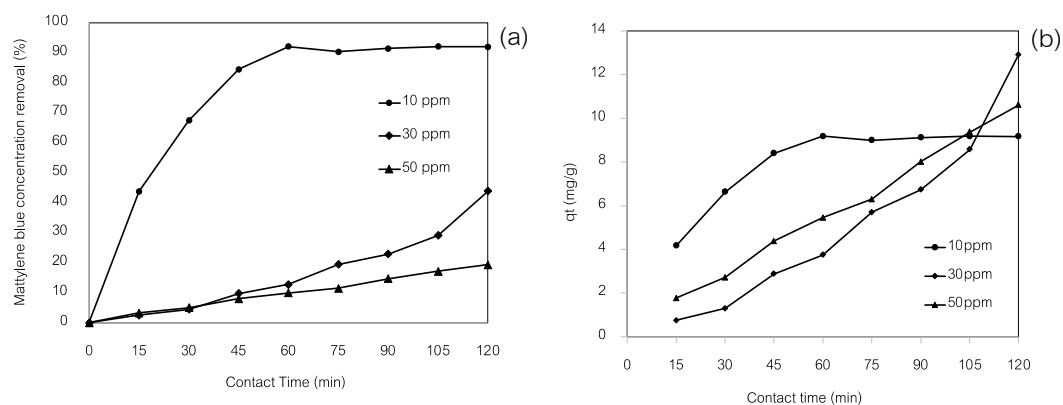


Fig. 6 Photocatalyst activity (a) Methylene blue concentration removal of ZnO, (b) The amount of dye absorbed on adsorbent at time (qt) by various concentration of methylene blue

Conclusion

Hydrothermal methods can be used to synthesize zinc oxide nanoparticles of various sizes and morphologies. During the hydrothermal process, their morphologies and sizes changed with the reaction of time and zinc sources. Zinc acetate had a more rod-like shape, and zinc nitrate had a more spherical-like shape, and can be reduced in size by increasing the reaction time from 12–21 hr. Photocatalysis activity was influenced by morphologies and size. With rod-like and spherical-like morphologies, it would be active in small particle sizes. ZnO synthesized by zinc nitrate for 12 hr resulting in 92% methylene blue concentration removal, and qt was 9.12 mg/g provide that it is a good productive when compared with commercial. Therefore, change in removal ability depends on the size and morphology of nanoparticles.

References

- Araújo, E.A., Nobre, F.X., Sousa, G.D.S., Cavalcante, L.S., Rita De Moraes Chaves Santos, M., Souza, F.L., Elias De Matos, J.M. (2017). Synthesis, growth mechanism, optical properties and catalytic activity of ZnO microcrystals obtained via hydrothermal processing. *RSC Adv.* 7(39): 24263–24281. doi.org/10.1039/c7ra03277c
- Gan, Y.X., Jayatissa, A. H., Yu, Z., Chen, X., Li, M. (2020). Hydrothermal synthesis of nanomaterials. *J. Nanomater* 2020: 8917013. doi.org/10.1155/2020/8917013
- Hou, C., Hu, B., Zhu, J. (2018). Photocatalytic degradation of methylene blue over TiO₂ pretreated with varying concentrations of NaOH. *Catalysts.* 8(12): 575. doi.org/10.3390/catal8120575

- Khodaie, M., Ghasemi, N., Moradi, B., & Rahimi, M. (2013). Removal of methylene blue from wastewater by adsorption onto ZnCl₂ activated corn husk carbon equilibrium studies. *Journal of Chemistry* 2013: 383985. doi.org/10.1155/2013/383985
- Lah, N.A.C., Kamaruzaman, A., Trigueros, S. (2021). Ph-dependent formation of oriented zinc oxide nanostructures in the presence of tannic acid. *Nanomaterials*. 11(1): 1–14. doi.org/10.3390/nano11010034
- Marotti, R.E., Guerra, D.N., Bello, C., Machado, G., Dalchiele, E.A. (2004). Bandgap energy tuning of electrochemically grown ZnO thin films by thickness and electrodeposition potential. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 82(1–2): 85–103. doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.008
- Muslim, Z., Aadim, K., Kadhim, R. (2017). Preparation of ZnO for photocatalytic activity of methylene blue dye. *Int. J. Basic Appl. Sci*. 6(1): 1–7. doi.org/10.17142/ijbas-2017.6.1.1
- Wasly, H.S., El-Sadek, M.S.A., Henini, M. (2018). Influence of reaction time and synthesis temperature on the physical properties of ZnO nanoparticles synthesized by the hydrothermal method. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process* 124(1) 1–12. doi.org/10.1007/s00339-017-1482-4
- Zuo, R., Du, G., Zhang, W., Liu, L., Liu, Y., Mei, L., Li, Z. (2014). Photocatalytic degradation of methylene blue using TiO₂ impregnated diatomite. *Adv. Mater. Sci. Eng*. 2014: 170148. doi.org/10.1155/2014/170148

Extraction of the metal from used zinc-carbon primary batteries

Prakornkit Taphat, Supak Pattaweepaiboon, Weekit Sirisaksoontorn*

Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science,
Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fsciwks@ku.ac.th

Abstract

The metallic components (zinc and manganese) in used zinc-carbon primary batteries were successfully separated from cathode black powder by using acidic- H_2SO_4 leaching process. With the presence of H_2O_2 as a reducing agent, both zinc and manganese were completely leached out from the black powder in the forms of free cations (Zn^{2+} and Mn^{2+}). The concentrations of zinc and manganese as analyzed by ICP-OES were found to be 25.41%wt of zinc and 29.99%wt of manganese. To separate Zn^{2+} from Mn^{2+} in the leaching solution, oxalic acid was used as a precipitating reagent in which ZnC_2O_4 was firstly formed under the optimal condition. However, few amounts of MnC_2O_4 was also found as a co-precipitating product. After filtration of ZnC_2O_4 white solid, Mn^{2+} in the solution was further precipitated by adding K_2CO_3 to yield MnCO_3 pale-brown solid. The crystal structures of ZnC_2O_4 and MnCO_3 precipitates were confirmed by the XRD results and their thermal behaviors were also investigated by TGA analyses. In addition, the EDX spectrum showed the negligible amount of zinc present in the MnCO_3 precipitates.

Keywords: Acidic leaching, Precipitation, Used zinc-carbon primary batteries

Introduction

In today's world, every human being cannot deny that portable electronic devices have many roles in daily life such as mobile phones, iPods, tablets, digital cameras, multimedia players, and computers. Among all these devices, it is necessary to use batteries, which act as a source of electrical energy from chemical reactions. There are many types of batteries, including single-use disposable batteries (zinc-carbon primary batteries and alkaline batteries) and rechargeable batteries (nickel-cadmium batteries, nickel-metal hydride batteries, and lithium/lithium-ion batteries). However, when the battery is used for a long time, it deteriorates or expires. Especially, single-use batteries need to be discarded and day by day their quantity is increasing, which definitely causes electronic wastes. In Thailand, it is found that the total market value of batteries is more than 4,500 million baht per year. However, it has been surprising that Thailand still does not have a system to separate used zinc-carbon primary batteries from the general waste. Therefore, used zinc-carbon primary batteries were discarded with the general waste and got rid of by means of burial in community landfills. When the used battery is exposed to rainwater that seeps down or acidic leachate, the toxic substances in the battery, consisting of carbon powder, zinc, cadmium, nickel, cobalt, mercury, and manganese, can contaminate surface water, groundwater, and atmosphere. These substances can directly spread to people, plants, and animals, which causes sudden illness or chronic. Therefore, measures for separating battery waste should be an urgent measure.

Herein, we report development of the metallic extraction of cathode black powder from used zinc-carbon primary batteries. Based on the acidic leaching, both Zn^{2+} and Mn^{2+} were totally extracted from the black powder and dissolved in the solution. The fractional precipitation of Zn^{2+} was studied upon addition of oxalic acid under varied conditions to obtain the highest amount of ZnC_2O_4 precipitate whereas most Mn^{2+} remained in the solution. After separation of ZnC_2O_4 , Mn^{2+} was further precipitated out in the form of $MnCO_3$. The products obtained from precipitation from each step were also characterized.

Materials and Methods

Dismantling of used zinc-carbon primary batteries

Parts of the used zinc-carbon primary battery were dismantled and separated into the cathode black powder, zinc anode plate, graphite rod, steel casing, plastic film, paper, and small pieces for the sealing material as shown in Fig. 1. The black powder was washed with hot DI water and dried in the oven. The weight of dried black powder was then recorded.

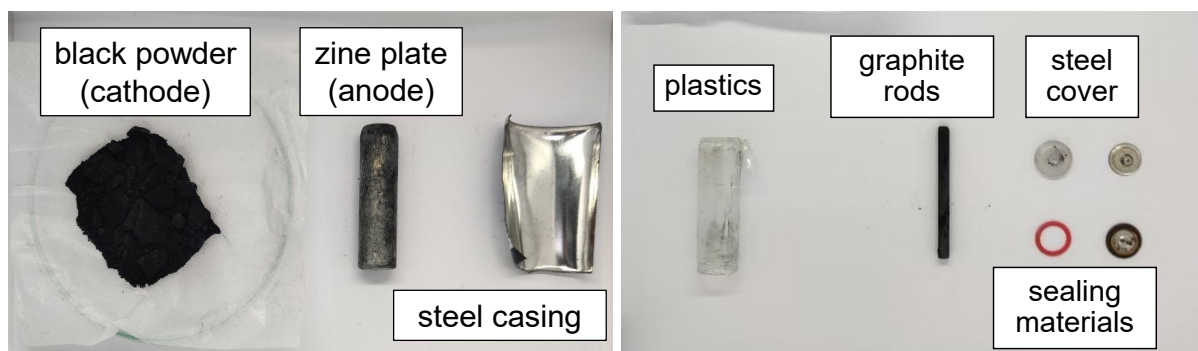


Fig. 1 Parts of the used zinc-carbon primary battery

Acidic leaching of zinc and manganese from the black powder of used zinc-carbon primary batteries

5.0000 g of black powder was added into 90 mL of 2 M sulfuric acid solution (H_2SO_4). The solution was sonicated homogeneously at 30°C for 5 min for 3 times. After that, the solution was stirred and heated to 80°C and then 10 mL of 30% H_2O_2 solution was gradually added. After stirring for 3 h, the solution was filtered to separate remaining solid powder after leaching. The leaching solution was made up to 100 mL by 2 M H_2SO_4 in a volumetric flask. The structure of the black powder before and after leaching was determined using XRD, and the quantitative amount of metal dissolved in the leaching solution was also determined using IPC-OES.

Separation process of zinc from manganese in the leaching solution

20 mL of the leaching solution was mixed with 1 M oxalic acid solution ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) to precipitate zinc under the variation of $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ amount and pH. Then, the resulting white precipitates were filtered and analyzed by XRD and TGA techniques. After precipitation by oxalic acid, the amount of zinc and manganese in the filtrate solution was also analyzed quantitatively by IPC-OES.

Separation process of manganese in the solution

1 M K_2CO_3 solution was gradually dropped into the solution from step 3 until pH 8–9 and the mixture was stirred for 24 h. The pale brown solid of MnCO_3 was filtered, washed with copious amount of DI water and dried in air. The crystal structure and thermal behavior of MnCO_3 were investigated using the XRD and TGA techniques, respectively.

Results and Discussion

The weight of black powder before and after washed was calculated as a percentage of black powder weight compared with weight of a whole zinc-carbon battery. The weights of black powder were found to be 53.68% before washing and 52.44% after washing.

Acidic leaching of zinc and manganese from the black powder of used zinc-carbon primary batteries

Before leaching, the XRD pattern of cathode black powder was shown in Fig. 2a and there exists several forms of manganese oxide compounds, including MnO_2 (JCPDS 44-0141), Mn_2O_3 (JCPDS 41-1442), and Mn_3O_4 (JCPDS 80-0382), as well as carbon and zinc compound. These products from black powder in used zinc-carbon batteries were obtained from the discharge process according to Equations 1 and 2:

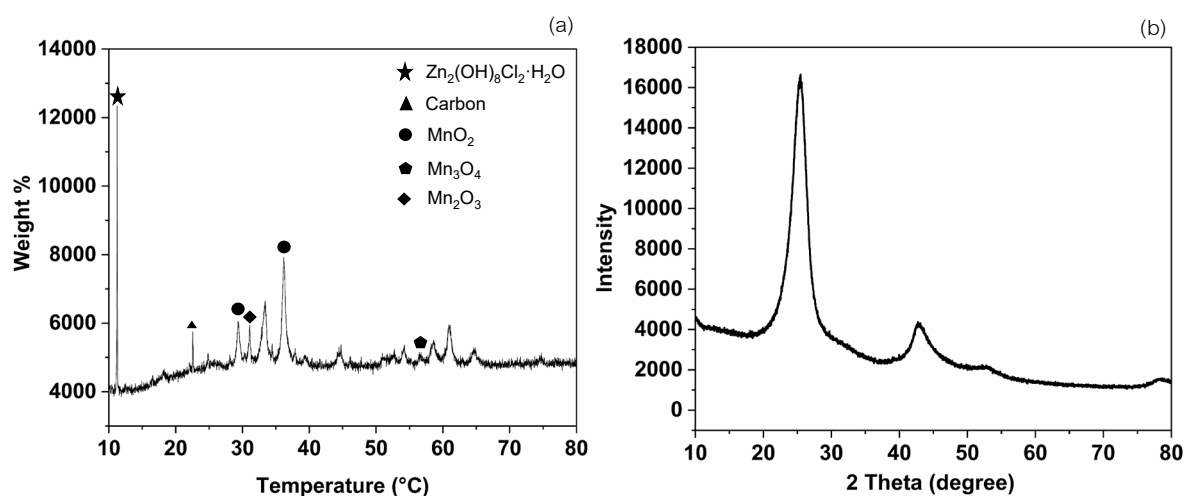
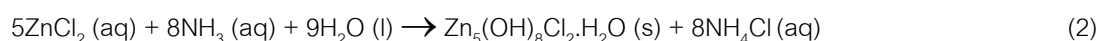
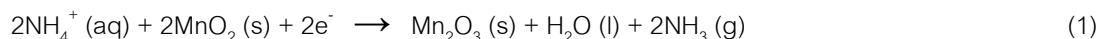
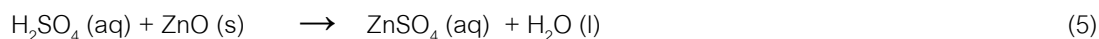
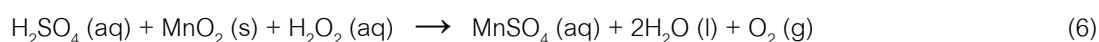


Fig. 2 XRD patterns of black powder (a) before leaching and (b) after leaching

Upon addition of H_2SO_4 for leaching, manganese oxide was partially dissolved, except MnO_2 which is insoluble under the acidic condition as shown in Equations 3 and 4. Meanwhile, zinc compounds; e.g. ZnO and $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ were easily dissolved under this condition as exemplified in Equation 5.



To improve the solubility of MnO_2 in acidic condition, H_2O_2 was added to reduce Mn^{4+} to Mn^{2+} , giving rise to a dissolution of MnO_2 as shown in Equation 6. From the XRD result in Fig. 2b, it is obvious that only graphitic carbon was left in the black solid.



Moreover, the amounts of zinc and manganese in the leaching solution from ICP-OES are shown in Table 1.

Table 1 Contents of zinc and manganese in the leaching solution

Sample	Weight (mg)	Zn (mg)	Mn (mg)	Percent weight of Zn (% w/w)	Percent weight of Mn (% w/w)
Leachate 1	5000.4	1254.58	1494.63	25.09	29.89
Leachate 2	5000.2	1264.89	1507.77	25.30	30.15
Leachate 3	5000.4	1293.03	1497.16	25.85	29.94
Average				25.41	29.99

Separation process of zinc from manganese in the leaching solution

Upon addition of 1 M $H_2C_2O_4$ into 20 mL of the leaching solution, zinc was firstly precipitated out in the form of ZnC_2O_4 due to a lower K_{sp} compared to manganese oxalate. It was found that the amount of $H_2C_2O_4$ and pH range were optimized to obtain the highest fraction of zinc precipitates in the solution. The percentages of precipitation of both metals were calculated and the results are shown in Table 2.

Table 2 Contents of zinc and manganese found in solution after precipitation with $H_2C_2O_4$

Sample	Volume of leaching solution per $H_2C_2O_4$	pH	Zn in solution (mg)	Mn in solution (mg)	Precipitation amount of Zn (% w/w)	Co-precipitation amount of Mn (% w/w)
1	1 : 1	0	15.84	231.11	92.16	12.38
2	1 : 1	0.1	7.60	125.02	93.87	13.06
3	1 : 1	0.2	14.14	227.08	92.28	13.98
4	1 : 2	0	13.39	117.67	89.67	21.66
5	1 : 2	0.1	8.91	114.41	93.12	23.83
6	1 : 2	0.2	7.08	122.88	94.54	18.19
7	1 : 3	0	8.90	278.98	95.18	20.12
8	1 : 3	0.1	3.01	196.64	98.44	42.52
9	1 : 3	0.2	2.97	161.24	98.46	52.87

Note: For the condition optimization, it was found that a 1:1 ratio of leaching solution to $H_2C_2O_4$ at pH of 0.1 could provide the highest efficiency in separation of zinc from manganese. Fig. 3 shows the percentage plot of precipitation of zinc in the range of 92–93% w/w at different pH but, still, there was co-precipitation of manganese about 10% w/w.

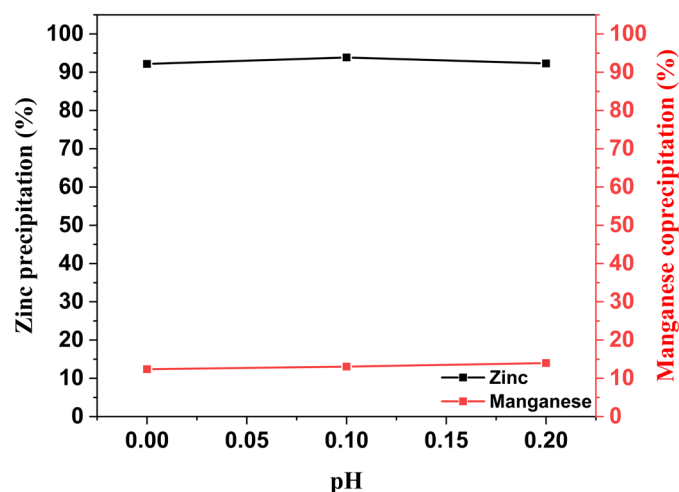
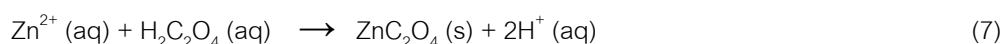


Fig. 3 Percent precipitation of zinc and manganese by using H₂C₂O₄ with the 1:1 volumetric ratio at different pH

Upon addition of H₂C₂O₄, the main product was ZnC₂O₄ white precipitate according to the following reaction in Equation 7:



The precipitated product was found to be ZnC₂O₄·2H₂O (JCPDS 25-1029) as confirmed by XRD in Fig. 4a. The TGA curve of ZnC₂O₄·2H₂O in Fig. 4b has two steps of mass loss due to the dehydration at below 150°C for 19% and the decomposition of ZnC₂O₄ into zinc oxide (ZnO) at 150–350°C for 40% of the total weight.

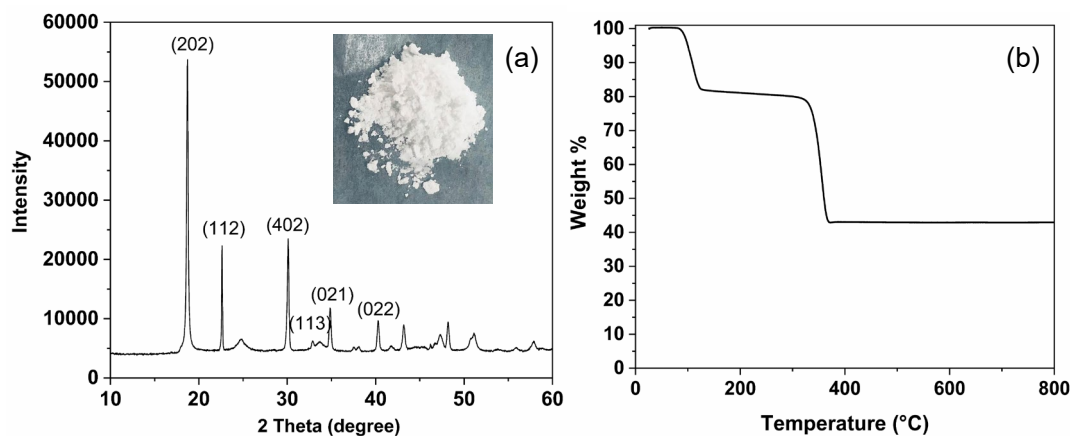


Fig. 4 (a) XRD pattern and (b) TGA curve of ZnC₂O₄·2H₂O precipitates

Separation process of manganese in the solution

To precipitate manganese remaining in the solution, 1 M K₂CO₃ was added until the pH of solution reached 8.0–9.5 in which MnCO₃ formed. The XRD pattern in Fig. 5a clearly confirms the formation of MnCO₃ (JCPDS 44-1472). In Fig. 5b, TGA curve exhibits multiple steps of mass loss which are mainly ascribed to the dehydration in the crystal structure at below 150°C and the decarbonation at 150–500°C to form the oxide compound.

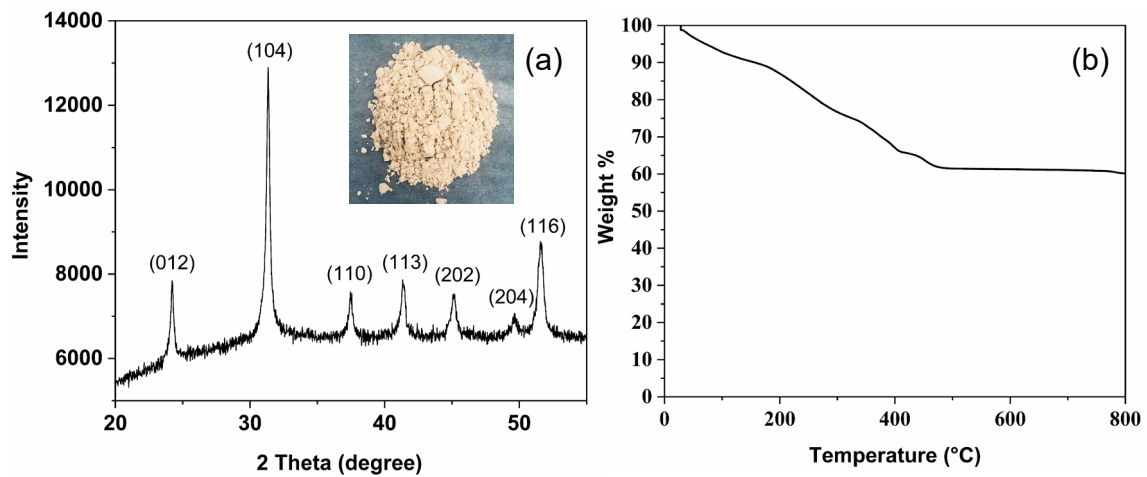


Fig. 5 (a) XRD pattern and (b) TGA curve of MnCO_3 precipitates

In addition, to study the elemental component in MnCO_3 , EDX technique was demonstrated and the result in Fig. 6 shows that manganese, carbon and oxygen are the major components in the precipitate which supports the formation of MnCO_3 . It is also important to note that only negligible amount of zinc was observed in the MnCO_3 precipitate.

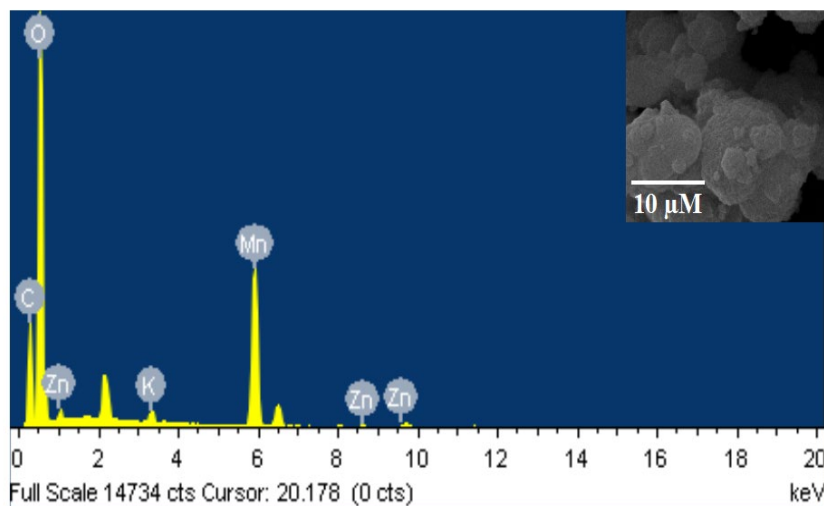


Fig. 6 EDX spectrum of MnCO_3 obtained from precipitation

Conclusion

We demonstrated the separation of zinc and manganese from used zinc-carbon primary batteries by using acidic leaching. With the presence of H_2O_2 as a reducing agent, Zn^{2+} and Mn^{2+} were successfully extracted from the cathode black powder. Under the optimal condition, the fractional precipitation of zinc in the form of ZnC_2O_4 was obtained at 92–93 %w/w. Most of manganese was precipitated in the form of MnCO_3 under the controlled pH. For both precipitate products, they can be further used as a starting material for the preparation of other oxide compounds.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

We would like to thank the Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University to support our research. Moreover, we are grateful to thank the Center of Excellence for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC), Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation.

References

- Charef, A.S., Affoune, A.M., Caballero, A., Cruz-Yusta, M., Morales, J. 2017. Simultaneous recovery of Zn and Mn from used batteries in acidic and alkaline mediums: A comparative study. *Waste Management* 68: 518–526.
- Buzatu, M., Saceanu S., Petrescu, M.I., Ghica, G.V., Buzatu, T. 2014. Recovery of zinc and manganese from spent batteries by reductive leaching in acidic media. *J. Power Sources* 247: 612–617.
- Furlani, G., Moscardini, E., Pagnanelli F., Ferella F., Vegliò F., Toro, L. 2009. Recovery of manganese from zinc alkaline batteries by reductive acid leaching using carbohydrates as reductant. *Hydrometallurgy* 99: 115–118.
- Chen, W.-S., Liao, C.-T., Lin, K.-Y. 2017. Recovery zinc and manganese from spent battery powder by hydrometallurgical route. *Energy Procedia*. 107: 167–174.
- Martha de Souza, C.C.B., Correa de Oliveira, D., Tenorio, J.A.S. 2001. Characterization of used alkaline batteries powder and analysis of zinc recovery by acid leaching. *J. Power Sources*. 103: 120–126.
- da Silva, R.G., da Silva, C.N., Afonso, J.C. 2010. Recovery of manganese and zinc from spent Zn-C and alkaline batteries in acidic medium. *Quim. Nova*. 33: 1957–1961.

Enhanced cytoplasmic polyhydroxybutyrate (PHB) granule production by recombinant *Synechocystis* sp. PCC 6803 overexpressing PhaP protein

Authen Promariya^a, Chanchanok Duangsri^a, Nat-Anong Mudtham^a, Khomson Satchasataporn^a, Supochana Charoensin^a, Suchanit Ngamkala^a, Nattaphong Akrimajirachote^b, Wuttinun Raksajit^{a,*}

^aProgram of Animal Health Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bDepartment of Physiology, Faculty of Veterinary Medicine, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: cvtwnr@ku.ac.th

Abstract

Polyhydroxybutyrate (PHB) is polyoxoesters produced by various prokaryotes and accumulated as cytoplasmic granules. PHB is important storage compound of carbon and energy in cyanobacteria. PhaP proteins are granule-associated proteins accumulated in strains producing PHB. The biosynthesis of PhaP proteins has been proposed to be dependent on PHB granule formation. The recombinant *Synechocystis* sp. PCC 6803 overexpressing *phaP* gene (OE strains) was successfully engineered. The results showed the similar growth pattern of WT and OE strains during 7 days in BG11. Particularly, PHB appeared as brightly fluorescent orange granules in *Synechocystis* sp. PCC 6803 WT and OE cells cultivated in BG11 and BG11₀ (N-deprived) media. More brightly orange granules in each cell were observed under BG11₀ than under BG11 media. Furthermore, the *phaP* transcript levels of N-deprived OE and WT cells were 1.7- and 1.4-folds, respectively, of the BG11-grown cells. The *phaP* gene of OE cells was responsible for PHB granule formation within cells grown in nitrogen-deprived condition.

Keywords: *phaP* gene, Polyhydroxybutyrate, PHB granule, *Synechocystis* sp. PCC 6803

Introduction

Polyhydroxybutyrate (PHB) is a biological and biodegradable polyester produced by bacteria and cyanobacteria. PHB is the most common important representative of PHAs (Butt et al. 2018). PHB has striking similarities to polypropylene and has therefore been expected as potential replacement candidate for polypropylene because of its eco-friendliness and biocompatibility. In addition, some cyanobacterial strains like *Synechocystis* sp. PCC 6803 accumulate PHB as a carbon and redox storage compound. Generally, *Synechocystis* sp. PCC 6803 is a unicellular non-nitrogen (N₂) fixing strain and grow under photoautotrophic, mixotrophic and heterotrophic conditions. Furthermore, it is naturally transformable by exogenous DNA (Grigorieva and Shestakov, 2006, Kufryk et al. 2002). Because of the ease and efficiency of the metabolic flexibility of the *Synechocystis* sp. PCC 6803, it has become a useful tool to study the function of the proteins. In addition, *Synechocystis* sp. PCC 6803 initially produces PHB from a combination of two molecules of acetyl-CoA to form acetoacetyl-CoA. The reaction is catalyzed by beta-ketothiolase (*phaA* gene). Then, acetoacetyl-CoA is changed to 3-hydroxybutyryl-CoA utilizing NADPH by acetoacetyl-CoA reductase (*phaB* gene). Finally, 3-hydroxybutyryl-CoA is converted to PHB by PHB synthase encoded by *phaEC* gene (Khetkorn et al. 2016). Formation and subcellular localization of PHB granules were previously assumed to occur randomly in the cytoplasm of PHB accumulating bacteria (Wahl et al. 2012). The PHB granules were covered by protein associated granule such as Phasin or PhaP protein (Pötter and Steinbüchel, 2005). Interestingly, Hauf et al (2015) described that the cyanobacterial PHA surface-coating protein (Phasin or PhaP) was encoded by *ssI2501*. It was found that a deletion of *ssI2501* reduced the number of PHB granules per cell, indicating that PHB granule-associated protein positively affected polymer synthesis and the number and size of PHB granules (Hauf et al. 2015, Pötter et al. 2004). Moreover, the PHB granule surface is more complex and is coated by various different proteins, as observed with *Ralstonia eutropha* (Jendrossek, 2009). Even though many Phasin proteins were identified, so far only a few have been studied biochemically in more details. Hence, the aim of the present work was to construct recombinant *Synechocystis* sp. PCC 6803 overexpressing *phaP* and to examine its transcription under nitrogen deprivation.

Materials and Methods

Microorganism and culture conditions

Synechocystis sp. PCC 6803 wild type (WT) and overexpressing *phaP* gene (OE) strains were cultivated in 250-mL Erlenmeyer flask with 50 mL of BG11 medium (pH~7.5) containing NaNO₃ as a source of nitrogen, or BG11 medium containing 30 µg/mL of chloramphenicol (CmR), or nitrate free medium (BG11₀), upon studied conditions. The cultures were cultivated under aerobically with white fluorescent illumination of 40 µmolE/m²/s on a rotatory shaker at 120 rpm with 28°C. Growth of liquid cultures was monitored by measuring the optical density at 730 nm (OD₇₃₀) according to Yodsang et al. (2011).

Construction of Synechocystis sp. PCC 6803 overexpressing phaP gene (OE) strain

The chromosomal DNA of *Synechocystis* sp. PCC6803 was extracted by Trizol[®] reagent following manufacturer's instruction. The *phaP* gene of *Synechocystis* sp. PCC 6803 was amplified by PCR using specific primers, namely FphaP, 5'-CCT CTA GAC ATG AAC AAC CAG TTT-3' and RphaP: 5'-TCT GCA GAA CTAG TTA GCC GAT AC-3'. The PCR conditions were as follows: initial denaturation step at 94°C for 5 min, followed by 25 cycles of denaturation at 94°C for 45 s, then annealing at 50°C for 45 s, and extension at 72°C for 45 s. A final extension step was carried out at 72°C for 10 min followed by reaction storage at 4°C. The PCR product size (~288 bp) was ligated to pEERM plasmid (Englund et al. 2015). The ligation mixture was incubated at 4°C for overnight, transformed to *Escherichia coli* DH α , and spread on LB agar containing 30 μ g/mL chloramphenicol (CmR). The recombinant plasmids were extracted using Thermo Scientific GeneJET Plasmid Miniprep Kit. The recombinant plasmids comprising *phaP* gene were transformed to *Synechocystis* sp. PCC 6803 cells using electroporation with Bio-Rad Gene Pulser[™] (Bio-Rad, USA; 25 μ F capacitor, 200 Ω and electric field 2,500 V/cm for 5 ms). The recombinant cells were cultured on BG11 agar containing 30 μ g/mL of CmR under reduced light intensity. The complete segregation of OE strain was confirmed by PCR analysis using each indicated specific primers, namely FCmR, 5'-CCT GCA GGC ATG GAG AAA AAA ATC-3' and RCmR: 5'-ACC ATG GAT TTA CGC CCC GCC CTG-3'.

Microscopic visualization of PHB

PHB accumulation in *Synechocystis* sp. PCC 6803 was illustrated by staining with 1%(w/v) Nile red dye. The cell mixtures were incubated under dark condition for 10 min at 60°C, transferred to a glass slide and covered with a coverslip. The stained cells were observed by fluorescent microscope (ZEISS LabA1 AXIO) at a wavelength of 450–490 nm under 1000 \times magnification (Duangsri et al., 2020).

Total RNA extraction and reverse transcription-PCR

Total RNA of *Synechocystis* sp. PCC6803 was extracted by Trizol[®] reagent, following manufacturer's instruction. Chromosomal DNA was removed by DNase. Reverse transcription of 100 ng of total RNA per 20- μ L reaction was carried out using RevertAid First Strand cDNA synthesis Kit following the manufacturer's instruction (Thermo scientific, USA). The 288-bp of *phaP*, and 257-bp of 16S rRNA of *Synechocystis* sp. PCC6803 were amplified using PCR with the specific primer pairs FphaP: 5'-CCT CTA GAC ATG AAC AAC CAG TTT-3' and RphaP: 5'-TCT GCA GAA CTA GTT AGC CGA TAC-3' for *phaP*, and F16S: 5'-GCT TAT ACC CAG CAA GGT TCC-3' and R16S: 5'-ATA CCT GCT TGG GCT AGA TCC T-3' for 16S rRNA. The RT-PCR conditions were as follows: initial denaturation step at 94°C for 5 min, followed by 25 cycles of denaturation at 94°C for 45 s, then annealing at 51°C for 45 s, and extension at 72°C for 45 s. A final extension step was carried out at 72°C for 10 min followed by reaction storage at 4°C. The PCR products were analyzed by electrophoresis on a 1.2% agarose gel. and visualized using a gel imaging system (Omega Fluor, USA). The intensity of the

target genes under each condition studied was normalised to the internal housekeeping gene, 16S rRNA, under the same condition, which was represented as relative expression levels (fold).

Statistical analysis

The experiments were conducted in triplicates ($n = 3$) and the results were presented as mean values \pm SD.

Results and Discussion

Construction of Synechocystis sp. PCC 6803 overexpressing the phaP gene

The *phaP* gene of *Synechocystis* sp. PCC 6803 was amplified and ligated to pEERM plasmid. The pEERM plasmids contained a chloramphenicol resistance cassette and the flanking region of *psbA2* used for introducing the *phaP* gene into the *psbA2* gene and thereby replacing the native *psbA2* via double homologous recombination (Fig. 1A). The complete segregation of these transformants was confirmed by PCR analysis using each indicated specific primer. When each selected recombinant colony grown on BG11 plate containing 30 μ g/mL chloramphenicol was amplified, the correct size of 1,077 and 660 bp was found only in OE strains but not in WT strain (Fig. 1B). From these results, we could ascertain that the recombinant *Synechocystis* colonies might obtain the extra copies of the *phaP* gene. Then, the *Synechocystis* sp. PCC 6803 wild type (WT) and overexpression (OE) strains were cultivated under in BG11 normal medium condition. Growth pattern of WT and OE strains was similar though, the growth of OE strains was slightly lower than WT strains after 7 days (Fig. 1C), suggesting that *psbA2* gene encoding D1 protein of photosystem II of OE was malfunction or inactive (Englund et al. 2015, Khetkorn et al. 2016).

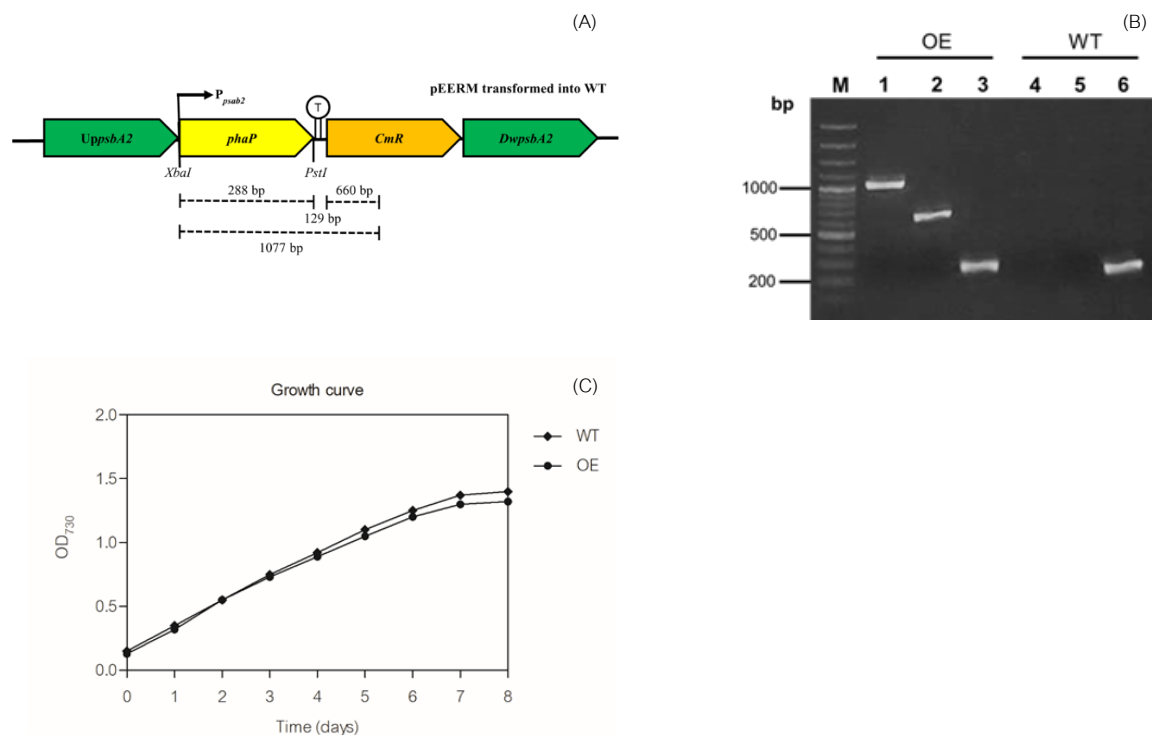


Fig. 1 (A) Schematic map of the *phaP*, *CmR* and *psbA2* genes in the genome of recombinant *Synechocystis* sp. PCC 6803 overexpressing *phaP* gene (B) PCR amplification from *Synechocystis* sp. PCC6803 DNA. Lane M: DNA ladder (100 bp), lane 1: 1,077-bp fragment amplified using F*phaP* and R*CmR* primers from OE, lane 2: 660-bp fragment amplified using F*CmR* and R*CmR* primers from OE, lane 3: 288-bp fragment amplified using F*phaP* and R*phaP* primers from OE, lane 4: No product using F*phaP* and R*CmR* primers from WT, lane 5: No product using F*CmR* and R*CmR* primers from WT, lane 6: 288-bp fragment amplified using F*phaP* and R*phaP* primers from WT (C) Growth curves of WT and OE strains in BG11 medium

PHB accumulation and transcriptional level of phaP gene

Most previous studies revealed that the PHB levels increased significantly in cyanobacteria under N- or P-deprived conditions (Duangsri et al. 2020, Monshupanee and Incharoensakdi, 2014). The present results showed that PHB appeared as brightly fluorescent orange granules upon Nile-red staining in *Synechocystis* sp. PCC 6803 WT and OE cells cultivated in BG11 (+N) and BG11₀ (-N) (Fig. 2A, 2B). Particularly, more brightly orange granules in each cell were observed under BG11₀ than under BG11 condition. Moreover, the small size of PHB granules was observed to be enhanced within -N-deprived cells, indicating that PhaP protein in OE strains might somehow affect the PHB accumulation. A deletion of *ssl2501* encoding *phaP* reduced the number of PHB granules per cell in *Synechocystis* sp. PCC 6803 (Hauf et al. 2015). Previously, Tian et al. (2005) exhibited that overexpression of *phaP* of *Aeromonas hydrophila* led to the production of more PHA granules but with reduced sizes. Furthermore, Shen et al. (2019) reported that the deletion efforts of the *Halomonas bluephagenesis phaP* could not form PHA granules larger than a normal size since the PHA granular sizes could be limited by bacterial cell sizes.

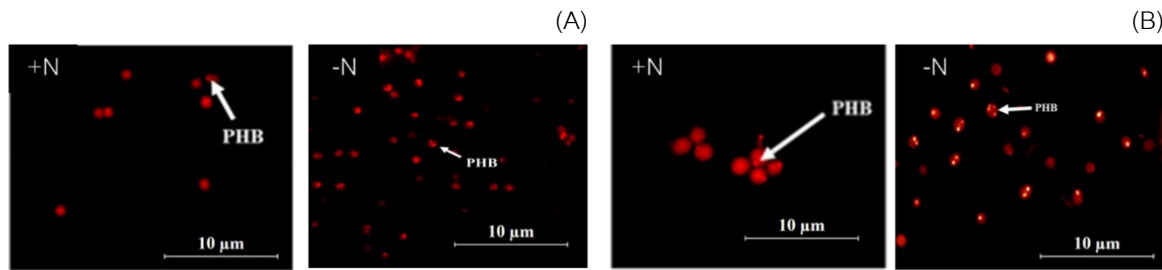


Fig. 2 PHB accumulation in *Synechocystis* sp. PCC6803 WT (A) and OE (B) strains cultivated in BG11 (+N) and BG11₀ (-N). Nile-red stained cells were visualized under fluorescent microscope

The expression of *phaP* gene encoding granule-associated proteins, which are important for PHB granule formation, was analyzed by RT-PCR in both *Synechocystis* sp. PCC 6803 WT and OE strains (Fig. 3). The expression levels of *phaP* in nitrogen-deprived OE and WT cells (BG11₀) were 1.7- and 1.4-folds, respectively, of the BG11-grown cells. This indicated that the *phaP* gene was responsive to nitrogen-deprived condition, especially *phaP* gene in WT strains. Under nitrogen-deprived condition, PHB was enhanced affecting to increase PHB granules in the cells (Duangsri et al. 2020). Moreover, the PhaP protein encode by *phaP* gene has been shown to effect number of PHB granules and PHB biosynthesis (Tian et al. 2005). However, investigations will be required to clarify the mechanisms underlying the regulation of the number and size of PHA granules in the future.

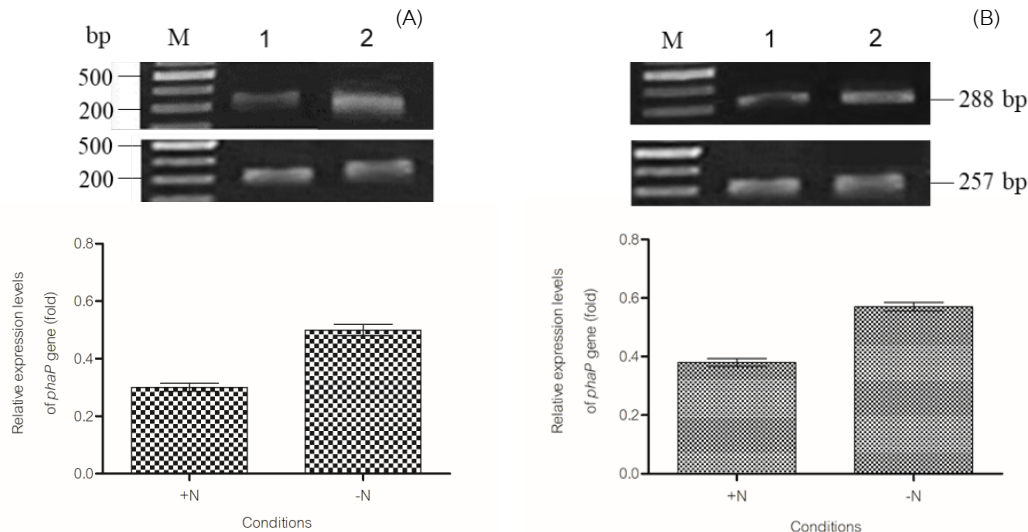


Fig. 3 Expression of *phaP* gene in *Synechocystis* sp. PCC6803 WT (A) and OE (B) strains cultivated in BG11 (+N) and BG11₀ (-N). Lane: M marker, lane 1: +N lane 2: -N. The 16S rRNA gene was used as a reference gene for normalizing the expression of target genes. The relative transcript levels of target genes were represented as the fold-change. Bar graphs represent mean values \pm SD of three independent experiments

Conclusion

This work demonstrated that *Synechocystis* sp. PCC 6803 overexpressing of *phaP* strains (OE) were successfully constructed. The *phaP* gene of OE cells were responsible for PHB granule formation within cells grown in nitrogen-deprived condition.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This research is funded by Graduate School Fellowship Program 2019 by Kasetsart University to A. Promariya and W. Raksajit, by the Kasetsart University and Development Institute (KURDI), Bangkok, Thailand to W. Raksajit.

References

- Butt, F.I., Muhammad, N., Hamid, A., Moniruzzaman, M., Sharif, F. 2018. Recent progress in the utilization of biosynthesized polyhydroxyalkanoates for biomedical applications – Review. *Int. J. Biol. Macromol* 120: 1294–1305.
- Carpine, R. 2017. Genetic engineering of *Synechocystis* sp. PCC6803 for poly- β -hydroxybutyrate overproduction. *Algal Res.* 25: 117–127.
- Duangri, C., Mudtham, N.A., Incharoensakdi, A., Raksajit, W. 2020. Enhanced polyhydroxybutyrate (PHB) accumulation in heterotrophically grown *Arthrospira platensis* under nitrogen deprivation. *J. Appl. Phycol.* 32: 3645–3654.
- Englund, E., Andersen-Ranberg, J., Miao, R., Hamberger, B., Lindberg, P. 2015. Metabolic engineering of *Synechocystis* sp. PCC 6803 for production of the plant diterpenoid manoyl oxide. *ACS Synth. Biol.* 4: 1270–1278.
- Grigorieva, G., Shestakov, S.V. 2006. Transformation in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. 6803. *FEMS Microbiol. Lett.* 13: 367–370.
- Hauf, W., Watzler, B., Roos, N., Klotz, A., Forchhammer, K. 2015. Photoautotrophic polyhydroxybutyrate granule formation is regulated by cyanobacterial phasin PhaP in *Synechocystis* sp. strain PCC 6803. *Appl. Environ. Microbiol.* 81: 4411–4422.
- Jendrossek, D. 2009. Polyhydroxyalkanoate granules are complex subcellular organelles (carbonosomes). *J. Bacteriol.* 191: 3195–3202.

- Khetkorn, W., Incharoensakdi, A., Lindblad, P., Jantaro, S. 2016. Enhancement of poly-3-hydroxybutyrate production in *Synechocystis* sp. PCC 6803 by overexpression of its native biosynthetic genes. *Bioresour. Technol.* 214: 761–768.
- Koch, M., Bruckmoser, J., Scholl, J., Hauf, W., Rieger, B., Forchhammer, K. 2020. Maximizing PHB content in *Synechocystis* sp. PCC 6803: a new metabolic engineering strategy based on the regulator PirC. *Microb. Cell. Fact.* 19: 231.
- Kufryk, G.I., Sachet, M., Schmetterer, G., Vermaas, W.F.J. 2002. Transformation of the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 as a tool for genetic mapping: optimization of efficiency. *FEMS Microbiol. Lett.* 206: 215-219.
- Monshupanee, T., Incharoensakdi, A. 2014. Enhanced accumulation of glycogen, lipids and polyhydroxybutyrate under optimal nutrients and light intensities in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803. *J. Appl. Microbiol.* 116: 830–838.
- Pötter, M., Steinbüchel, A. 2005. Poly(3-hydroxybutyrate) granule-associated proteins: Impacts on poly(3-hydroxybutyrate) synthesis and degradation. *Biomacromolecules.* 6: 552–560.
- Pötter, M., Müller, H., Reinecke, F., Wiczorek, R., Fricke, F., Bowien, B., Friedrich, B., Steinbüchel, A. 2004. The complex structure of polyhydroxybutyrate (PHB) granules: Four orthologous and paralogous phasins occur in *Ralstonia eutropha*. *Microbiol.* 150: 2301–2311.
- Shen, R., Ning, Z.-Y., Lan, Y.-X., Chen, J.-C., Chen, G.-Q. 2019. Manipulation of polyhydroxyalkanoate granular sizes in *Halomonas bluephagenesis* (2019) *Metab. Eng.* 54: 117–126.
- Tian, S.-J., Lai, W.-J., Zheng, Z., Wang, H.-X., Chen, G.-Q. 2005. Effect of over-expression of phasin gene from *Aeromonas hydrophila* on biosynthesis of copolyesters of 3-hydroxybutyrate and 3-hydroxyhexanoate (2005) *FEMS Microbiol. Lett.* 244: 19–25.
- Wahl, A., Schuth, N., Pfeiffer, D., Nussberger, S., Jendrossek, D. 2012. PHB granules are attached to the nucleoid via PhaM in *Ralstonia eutropha*. *BMC Microbiol.* 12: 262.
- Yodsang, P., Raksajit, W., Brandt, A.-M., Salminen, T.A., Mäenpää, P., Incharoensakdi, A. 2011. Recombinant polyamine-binding protein of *Synechocystis* sp. PCC 6803 specifically binds to and is induced by polyamines. *Biochem.* 76: 713–719.

การหาเงื่อนไขการทำความเย็นที่เหมาะสมของเทอร์โมอิเล็กทริก ด้วยการจำลองการจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมเพื่อการประยุกต์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บวัคซีน

Optimization condition of thermoelectric cooling using square current wave simulation for storage of vaccines application

วนสนันท์ งามทรัพย์มณี, อาภาภรณ์ สกุกการะเวก, ภานุพล ไชลอนกระโทก*

Wanasanan Ngamsapmanee, Aparporn Sakulkalavek, Bhanupol Klongratog*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: bhanupol.kl@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการหาเงื่อนไขการทำความเย็นที่เหมาะสมของเทอร์โมอิเล็กทริก ด้วยการจำลองการจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมเพื่อการประยุกต์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บวัคซีน วัคซีนไวต่ออุณหภูมิ จึงมีระบบจัดเก็บวัคซีน แต่ข้อเสีย คือ ใหญ่ ไม่เหมาะกับการย้าย จึงมีการศึกษาอุปกรณ์ทำความเย็นที่รักษาอุณหภูมิ ขนย้ายได้ คือ ระบบทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก แต่มีกำลังไฟฟ้าที่สูง งานวิจัยจึงศึกษาพารามิเตอร์เพื่อลดกำลังไฟฟ้า คือ ดิวตี้ไซเคิล และความถี่ ตอนที่ 1 การหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1 ถึง 7 A 100 s พบว่า กระแสไฟฟ้าตรง 3 A อุณหภูมิฝั่งเย็นจะลดลงต่ำสุด ตอนที่ 2 การหาความถี่ที่เหมาะสม ศึกษาความถี่ 10 100 1000 Hz บันทึกเวลาเมื่ออุณหภูมิลดถึง 8°C พบว่า ความถี่ส่งผลให้ช่วงเวลาที่ใช้ลดลงเพียงเล็กน้อย ตอนที่ 3 การหาดิวิตีไซเคิลที่เหมาะสม กำหนดดิวิตีไซเคิล คือ 60% ถึง 100% บันทึกเวลาเมื่ออุณหภูมิลดถึง 8°C ที่ 60% ถึง 90% เทียบกับ 100% ใช้เวลาเพิ่ม 188.90% ถึง 18.63% กำลังไฟฟ้าลด 35.06% ถึง 6.89% ประสิทธิภาพในการทำความเย็นเพิ่ม 55.30% ถึง 8.32%

คำสำคัญ: การทำความเย็น, เทอร์โมอิเล็กทริก, แผ่นร้อนเย็น, รอบการทำงาน, สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม

Abstract

This research proposes optimization condition of thermoelectric cooling using square current wave simulation for storage of vaccines application. The storage system has created because the vaccine is sensitive to temperature but the weak point is the storage is not suitable for moving. Therefore, the study of Thermoelectric cooling system which keeping the vaccine in good conditions, maintain stable temperature and suitable for moving Nevertheless, there is a limitation to the thermoelectric cooling system. Its electric power is too high. The research studies parameters to reduce power and the optimum parameters are duty cycle and frequency. Part 1 Suitable current for applying to thermoelectric device. Apply current 1–7 A to thermoelectric device for 100 s. The simulation results showed that current 3 A has lowest temperature at cold side. Part 2 Suitable frequency for applying to thermoelectric device. Apply frequency 10 100 1000Hz to thermoelectric device. Record time from 27°C down to 8°C, found that the frequency has less effect to time, even though, applying more frequencies but the time is almost not different. Part 3 Suitable duty cycle for applying to thermoelectric device. Determine the duty cycle is 60% to 100%. Record time from 27°C down to 8°C. Duty cycle at 60% to 90% comparing with 100%, the time increased 188.90% to 18.63%, the power reduced 35.06% to 6.89% and the COP increased 55.30% to 8.32%.

Keywords: Cooling, Duty Cycle, Peltier, Square current wave, Thermoelectric

คำนำ

วัคซีน คือ ผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตจากสิ่งมีชีวิต เกิดจากการสังเคราะห์ หรือกระบวนการที่นำมาใช้เพื่อเป็นการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันโรคของมนุษย์ ซึ่งสามารถป้องกัน รักษา หรือลดความรุนแรงของโรคได้ โดยวัคซีนเป็นสิ่งที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถเสื่อมคุณภาพได้ หากอยู่ในอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม ซึ่งจะไม่สามารถกระตุ้นการสร้างเสริมภูมิคุ้มกันโรค และอาจก่อให้เกิดอาการไม่พึงประสงค์ตามมา โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมกับวัคซีนจะอยู่ที่ 2 ถึง 8°C (ศิริรัตน์, 2547) ดังนั้นจึงต้องมีระบบที่ใช้ในการจัดเก็บวัคซีนและกระจายวัคซีนให้คงคุณภาพ ตั้งแต่จุดผลิตวัคซีนถึงผู้รับ ซึ่งอุปกรณ์ในการควบคุมอุณหภูมิของวัคซีนมีหลายประเภท เช่น ตู้แช่แข็งหรือตู้เย็นแบบอัดไอสามารถเก็บวัคซีนได้อย่างน้อยหนึ่งเดือน ค่าประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูง และสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ตลอด แต่ข้อเสียของตู้แช่แข็งหรือตู้เย็นนั้นคือ มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก จึงไม่เหมาะกับการขนย้าย (ศรีธธา, 2557)

ดังนั้นจึงมีการศึกษาอุปกรณ์ทำความเย็นที่สามารถรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสม ขนาดพกพา เพื่อเหมาะกับการขนย้ายได้สะดวก สำหรับพื้นที่ห่างไกล (Punit et al., 2020) อีกทั้งเมื่อคำนึงถึงความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ได้มีการนำเสนอเทคโนโลยีในการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler) เนื่องจากระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นระบบทำความเย็นที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีเสียงรบกวนในขณะที่ทำความเย็นและมีขนาดกะทัดรัดสามารถพกพาได้สะดวกจึงมีการนำระบบทำความเย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้าน เช่น การประยุกต์ใช้งานเพื่อขนส่งอาหาร เวชภัณฑ์ น้ำเชื้อ หรืออวัยวะในทางการแพทย์ (เชษฐสุธา, 2562) อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกยังต้องใช้กำลังไฟฟ้าที่สูง แต่สามารถทำความเย็นได้เล็กน้อย ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาระบบทำความเย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำความเย็น (Coefficient of performance) เช่น การปรับปรุงตัวระบายความร้อน (Mirmanto et al., 2018) ตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Mirmanto et al., 2019) และการปรับปรุงแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง Manikandan และคณะได้มีการศึกษาการจำลองแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงในรูปแบบต่างๆ ตั้งแต่สัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม (Square) การเพิ่มขึ้นแบบเรมปี (Ramp up) การลดลงแบบเรมปี (Ramp down) การเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential rise) และการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Decay) โดยจากผลการทดลองทำให้ทราบว่าสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมสามารถให้ค่าประสิทธิภาพในการทำความเย็นได้สูงที่สุด แต่ในการจำลองนี้เป็นการจำลองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมเดี่ยว ซึ่งจะไม่สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่สำหรับการจัดเก็บวัคซีน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ด้วยการจำลองการจ่ายไฟกระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมเพื่อการประยุกต์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บวัคซีน โดยจะมีการจำลองการจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมต่อเนื่อง ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สนใจ คือ ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) และความถี่ โดยผลการจำลองจะทำให้ทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองระบบทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก ผ่านโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2020b MATLAB license: 40904942 โดยใช้งานด้านโปรแกรมมิ่งกราฟิก MATLAB Simulink ซึ่งมีการจำลองการทำงานของระบบ ฟังก์ชันและคำสั่งจะเป็นบล็อกไดอะแกรมหรือรูปภาพ

การจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ในงานวิจัยนี้ใช้ Repeating Sequence เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมต่อเนื่อง แสดงดัง Fig. 1 ซึ่งสามารถกำหนดค่าตัวที่ไซเคิลและความถี่ แสดงดัง Fig. 2 และทำการเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source) เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงออกมาให้มีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีค่าตัวที่ไซเคิลและความถี่ตามกำหนด แสดงดัง Fig. 3

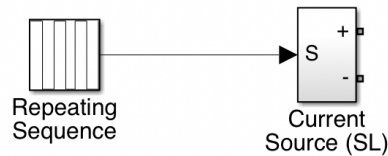


Fig. 1 Block diagram signal generator

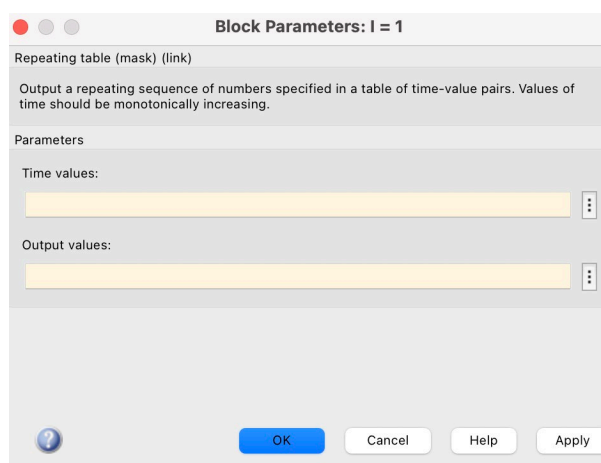


Fig. 2 Windows setting of signal generator

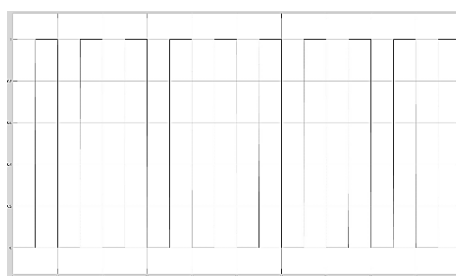


Fig. 3 Square Wave

การจำลองการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

การจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงแก่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ขา (+) และ (-) โดยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจากขา (+) ไปยังขา (-) พหุส่วนใหญ่ที่อยู่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะพาความร้อน จึงเกิดการไหลของความร้อนจากพอร์ท A ไปยังพอร์ท B ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ พอร์ท A และพอร์ท B แสดงดัง Fig. 4

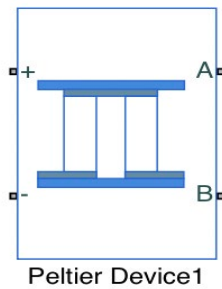


Fig. 4 Block diagram peltier device

การจำลองแหล่งความร้อน

Fig. 5 แสดงแหล่งความร้อน ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในอุดมคติ โดยในการจำลองนี้จะทำหน้าที่เสมือนเป็นแผงระบายความร้อน เพื่อรักษาอุณหภูมิของด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกให้คงที่ แสดงดัง Fig. 6



Fig. 5 Block diagram temperature source

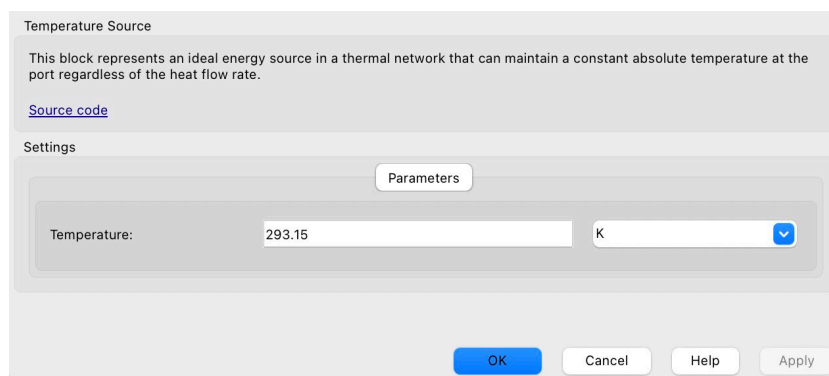


Fig. 6 Windows setting of temperature source

ตอนที่ 1 การหากระแสไฟฟ้าตรงที่เหมาะสม

สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการ กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าตรง ตั้งแต่ 1 ถึง 7 A จ่ายให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเวลา 100 s ผ่านบล็อกรีพีทติ้ง ซีควเอนซ์ (Repeating Sequence) ซึ่งทำการเชื่อมต่ออยู่กับ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source) เพื่อสร้างรูปสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะเชื่อมต่อไปยัง อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นจะมีการถ่ายเทความต่างศักย์ไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าต่ำทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของทั้ง 2 ด้านของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยอุณหภูมิของฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของอุปกรณ์เริ่มต้นที่ 27°C หลังจากมีการจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 1-7 A เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่จุดสมดุล อุณหภูมิฝั่งร้อนจะมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิ 40°C โดยจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิฝั่งเย็นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

ตอนที่ 2 การหาความถี่ที่เหมาะสม

สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม โดยกำหนดค่า ดิวตีไซเคิล และความถี่ของกระแสไฟฟ้าผ่านบล็อกรีพีทติ้ง ซีควเอนซ์ (Repeating Sequence) ซึ่งทำการเชื่อมต่ออยู่กับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source) เพื่อสร้างรูปสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจะมีค่าความถี่ในการจำลองอยู่ที่ 10 100 1000 Hz โดยอุณหภูมิของฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของอุปกรณ์เริ่มต้นที่ 27°C เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่จุดสมดุล อุณหภูมิฝั่งร้อนจะมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 40°C และอุณหภูมิฝั่งเย็นหลังจากมีการจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 8°C จะทำการบันทึกเวลาในการทำความเย็น เมื่อความถี่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

ตอนที่ 3 การหาดีวีไซเคิลที่เหมาะสม

สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม โดยกำหนดค่า ดิวตีไซเคิล และความถี่ของกระแสไฟฟ้าผ่านบล็อกรีพีทติ้ง ซีควเอนซ์ (Repeating Sequence) ซึ่งทำการเชื่อมต่ออยู่กับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current Source) เพื่อสร้างรูปสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมมีความถี่ในการทดลองอยู่ที่ 100 Hz ดิวตีไซเคิล 60% 70% 80% 90% และ 100% โดยอุณหภูมิของฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของอุปกรณ์เริ่มต้นที่ 27°C เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่จุดสมดุล อุณหภูมิฝั่งร้อนจะมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 40°C และอุณหภูมิฝั่งเย็นหลังจากมีการจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 8°C จะทำการบันทึกเวลา ค่าการถ่ายเทความร้อน และค่ากำลังไฟฟ้า

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**ตอนที่ 1 กระแสไฟฟ้าตรงที่เหมาะสม**

ในงานวิจัยนี้เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 1 ถึง 7 A เป็นเวลา 100 s และทำการบันทึกค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิฝั่งเย็น ผลการจำลองแสดงดัง Fig. 7 โดยพบว่าเมื่อมีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 1 ถึง 3 A อุณหภูมิจะลดลงจาก 18.4°C ถึง 7.3°C เมื่อมีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มตั้งแต่ 4 ถึง 7 A อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 8.8 ถึง 36.4°C เป็นไปตามปรากฏการณ์ของจูล (Joule's Heating) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เชื่อมโยง ระหว่างไฟฟ้าและความร้อนแบบย้อนกลับไม่ได้ เนื่องจาก มีความร้อนเกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุ เป็นผลให้เมื่อมีการจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าตรงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิฝั่งเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น จากการจำลองพบว่ากระแสไฟฟ้าตรงที่สามารถทำความเย็นได้ดีที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าตรง 3 A ซึ่งพฤติกรรมจะมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alfred and Jeffrey (2017) คือ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงเป็นรูปสามเหลี่ยม จนถึงค่ากระแสไฟฟ้าตรงสูงสุดค่า จะพบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิฝั่งเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น

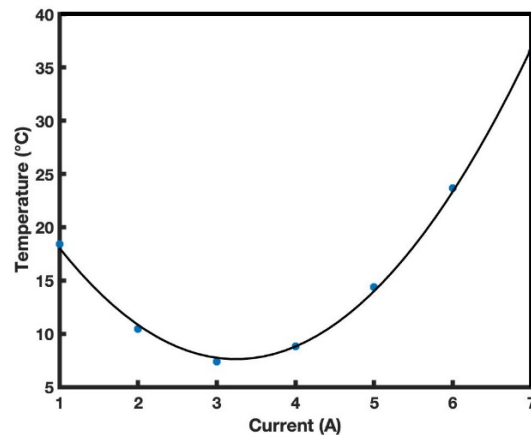


Fig. 7 Test results for maximum temperature versus the currents

ตอนที่ 2 การหาความถี่ที่เหมาะสม

Table 1 Suitable Frequency for applying to thermoelectric device.

Frequency (Hz)	Duty Cycle (%)			
	60	70	80	90
Time(s)				
10	273.7	182.2	138.5	112.2
100	272.9	181.9	138.3	112.1
1000	273.3	181.8	138.1	111.8

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมต่อเนื่อง โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าในรูปแบบสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมต่อเนื่อง คือ ความถี่ ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการศึกษาความถี่ที่ค่าต่างๆ ได้แก่ 10 100 และ 1000 Hz และมีการกำหนดดิวตี้ไซเคิล ไว้ 4 ค่า คือ 60% 70% 80% และ 90% ทำการบันทึกเวลา เมื่ออุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 27°C ถึง 8°C จาก Table 1 ผลการจำลองพบว่า ค่าดิวตี้ไซเคิล 60% เมื่อค่าความถี่เปลี่ยนไปตั้งแต่ 10 100 และ 1000 Hz เวลาในการทำความเย็นมีค่า 273.7 272.9 และ 273.3 s ตามลำดับ ซึ่งที่ค่าดิวตี้ไซเคิลค่าต่างๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ เวลาในการทำความเย็นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากการจำลองพบว่าความถี่ส่งผลให้ช่วงเวลาที่ใช้ลดลงเพียงเล็กน้อย (ยกเว้นที่ ดิวตี้ไซเคิล 60%) ในงานวิจัยนี้จึงเลือกความถี่ที่ 100 Hz ซึ่งสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมอ้างอิงจากจากวิจัยของ Manikandan และคณะ ซึ่งทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงเป็นรูปสัญญาณรูปต่างๆ ตั้งแต่สัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม (Square) การเพิ่มขึ้นแบบแรมป์ (Ramp up) การลดลงแบบแรมป์ (Ramp down) การเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential rise) และการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Decay) จากการจำลองพบว่าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงรูปสัญญาณสี่เหลี่ยมให้ค่าประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูงสุด และใช้กำลังไฟฟ้าลดลงเมื่อเทียบกับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ตอนที่ 3 การหาตัวชี้เซลล์ที่เหมาะสม

Table 2 Suitable duty cycle for applying to thermoelectric device

Duty Cycle (%)	Time (s)	Power (W)	COP
60	272.9	0.1169	0.4106
70	181.9	0.1347	0.3563
80	138.3	0.1509	0.3181
90	112.1	0.1676	0.2864
100 (DC 3 A)	94.4	0.1800	0.2644

จากการจำลองในตอนต้นที่ 2 พารามิเตอร์ที่สนใจสำหรับการจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมต่อเนื่อง คือ ตัวชี้เซลล์ และจากผลการจำลองตอนที่ 2 แสดงค่าความถี่ที่สนใจ คือ 100 Hz และศึกษาตัวชี้เซลล์ ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 60% 70% 80% 90% และ 100% จาก Table 2 ทำการบันทึก เมื่ออุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 27°C ถึง 8°C ผลการจำลองพบว่า เมื่อตัวชี้เซลล์ มีค่าเพิ่มขึ้น เวลาในการทำความเย็นจะมีค่าลดลงจาก 272.9 181.9 138.3 112.1 ถึง 94.4 s แปรผกผันกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเพลเทียร์ที่จะเพิ่มมากขึ้นจาก 0.1169 0.1347 0.1509 0.1676 ถึง 0.1800 W เมื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพในการทำความเย็น พบว่า เมื่อตัวชี้เซลล์ เพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพในการทำความเย็นจะลดลงจาก 0.4106 0.3563 0.3181 0.2864 ถึง 0.2644 ซึ่งเวลาในการทำความเย็นที่ตัวชี้เซลล์ 60% 70% 80% และ 90% หากเทียบกับการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงหรือตัวชี้เซลล์ 100% จะมีการใช้เวลาเพิ่มขึ้น 188.90% 92.53% 46.41% และ 18.63% ตามลำดับ ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลง 35.06% 25.17% 16.17% และ 6.89% ตามลำดับส่งผลให้ ค่าประสิทธิภาพในการทำความเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น 55.30% 34.76% 20.31% และ 8.32% ตามลำดับ ซึ่งตัวชี้เซลล์ สามารถลดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก แต่ใช้เวลาในการทำความเย็นมากขึ้น ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่ง เมื่อเรามี กำลังไฟฟ้าที่จำกัด

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการหาเงื่อนไขการทำความเย็นที่เหมาะสมของเทอร์โมอิเล็กทริก ด้วยการจำลองการจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยมเพื่อการประยุกต์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บวัคซีน ซึ่งทำการศึกษารวมิต่อที่ที่เหมาะสมกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม คือ ตัวชี้เซลล์ และความถี่ จากการจำลองตอนที่ 1 ทำการหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 1 – 7 A เป็นเวลา 100 s โดยบันทึกอุณหภูมิฝั่งเย็น พบว่า กระแสไฟฟ้าตรง 3 A สามารถทำให้อุณหภูมิฝั่งเย็นลงมาถึงจุดที่ต่ำที่สุด การจำลองตอนที่ 2 คือ การหาความถี่ที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาความถี่ที่ค่าต่างๆ ได้แก่ 10 100 และ 1000 Hz หลังจากมีจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรูปสี่เหลี่ยม เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 8°C ทำการบันทึกเวลาในการทำความเย็น เมื่อความถี่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป พบเวลาในการทำความเย็นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากการจำลองพบว่าความถี่ส่งผลให้ช่วงเวลาที่ใช้ลดลงเพียงเล็กน้อย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกความถี่ที่ 100 Hz การจำลองตอนที่ 3 คือ การหาตัวชี้เซลล์ที่เหมาะสม มีการกำหนดตัวชี้เซลล์ไว้ 4 ค่า คือ 60% 70% 80% 90% และ 100% ทำการบันทึกเวลา เมื่ออุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 27°C ถึง 8°C ผลการจำลองพบว่าในการทำความเย็นที่ตัวชี้เซลล์ 60% 70% 80% และ 90% หากเทียบกับการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงหรือตัวชี้เซลล์ 100 % จะมีการใช้เวลาเพิ่มขึ้น 188.90% 92.53% 46.41% และ 18.63% ตามลำดับ ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลง 35.06% 25.17%

16.17% และ 6.89% ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการทำความเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น 55.30% 34.76% 20.31% และ 8.32% ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เพราะความอนุเคราะห์จากรศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก และผศ.ดร.ภาณุพล ไชลนกระโทก รวมทั้งความอนุเคราะห์สนับสนุนทุนการวิจัยวิจัย และการอำนวยความสะดวกด้านต่างๆ เป็นอย่างดี จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- เชษฐา รัตนพันธ์. 2562. เทอร์โมอิเล็กทริกส์, พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน เซอร์วิส ซัพพลาย. กรุงเทพฯ.
- ศิริรัตน์ เตชะธวัช. 2547. คู่มือการบริหารจัดการวัดขึ้นและระบบลูกโซ่ความเย็น. โรงพิมพ์การศาสนา สำนักงานพุทธศาสนาแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.
- ศรัทธา อาภรณ์รัตน์. 2557. ทฤษฎีระบบเครื่องทำความเย็น. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- Alfred, J.P., Jeffrey, S.A. 2017. Peltier supercooling with isosceles current pulses: Cooling an object with internal heat generation. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 6(12): 250–259.
doi.org/10.1149/2.0391712jss
- Hao, LV., Xiao-Dong, Wang., Tian-Hu, Wang., Jing-Hui, Meng. 2015. Optimal pulse current shape for transient supercooling of thermoelectric cooler. *Energy.* 83: 788–796. doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.092
- Jugsujinda, S., Vora-ud, A., Seetawan, T. 2011. Analyzing of Thermoelectric Refrigerator Performance. In: 2nd International Science, Social-Science, Engineering and Energy Conference 2010: Engineering Science and Management. Nakhonphanom, Thailand. pp. 154–159.
- Kurniawan, M.A., Aziz, A., Akmal, M. 2018. Portable thermoelectric cooler box performance with variation of input power and cooling load. *Aceh Int. J. Sci. & Technol.* 7(2): 85–92.
doi.org/10.13170/aijst.7.2.8722
- Mirmanto, Alit, I.B., Sayoga, I.M.A., Sutanto, R., Nurchayati, Mulyanto, A. 2018. Experimental cooler box using two different heat removal units: a heat sink fin-fan, and a double fan heat pipe. *Front. Heat Mass Transfer.* 10: 34. doi.org/10.5098/hmt.10.34
- Mirmanto, M., Syahrul, S., Wirdan, Y. 2019. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. *Eng. Sci. Technol. an Int.* 22: 177–184.
doi.org/10.1016/j.jestch.2018.09.006
- Martinez, A., Astrain, D., Rodriguez, A., Perez, G. 2013. Reduction in the electric power consumption of a thermoelectric refrigerator by experimental optimization of the temperature controller. *J. Electron. Mater.* 42: 1499–1503.

- Manikandan, S., Kaushik, S.C., Yang, Ronggui. 2017. Modified pulse operation of thermoelectric coolers for building cooling applications. *Energy Conversion and Management*. 140: 145–156.
doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.003
- Punit, F., Amit, K., Abhiram, M., Dr.Abhay, G., Dr.Prachi, P., Prof.Alok, N., Dr.Gaurav, M. 2020. An IOT enabled convenient vaccine cold box for biomedical use. *Eur. J. Mol. Clin. Med.* 7(7): 1576–1585.
- Petal, C. 2017. Simulation of thermoelectric cooler and h-bridge driver for precise temperature control applications. Degree of master of Technology in Instrumentation, National Institute of Technology.
- Sabah, A., Elkamel, A., Al-Damkhi A.M. Elkamel, A., Al-habsi, I.-H., Chutani, M. 2009. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. *Renew. Energy*. 34: 30–34.
- Vian, J.G., Astrain, D., Dominquez, M. 2002. Numerical modelling and design of a thermoelectric dehumidifier. *Appl. Therm. Eng.* 22: 407–422.
- Vian, J.G., Astrain, D. 2009. Development of a thermoelectric refrigerator with two-phase thermosyphons and capillary lift. *Appl. Therm. Eng.* 29: 1935–1940.

การออกแบบและสร้างตัวแปลงสัญญาณแรงบิดมาตรฐานอ้างอิง 1 นิวตันเมตร

Design and fabrication of 1 N m reference standard torque transducer

นายโชคชัย วาดทอง^{a,b}, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ^{a,*}

Chokchai Wattong^{a,b}, Wiwat Wongkokua^{a,*}

^aภาควิชาฟิสิกส์ สาขามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ คลองหลวง ปทุมธานี 12120

^aDepartment of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bNational Institute of Metrology (Thailand), Klong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wiwat.w@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างตัวแปลงสัญญาณแรงบิดมาตรฐานอ้างอิงพิสัย 0.1 Nm ถึง 1 Nm เพื่อใช้เป็นเครื่องมือเทียบมาตรฐานสำหรับตัวเทียบมาตรฐานไขควงแรงบิด โดยทำการออกแบบส่วนรับรู้ปริมาณความเค้น ตรงกลางเป็นแบบแผ่นเพื่อติดสเตรนเกจ แกนกลางเป็นเพลากลมผ่าแนวขวางเพื่อให้เป็นอิสระต่อกัน การออกแบบถูกคำนวณตามสูตรและทวนสอบแบบด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขณะที่ทดสอบด้วยแรงบิดบริสุทธิ์ในแนวแกนวัด พบว่าสัญญาณจากส่วนวัดแรงบิดให้ค่าเป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับปริมาณแรงบิดที่เกิดขึ้น เพื่อพิสูจน์ผลของการออกแบบเครื่องมือวัด จึงได้ทำการเทียบมาตรฐานตาม DIN51309 ในช่วง 10% ถึง 100% พบว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นอยู่ในคลาส 0.5 มีความไม่แน่นอนของการวัด $\pm 0.27\%$ ดีเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นเครื่องมือเทียบมาตรฐาน

คำสำคัญ: ความไม่แน่นอนของการวัด, ส่วนรับรู้ความเค้น, แรงบิดบริสุทธิ์

Abstract

This research aims to design and fabricate a standard torque transducer for the range of 0.1 Nm to 1 Nm which will be used as a standard instrument for a torque screwdriver calibrator. A stress sensing body has been designed as a sheet in the center for adhered strain gauges. The center shaft has a split cross-section to allow independent movement. The validity of the design has been calculated by finite element analysis. When simulating pure torque along the instrument axis, the signals from the sensing body are proportional to the given torque as the design objective. To test the instrument design, the transducer has been calibrated according to DIN51309 standard in the range of 10% to 100%. The calibration result indicates that the instrument measurement uncertainty is 0.27% which stays within class 0.5 As a result, this research gives the standard torque transducer that can be sufficiently used in practical works.

Keywords: Measurement uncertainty, Pure torque, Stress sensing body

คำนำ

ปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีแนวโน้มเติบโตมากขึ้น ส่งผลให้มีการแข่งขันกันในด้านคุณภาพสูงขึ้นตามไปด้วย ผู้ประกอบการจึงให้ความสำคัญกับการควบคุมคุณภาพ อย่างไรก็ตาม ในการเทียบมาตรฐานเครื่องมือที่ใช้แรงบิดต่ำๆ ยังไม่สามารถเปิดให้บริการได้ในประเทศไทย เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการเทียบมาตรฐานเครื่องมือประเภทนี้ราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีแค่ประเทศเยอรมนีที่เดียว งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาและทดลองผลิตเครื่องมือเพื่อใช้ในการเทียบมาตรฐานแรงบิดต่ำและผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน DIN 51309:2005-12

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE)

จากการวิเคราะห์ด้วย FE พบว่าความเค้นที่ผิวส่วนรับรู้ปริมาณความเค้นมีความสม่ำเสมอ เมื่อถูกกระทำด้วยปริมาณแรงบิดบริสุทธิ์ (pure torque) ในขณะที่บริเวณแผ่นตรงกลางทั้ง 2 ข้างจะได้รับภาระของแรงบิดลักษณะยืดและหดตรงกันข้าม เกิดการเบี่ยงเบนของความเค้นผิวส่วนรับรู้ปริมาณความเค้นดัง Fig. 1 แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของความเค้นเมื่อถูกกระทำด้วยแรงบิดบริสุทธิ์ และการเบี่ยงเบนของความเค้นเมื่อถูกกระทำด้วยแรงบิดที่มีแรงไขว้ (cross force) ปะปนมาด้วย และพบว่าการกระจายตัวของความเค้นที่ถูกกระทำด้วยแรงบิดและแรงไขว้ จะมีการเบี่ยงเบนในรูปแบบของคลื่นไซน์รอบแผ่น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าขนาดของคลื่นไซน์ดังกล่าวแปรผันตามปริมาณแรงบิด ที่กระทำในแนวแกน

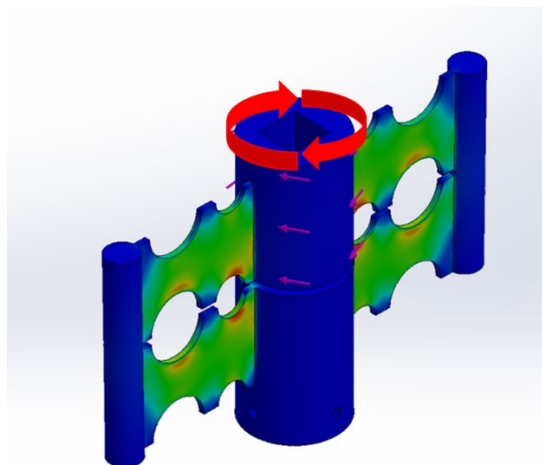


Fig.1 Finite element analysis for the stress sensing element

การออกแบบและสร้างเครื่องมือ

ส่วนรับรู้ปริมาณความเค้นของตัวแปลงสัญญาณแรงบิดมาตรฐานอ้างอิงขนาด 1 Nm ให้มีรูปทรงแบบเพลตตรงกลางและมีปีกทั้งสองข้าง วัสดุที่เลือกใช้เป็นเหล็กเกรด DC53 (ทัศนัย, 2554) ซึ่งมีรายละเอียดส่วนผสมทางเคมีดัง Table 1 และสมบัติเชิงกลดัง Table 2

Table 1 Chemical composition of steel DC53

Chemical Composition, %					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.95	1.0	0.4	8.0	2.0	0.3

Table 2 Mechanical properties of steel DC53

Annealed Hardness	(210 to 220) HB
Density	7,728 kg/m ³
Young's Modulus (E)	212.5 GPa
Modulus of Rigidity (G)	83.1 GPa
Poisson's Ratio	0.28

ขนาดของส่วนรับรู้ปริมาณความเค้นสามารถคำนวณได้จาก Equation 1:

$$F_v I = E \epsilon_B \left(\frac{bh^2}{6} \right) \quad (1)$$

เมื่อ $F_v I$ คือปริมาณแรงบิด, $E \epsilon_B$ คือค่ามอดูลัสของยัง, b และ h คือ ความหนาและความกว้างของแผ่นส่วนรับรู้ปริมาณความเค้นตามลำดับ (22 มกราคม 2565)

ในการออกแบบกำหนดให้เพลากลางมีขนาด 15 mm และกำหนดให้มีความเครียดที่พิกัดแรงบิด 1 Nm ขนาดแผ่นรับรู้ปริมาณความเค้นด้านข้างมีขนาดความกว้างเท่ากับ 15 mm ความหนาเท่ากับ 0.7 mm และความยาวเท่ากับ 43 mm แสดงดัง Fig. 2

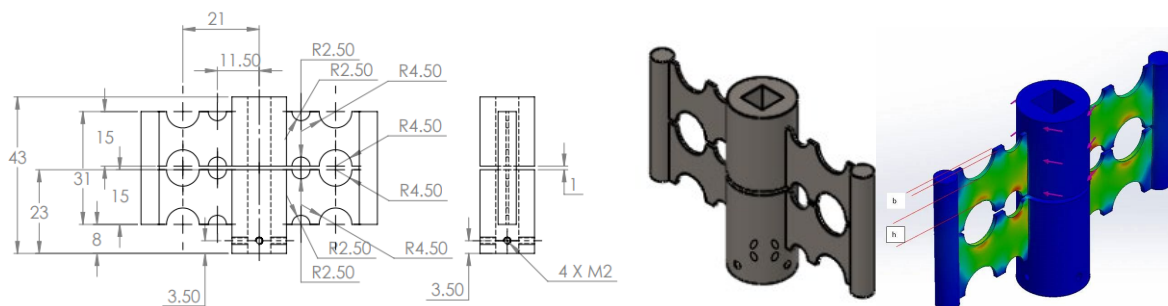


Fig. 2 Drawing of the stress sensing body

วงจรวัดความเค้น

เมื่อออกแบบและจัดสร้าง ส่วนรับรู้ปริมาณความเค้นของตัวแปลงสัญญาณวัดแรงบิดอ้างอิงแล้ว วงจรวัดความเค้นแบบฟูลบริดจ์จะถูกติดตั้งในส่วนรับรู้ปริมาณความเค้น ตามสัญลักษณ์ R_1, R_2, R_3, R_4 แทนสเตรนเกจทั้ง 4 ตัว เมื่อออกแรงบิดตามแนวแกนวัด ความต้านทานสเตรนเกจตัว R_1, R_3 จะหดตัวลง และความต้านทานสเตรนเกจตัว R_2, R_4 จะยืดตัวตามปริมาณแรงบิดที่กระทำเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเราก็สามารถวัดสัญญาณที่ได้โดยใช้เครื่องวัดสเตรนแอมพลิฟายเออร์สเตรนเกจใช้แบบแกนเดียว รุ่น KFGS-1-350-C1-11 ยี่ห้อ KYOWA มีระยะความยาวเกจที่ 1 mm

เกจแพกเตอร์ 2.08 mV/V \pm 1% ความต้านทาน 350 Ω ติดตั้งที่ตำแหน่ง 0° และ 180° วงจรสเตรนเกจแบบฟูลบริดจ์ที่ใช้ จึงไม่มีการปรับแต่งวงจร รูปแบบวงจรถูกแสดงดัง Fig. 3

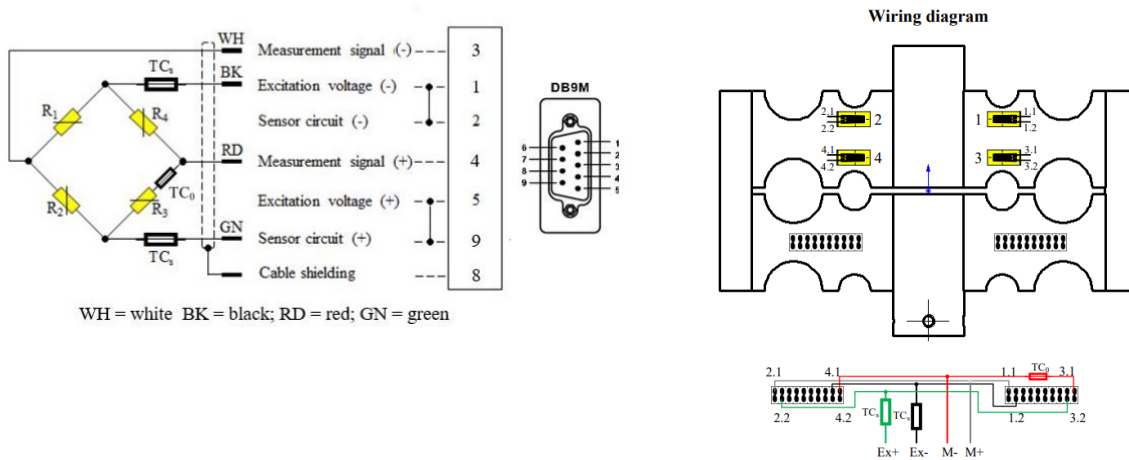


Fig. 3 The circuit for torque measurement

ผลการทดลอง

เมื่อประกอบตัวแปลงสัญญาณแรงบิดมาตรฐานอ้างอิงแล้ว จึงทำการเทียบมาตรฐานตามแนวทางการเทียบมาตรฐาน DIN51309 (DIN 51309:2005-12) ตาม Fig. 4 ทำทั้งทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาตั้งแต่ 0.1 Nm ถึง 1 Nm ผลการเทียบมาตรฐานถูกแสดงดัง Table 3 และ Fig. 5 ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงบิด ที่เกิดจากการหมุนมุมอยู่ที่ ระหว่าง -0.09% ถึง +0.08% ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญของเครื่องมือที่มีความถูกต้องสูงค่าการหมุนมุมจะต้องน้อย และจากการสอบเทียบมีความไม่แน่นอนของการวัดของตัวเครื่องมืออยู่ที่ \pm 0.27% ตาม Fig. 5 ทำการเก็บข้อมูลและสอบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

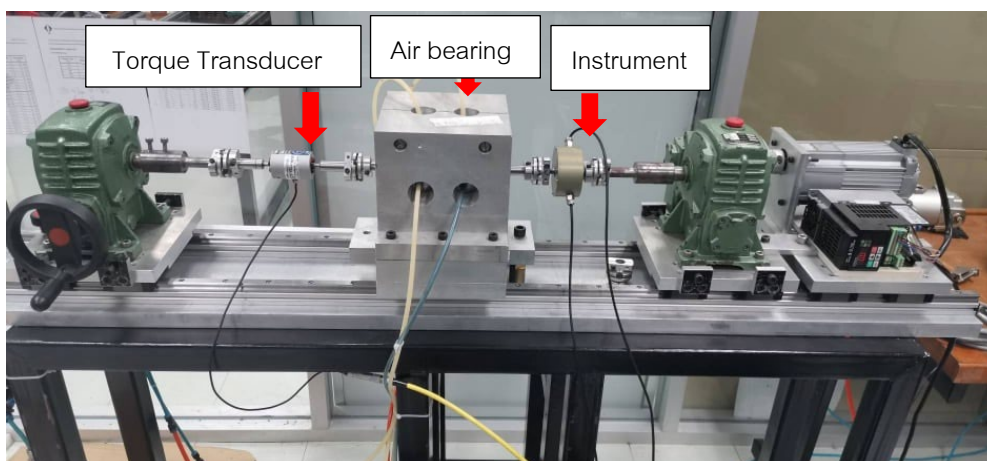


Fig. 4 The instrument for torque calibration

Table 3 Characteristic values of the calibrated results in the range of 0.1 Nm to 1 Nm

M_k in N·m	$\frac{b'}{\bar{X}}$ in %	$\frac{b''}{\bar{X}}$ in %	$\frac{f_0}{\bar{X}}$ in %	$\frac{h}{\bar{X}}$ in %	r in N·m	$\frac{f_0}{\bar{X}}$ % (linear)
1.0	0.01	0.08	-	-	0.00001	0.01
0.8	0.01	0.08	-	0.02	0.00001	0.01
0.6	0.03	0.08	-	0.03	0.00001	-0.02
0.4	0.01	0.05	-	0.07	0.00001	-0.08
0.2	0.04	0.05	-	0.13	0.00001	0.03
0.1	0.00	0.06	-	0.22	0.00001	-0.02
0.0	-	-	0.02	-	0.00001	-
0.0	-	-	-0.03	-	0.00001	-
-0.1	-0.09	-0.03	-	-0.18	0.00001	0.04
-0.2	-0.02	-0.06	-	-0.19	0.00001	0.01
-0.4	-0.03	-0.08	-	-0.06	0.00001	-0.01
-0.6	-0.06	-0.08	-	-0.02	0.00001	0.00
-0.8	-0.03	-0.09	-	0.00	0.00001	-0.01
-1.0	-0.03	-0.09	-	-	0.00001	0.00

Class	Maximum permissible error of the torque transducer in %						
	b_j	b'	f_0	h	f_a, f_g	r	W_{TN}
Out	10	10	10	10	10	-	10
1	1	1	0.250	1.25	0.50	0.004	0.2
0.5	0.5	0.25	0.125	0.63	0.25	0.008	0.1
0.2	0.2	0.1	0.050	0.25	0.10	0.020	0.04

Nominal torque in N·m	Output in mV/V	Rel. uncertainty interval in %, $k = 2$
1.0	2.53899	0.20
0.8	2.03126	0.21
0.6	1.52296	0.22
0.4	1.01472	0.25
0.2	0.50792	0.23
0.1	0.25381	0.24
0.0	0.00000	-

Nominal torque in N·m	Output in mV/V	Rel. uncertainty interval in %, $k = 2$
0.0	0.00000	-
-0.1	-0.25421	0.27
-0.2	-0.50826	0.22
-0.4	-1.01627	0.21
-0.6	-1.52460	0.21
-0.8	-2.03266	0.21
-1.0	-2.54107	0.20

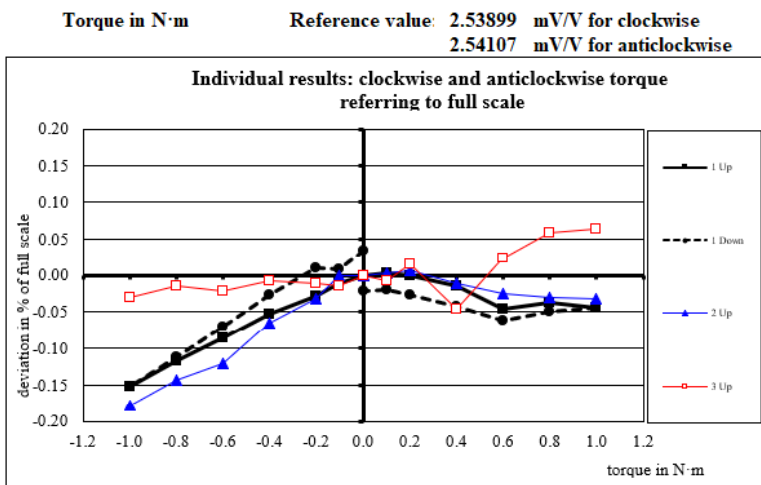


Fig. 5 Deviation in % of torques and uncertainties in the range of 0.1 Nm to 1 Nm

สรุป

ตัวแปลงสัญญาณแรงบิดมาตรฐานอ้างอิง 1 N m ที่มีส่วนรับรู้ความเค้นชนิดแบบแผ่นที่ถูกออกแบบและจัดสร้างจากการวิเคราะห์ด้วย FE และทดลองพบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกัน ผลการเทียบมาตรฐานตัวแปลงสัญญาณแรงบิดมาตรฐานอ้างอิง ที่จัดทำขึ้น พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการแปรเปลี่ยนปริมาณแรงบิดที่เกิดจากการหมุนมุมอยู่ที่ระหว่าง -0.09% ถึง +0.08 % และผลการจำแนกความแม่นยำที่ระดับชั้น 0.5 อยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้เทียบมาตรฐานได้

เอกสารอ้างอิง

ทัศนัย แสนพลพัฒน์, โชคชัย วาดทอง. 2565. การออกแบบและสร้างประแจวัดแรงบิด. การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, จังหวัดกระบี่, 19–21 ตุลาคม 2554.

Section modulus equations and calculators common shapes. Engineering Edge, LLC.

https://www.engineersedge.com/material_science/section_modulus_12893.htm, 22 January 2022.

The pressure strain and force handbook copyright. 1995. Omega Engineering, Inc. Norwalk, CT, USA.

Materials testing machines-Calibration of static torque measuring devices, English translation of DIN

51309:2005-12 ICS 19.060, December 2005.

ประสิทธิภาพของตัวเข้ารหัสแบบหมุนเพื่อการเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็ก

Performance of rotary encoder for steel ruler calibration

วสิน ชมโฉม^{a,b}, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ^{a,*}

Wasin Chomshom^{a,b}, Wiwat Wongkokua^{a,*}

^aภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ คลองหลวง ปทุมธานี 12120

^aDepartment of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bNational Institute of Metrology (Thailand), Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wivat.w@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเข้ารหัสแบบหมุน โดยการจัดสร้างเครื่องมือสำหรับเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่มีองค์ประกอบหลักคือใช้ตัวเข้ารหัสแบบหมุนมาเป็นตัวอ่านค่าความยาว ซึ่งมีระบบวางเลื่อนที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น ใช้สเต็ปมิ่งมอเตอร์ในการบังคับการเคลื่อนที่ และใช้การตรวจจับเส้นสเกลบนบรรทัดเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์ มีระบบคั่นหาระยะทางระหว่างเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการเทียบมาตรฐานแสดงเป็นค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าแก้ และความไม่แน่นอน อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องมือเทียบมาตรฐานที่ใช้ตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้น เพื่อคำนวณค่าสัดส่วน E_n จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กที่ใช้ตัวเข้ารหัสแบบหมุนมีความสามารถเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กได้เนื่องจากมีค่าสัดส่วน E_n น้อยกว่า 1 ซึ่งหมายถึงผลการวัดสอดคล้องกับค่าอ้างอิง

คำสำคัญ: เครื่องมือเทียบมาตรฐานด้านความยาว, ตัวเข้ารหัสแบบหมุน, บรรทัดเหล็ก

Abstract

This research aims to study the performance of the rotary encoder. A semi-automatic instrument was fabricated based on a rotary encoder for length scale reading. The translation state system was linear type motivated by a stepping motor. The scale lines of a steel ruler can be detected by a microscope. The distance between the adjacent lines can be calculated by the software. The measurement results were reported as errors or corrections with associated uncertainties. Moreover, we compared the measurement results with the linear encoder instrument to compare the E_n ratios. From the results, the instrument based on the rotary encoder was enabled to calibrate a steel ruler because the E_n ratios less than one that indicates the measurement results correspond to the reference values.

Keywords: Rotary encoder, Scale calibration machine, Steel ruler

คำนำ

ในปัจจุบันเครื่องมือวัดด้านความยาวนั้นมียู่มากมายหลายชนิด รวมถึงเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่สามารถนำมาใช้ด้วยกันได้ มีทั้งแบบความแม่นยำไปจนถึงความแม่นยำสูงในระดับนาโนเมตร มีทั้งเครื่องมือวัดที่ใช้งานในสภาวะแวดล้อมทั่วไปจนถึงเครื่องมือวัดที่ต้องควบคุมสภาวะแวดล้อมเป็นอย่างดี โดยราคาของเครื่องมือมีตั้งแต่หลักพันบาทไปจนถึงหลักล้านบาท โดยความแตกต่างมาจากเทคโนโลยีที่นำมาใช้รวมถึงระดับความแม่นยำและความไม่แน่นอนที่วัดได้ บรรทัดเหล็กซึ่งเป็นเครื่องมือวัดพื้นฐานที่คนส่วนใหญ่คุ้นเคยเนื่องจากมีราคาถูก (พนัญญา, 2558) การเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือเทียบมาตรฐานที่ใช้ตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้น (linear encoder) ซึ่งเป็นเครื่องมือเทียบมาตรฐานที่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการทั่วไป เนื่องจากตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้นเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาสูง (ยุทธนา, 2552) จึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือเทียบมาตรฐานที่ใช้ตัวเข้ารหัสแบบหมุน (rotary encoder) เพื่อทำการเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็ก ซึ่งสามารถใช้เทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กเกรด 2 ได้ (Kraiprawes et al., 2008) โดยจะเรียกวิธีการนี้ว่า การเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กด้วยสเกลอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสืบมาตรฐานไปยังระบบของหน่วยวัดมูลฐาน (SI base units) ในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์เครื่องมือเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กโดยใช้ตัวเข้ารหัสแบบหมุน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการเทียบมาตรฐาน โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนและความไม่แน่นอนที่ได้จากการวัด และการเปรียบเทียบผลกับเครื่องมือเทียบมาตรฐานที่ใช้ตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้น

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ขึ้นมานี้มีองค์ประกอบต่างๆ แสดงดัง Fig. 1(A) นำมาใช้เพื่อการเทียบมาตรฐานความยาวของบรรทัดเหล็กหรือตลับเมตร โดยมีองค์ประกอบหลักคือตัวเข้ารหัสแบบหมุนต่อเข้ากับปลายด้านหนึ่งของชุดรางเลื่อนแบบเชิงเส้น ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยสกรูบอล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm มีความยาวตลอดทั้งเส้น 400 mm ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับสเต็ปปีงมอเตอร์ ปลายทั้งสองด้านของชุดรางเลื่อนจะมีอะลูมิเนียมยึดหยุ่นได้เชื่อมต่อกัน เพื่อให้ทั้งสเต็ปปีงมอเตอร์และตัวเข้ารหัสแบบหมุนทำงานไปพร้อมกัน และสามารถทำงานได้เมื่อเกิดการบิดเล็กน้อย ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ CCD มาติดอยู่บนชุดรางเลื่อนเพื่อหาตำแหน่งของเส้นสเกลบนบรรทัดเหล็ก ซึ่งเส้นสเกลของบรรทัดเหล็กจะมีตัวเลขบอกระยะทุกๆ 1 cm ในการขับเคลื่อนชุดรางเลื่อนนี้จะใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ต่อเข้ากับ สเต็ปปีงมอเตอร์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์ทำงานเป็นขาเข้า พร้อมกับตัวเข้ารหัสแบบหมุนเป็นขาออก ได้ออกมาเป็นสัญญาณพัลส์ โดย 1 รอบการหมุนของตัวเข้ารหัสจะได้รับสัญญาณ 16,384 พัลส์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวดึงสัญญาณพัลส์ออกมาเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเทียบกับระยะเวลาเคลื่อนที่ และใช้การเขียนโปรแกรม (Labview) หาความสัมพันธ์ของสัญญาณพัลส์กับระยะเวลาเคลื่อนที่ ในรูปแบบฟังก์ชันเส้นตรง เพื่อวิเคราะห์หาสมการ การถดถอย ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของระยะเวลาเคลื่อนที่ของเครื่องมือวัดเทียบกับสเกลมาตรฐาน จำนวนสัญญาณพัลส์ที่ได้จากตัวเข้ารหัสแบบหมุนจะนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อหาค่าความชันและจุดตัดแกน Y ในสมการเส้นตรงเพื่อใช้ทำนายแนวโน้มจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (วรวิทย์, 2564; อุทิศ, 2558) ก่อนที่จะนำเครื่องมือมาเทียบมาตรฐาน บรรทัดเหล็กจะต้องทำการเทียบมาตรฐานเครื่องมือก่อนโดยใช้สเกลมาตรฐานเป็นตัวอ้างอิง โดยแบ่งช่วงความยาวของการเทียบมาตรฐานเครื่องมือออกเป็นสามช่วง ช่วงแรกเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 mm เริ่มจาก 0.5 mm ถึง 3 mm ช่วงที่สองเพิ่มขึ้นทีละ 3 mm เริ่มจาก 3 mm ถึง 30 mm และช่วงสุดท้ายเพิ่มขึ้นทีละ 30 mm เริ่มจาก 30 mm ถึง 300 mm ทำการวัดซ้ำกัน 3 ครั้ง และประเมินความไม่แน่นอนของเครื่องมือ จากนั้นจึงทำการเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กและรายงานความไม่แน่นอนของการวัด

บรรทัดเหล็กมาตรฐานจะแบ่งออกเป็นสองเกรดตามคุณสมบัติ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (maximum permissible error; MPE) ของผู้ใช้งาน ตาม Equation 1 และ Equation 2 ตามลำดับ การเทียบมาตรฐาน บรรทัดเหล็กจะใช้วิธีมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS B 7516:2005 ที่ระบุมาตรฐานบรรทัดเหล็กไว้ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ จะแบ่งตามค่าของความยาว $\{L\}$ ในหน่วย mm (Akasaka and Minato-ku, 2005)

สำหรับเกรด 1 :

$$\pm \left(0.10 + 0.05 \times \frac{\{L\}}{500} \right) \text{ mm} \quad (1)$$

สำหรับเกรด 2 :

$$\pm \left(0.10 + 0.10 \times \frac{\{L\}}{500} \right) \text{ mm} \quad (2)$$

การเปรียบเทียบผลการวัดจะใช้แบบจำลองทางสถิติ วิธีการประเมินผลที่ใช้กันทั่วไปคือ การคำนวณค่าสัดส่วน E_n ตาม Equation 3 เมื่อ x คือ ค่าผลการวัดของเครื่องมือ และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด ส่วนตัวห้อย lab และ ref คือ ค่าผลการวัดที่ได้จากตัวเข้ารหัสแบบหมุน และตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้น ตามลำดับ

$$E_n = \frac{x_{\text{lab}} - x_{\text{ref}}}{\sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2}} \quad (3)$$

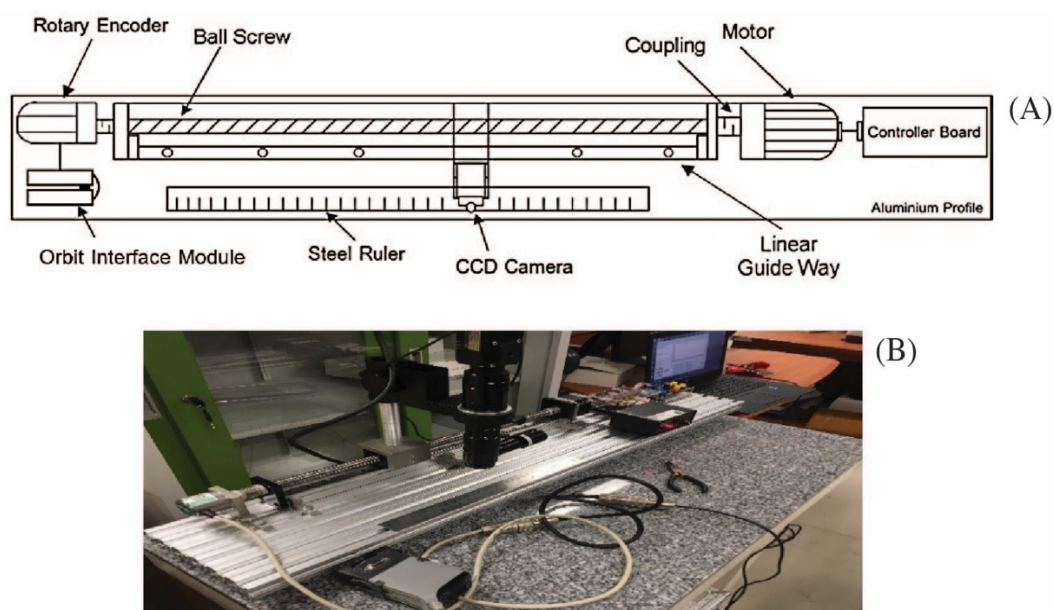


Fig. 1 The scale calibration using rotary encoder: (A) model illustrates; (B) scale calibration machine

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

Table 1 Calibration of steel ruler

No.	Nominal Length (mm)	Measurement (mm)	Correction (mm)
1	300.0	300.177	-0.18
2	300.0	300.156	-0.16
3	300.0	300.142	-0.14
4	300.0	300.168	-0.17
5	300.0	300.136	-0.14
6	300.0	300.154	-0.15
7	300.0	300.126	-0.13
8	300.0	300.150	-0.15
9	300.0	300.161	-0.16
10	300.0	300.145	-0.14
Average		300.151	-0.15

จาก Table 1 แสดงผลการเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กที่มีความยาว 300 mm โดยทำการวัดซ้ำสิบครั้ง และคำนวณค่าแก้ไขได้ค่าเฉลี่ยของผลการวัดเท่ากับ 300.151 mm จากค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ของบรรทัดเหล็กเกรด 2 ขนาด 300 mm ซึ่งเท่ากับ ± 0.16 mm ตามมาตรฐาน JIS B 7516:2005 จะเห็นได้ว่าเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้เทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กเกรด 2 ได้ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องพิจารณาค่าของความไม่แน่นอนประกอบด้วย

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะแบ่งออกเป็น Type A และ Type B การประเมิน Type A คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน $u(x_i)$ ของค่าประมาณอินพุต x_i ประเมินจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของผลการวัดที่ซ้ำๆ กัน และการประเมิน Type B คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าประมาณอินพุต ที่ไม่ใช่เป็นผลของการวัดซ้ำๆ กัน สามารถประเมินได้จากการตัดสินในเชิงวิทยาศาสตร์ โดยใช้พื้นฐานของข้อมูลที่เป็นไปได้ของความแปรผันของ x_i ซึ่งรวมไปถึงข้อมูลในใบรับรองการเทียบมาตรฐาน ข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิต ความไม่แน่นอนที่กำหนดไว้ในข้อมูลที่ต้องการจากคู่มือ หรือปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเทียบมาตรฐาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น (เพียร์, 2554; บรรจบ และอัจฉรา, 2549) จากผลการวัดประเมินความไม่แน่นอน Type A ได้เท่ากับ 4.79×10^{-3} mm ส่วนการประเมิน Type B จะมาจากความละเอียดของเครื่องมือวัด มีค่าเท่ากับ 2.89×10^{-3} mm ความละเอียดของบรรทัดเหล็ก มีค่าเท่ากับ 1.44×10^{-1} mm และความไม่แน่นอนเนื่องจากเครื่องมือมาตรฐานที่ได้จากใบรับรองการเทียบมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 1.10×10^{-4} mm เมื่อนำมาคำนวณหาความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (u_c) และหาความไม่แน่นอนขยาย (U_c) กับตัวประกอบครอบคลุม (k) จะมีค่าเท่ากับ 0.144 mm และ 0.29 mm แสดงดัง Table 2

Table 2 Uncertainty budget of measurements

Quantity (X_i)	Estimate (x_i)	Standard Uncertainty $u(x_i)/\text{mm}$	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient (c_i)	Uncertainty Contribution $u(y_i)/\text{mm}$
Repeatability of measurement, u_{rep}	300 mm	4.79×10^{-3}	Normal	1	4.79×10^{-3}
Readability of machine, $u_{\text{res-std}}$		2.89×10^{-3}	Rectangular	1	2.89×10^{-3}
Readability of Steel Ruler, $u_{\text{res-uuc}}$		1.44×10^{-1}	Rectangular	1	1.44×10^{-1}
Uncertainty of standard, u_{std}		1.10×10^{-4}	Normal	1	1.10×10^{-4}
Measured Length, u_{ml}		Combined uncertainty, u_c			0.144
		Expanded uncertainty, $U_e k = 2$			0.29

งานวิจัยนี้ไม่จำเป็นต้องประเมินความไม่แน่นอนเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้น เนื่องจากได้ทำในห้องปฏิบัติการที่ได้การรับรองมาตรฐาน ISO/IEC17025 ที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น $20 \pm 1^\circ\text{C}$ และ $50 \pm 10\% \text{RH}$ จึงทำให้ไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความยาว และยังมีการวัดอุณหภูมิและความชื้นที่อยู่ในการวิจัย คือ 19.4°C ถึง 20.2°C และ $52.0\% \text{RH}$ ถึง $56.4\% \text{RH}$ ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างตัวเข้ารหัสแบบหมุนกับตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้น ในด้านความยาวมีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดใกล้เคียงกัน ดังแสดงใน Fig. 2A โดยทำการเปรียบเทียบระยะของบรรทัดเหล็กที่เพิ่มขึ้นทีละ 30 mm เริ่มจาก 30 mm ถึง 300 mm รวมทั้งหมดสิบบรรทัด จาก Equation 3 สามารถนำมาคำนวณค่าสัดส่วน E_n แสดงใน Fig. 3B ค่าสัดส่วน E_n ที่มากที่สุดคือ -0.79 โดยมีพิสัยความเผื่อเท่ากับ ± 1 จึงทำให้ผลการวัดนี้สอดคล้องกับค่าอ้างอิงที่เป็นผลการวัดของตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้น ผลของการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด คือการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการ ตามนิยามใน ISO/IEC17043:2010 (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2010)

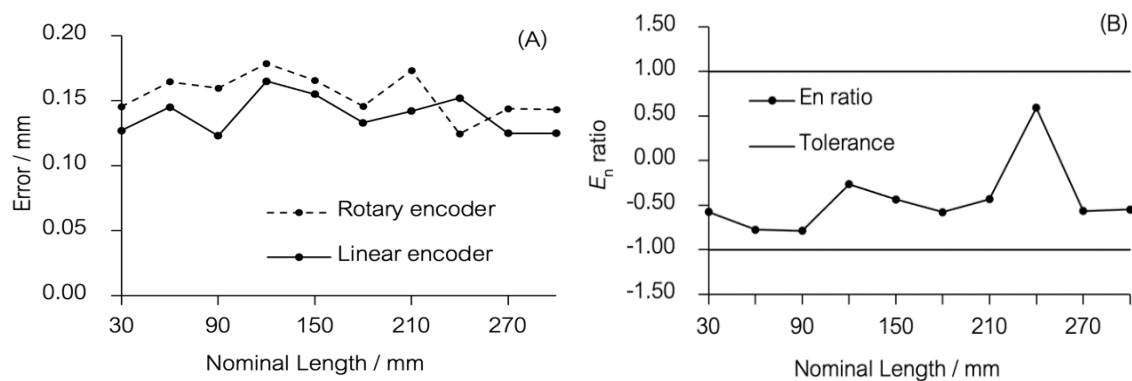


Fig. 2 Comparison of measurement results between rotary encoder and linear encoder: (A) error of measurement results, (B) E_n ratio

สรุป

ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการเทียบมาตรฐานของตัวเข้ารหัสแบบหมุนเท่ากับ 0.011 mm เมื่อนำมาเทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กที่มีความยาว 300 mm ได้ค่าความคลาดเคลื่อน 0.15 mm และความไม่แน่นอนเท่ากับ 0.29 mm เมื่อวัดเปรียบเทียบผลกับตัวเข้ารหัสแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นค่าอ้างอิง ได้อัตราส่วน E_n น้อยกว่า 1 จึงสอดคล้องกับค่าอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าตัวเข้ารหัสแบบหมุนมีประสิทธิภาพสามารถใช้เทียบมาตรฐานบรรทัดเหล็กเกรด 2 ได้ตามค่าความถูกต้องของบรรทัดเหล็ก Equation 2

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสนับสนุนงานวิจัยและการนำเสนอผลงาน จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยมาตรวิทยาและฟิสิกส์ของอุปกรณ์ (MPIR) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- บรรจบ สุขทัต, อัจฉรา เจริญสุข. 2549. ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement). เอกสารประกอบการสอนหลักสูตร The program on measurement standard. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ. พนัญญา สมวงษ์. (2558). ระบบสอบเทียบบรรทัดเหล็กในอุตสาหกรรมด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เพียร ไตท่าโรง. 2554. ระบบมาตรวิทยา. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปทุมธานี. หน้า 1–17.
- ยุทธนา หงส์อารมณิกิจ. 2552. การสอบเทียบไม้บรรทัดเหล็ก. Metrology Info. 11(53): 12–15.
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2564. การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม MS Excel. https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=8206, 27 ตุลาคม 2564.
- สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ. 2010. จังหวะของเวลา. Metrology Info. 12(58): 14–16.
- อุทิศ. 2558. การประยุกต์ใช้สูตร excel สำหรับวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น. <http://learning-be.blogspot.com/2015/01/excel.html>, 20 ตุลาคม 2564.
- Akasaka, Minato-ku, Translated. 2005. Metal rules. In: Tokyo: Japanese Industrial Standard (JIS B 7516). Japanese Standards Association. pp. 2–6.
- Kraiprawes, S., Tonmueanwai, A., Tangamchit, P. 2008. Automatic ruler scale calibration using a rotary machine. Department of Control System and Instrumentation Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi. Bangkok, Thailand.

ผลของอุณหภูมิและค่า pH ต่อการสกัดและสมบัติของเพกตินจากเปลือกโกโก้

Effect of temperature and pH on pectin extraction and properties from cocoa shell

รวิษฎา พลสิน, กิติพงษ์ อัศตรกุล*

Rawisada Pholsin, Kitipong Assatarakul*

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Payathai, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kitipong.a@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของภาวะการสกัดต่อสมบัติของเพกตินจากเปลือกโกโก้ โดยแปรอุณหภูมิ (60°C 70°C และ 80°C) และค่า pH (กรด: pH 4.0 และเบส: pH 10.0) โดยควบคุมภาวะการสกัดด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แบบเขย่า เป็นเวลา 1 hr และความเร็วยรอบ 150 rpm จากการศึกษาการสกัดเพกตินจากเปลือกโกโก้ที่ภาวะต่างๆ พบว่า ปริมาณเพกติน ระดับของเอสเทอริฟิเคชัน และปริมาณกรดกาแลคทูโรนิกมีค่าเท่ากับ 3.50–7.78%, 50.73–84.07% และ 15.15–35.70 µg/mL ตามลำดับ โดยภาวะในการสกัดเพกตินจากเปลือกโกโก้ที่ได้ปริมาณเพกตินสูงสุด คือ อุณหภูมิในการสกัด 70°C และค่า pH 4.0 ซึ่งได้ปริมาณเพกตินเท่ากับ 7.78% มีระดับของเอสเทอริฟิเคชัน 75.83% และมีปริมาณกรดกาแลคทูโรนิก 25.15 µg/mL 33°C

คำสำคัญ ค่า pH, เปลือกโกโก้, เพกติน, อุณหภูมิ

Abstract

The objective of this research was to study the effect of extraction conditions on the properties of pectin from cocoa shell by varying temperatures (60°C, 70°C, and 80°C) and pH values (acidic = pH 4.0 and alkaline = pH 10.0). The extraction was performed by shaking water bath for 1 hr with the speed of 150 rpm. The results showed that the yield of pectin, the degree of esterification and galacturonic acid content were in range of 3.50–7.78%, 50.73–84.07% and 15.15–35.70 µg/mL, respectively. The extraction conditions at 70°C and pH 4.0 exhibited the highest yield of pectin (7.78%) with the degree of esterification and content of galacturonic acid equal to 75.83% and 25.15 µg/mL, respectively.

Keywords: Cocoa shell, Pectin, pH value, Temperature

คำนำ

เปลือกโกโก้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปจากอุตสาหกรรมโกโก้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากเปลือกโกโก้ถูกใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อเสริมคุณค่าทางอาหาร (Jozinovi et al., 2017) ในเปลือกโกโก้มีเพกทินซึ่งเป็นใยอาหารที่ละลายในน้ำ และเป็นใยอาหารที่พบในปริมาณมากที่สุดในเปลือกโกโก้ (Redgwell et al., 2003) นอกจากนี้เพกทินยังจัดเป็นพรีไบโอติกประเภทหนึ่งและนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เป็นสารทำให้ข้นหนืด และใช้เป็น edible fiber ในรูปของอาหารเสริมสุขภาพ ซึ่งช่วยลดคอเลสเตอรอลและระดับน้ำตาลในเลือดได้ (ชวนิภูรัฐ และคณะ, 2548) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดเพกทินจากเปลือกโกโก้ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดและค่า pH ของสารละลายที่ใช้ในการสกัด เพื่อให้ได้ปริมาณเพกทินสูงสุด และสมบัติของเพกทินที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

- 0.1 M กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl)
- 0.1 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)
- 0.05 M NaOH
- 95% เอทานอล (ethanol)
- ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein)
- กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (concentrated sulfuric acid)
- สารละลายคาร์บาซอล (carbazole solution)
- สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite solution)

การเตรียมตัวอย่างเปลือกโกโก้

ใช้เปลือกโกโก้สายพันธุ์ชุมพร 1 จากจังหวัดน่าน โดยล้างเปลือกโกโก้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 200 ppm และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 hr บดตัวอย่างให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบด และผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 mesh เก็บตัวอย่างในถุงออลูมิเนียมฟอยด์ลามิเนตภายใต้ภาวะสุญญากาศ จากนั้นเก็บตัวอย่างผงเปลือกโกโก้แห้งที่อุณหภูมิ -40°C ก่อนใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

การสกัดเพกทินจากเปลือกโกโก้

ใช้น้ำปรับกรด (acidified water) ที่แปรค่า pH ให้อยู่ในช่วงกรด คือ pH 4.0 และเบส คือ pH 10.0 เพื่อศึกษาภาวะการสกัดในสารละลายกรดและสารละลายเบสต่อปริมาณและสมบัติของเพกทินที่สกัดได้ โดยใช้ 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH ตามลำดับ แปรอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 60°C 70°C และ 80°C และควบคุมภาวะการสกัดด้วยความเร็วรอบในการสกัด 150 rpm เป็นเวลา 1 hr

ชั่งน้ำหนักเปลือกโกโก้ 10 g ใส่ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 200 mL (อัตราส่วน 1:20 g/mL) ปรับค่า pH ตามที่กำหนดด้วย HCl หรือ NaOH และสกัดเพกทินภายใต้ภาวะที่กำหนด จากนั้นปั่นเหวี่ยงสารละลายเพกทินที่สกัดได้ ด้วยความเร็วรอบ 8,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 15 min แยกส่วน supernatant ออกมาเติม 95% เอทานอลในอัตราส่วน 2:1 v/v ผสมให้เข้ากันและวางทิ้งไว้ เป็นเวลา 2 hr แยกตะกอนเพกทินโดยการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 8,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 15

min ล้างตะกอนเพกทินที่ได้ด้วย 95% เอทานอล จำนวน 3 ครั้ง และอบแห้งที่ 50°C โดยใช้ vacuum dryer จากนั้น บดเพกทินอบแห้ง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 mesh ตามลำดับ

การวิเคราะห์สมบัติของเพกทินที่สกัดได้

ร้อยละของเพกทิน (%yield)

คำนวณปริมาณเพกทินที่สกัดได้จากเปลือกโกโก้ โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างผงเปลือกโกโก้แห้ง ตาม Equation 1

$$\text{ร้อยละของเพกทิน} = \left(\frac{\text{น้ำหนักเพกทินแห้ง (g)}}{\text{น้ำหนักผงเปลือกโกโก้แห้ง (g)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Degree of esterification (%DE) ตามวิธีของ Kazemi et al. (2019) และ Pasandide et al. (2018)

ชั่งน้ำหนักเพกทิน 20 mg เติมน้ำเอทานอล 2 mL และน้ำปราศจากไอออน (deionized water) 20 mL กวนจนเพกทินละลาย และเติม phenolphthalein 3-5 หยด จากนั้นไทเทรตสารละลายเพกทินด้วย 0.1 M NaOH จนกระทั่งสารละลายเพกทินเป็นสีชมพู (ปริมาตร NaOH ที่ใช้ คือ V_1) เติม 0.1 M NaOH ปริมาตร 10 mL ซึ่งสารละลายจะมีสีชมพูเข้มขึ้น กวนสารละลายเป็นเวลา 20 min จากนั้นเติม 0.1 M HCl ปริมาตร 10 mL เพื่อให้สารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นไม่มีสี และไทเทรตอีกครั้งด้วย 0.1 M NaOH จนกระทั่งสารละลายเพกทินเป็นสีชมพูอีกครั้ง (ปริมาตร NaOH ที่ใช้ คือ V_2) และคำนวณ %DE ตาม Equation 2

$$\%DE = \left(\frac{V_2}{V_2 + V_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

Galacturonic acid (Gla) content ตามวิธีของ Yu et al. (2021) และของอาจ (2553)

ชั่งน้ำหนักเพกทิน 0.1 g ผสมกับ 0.05 M NaOH ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรเป็น 100 mL ด้วย 0.05 M NaOH ผสมให้เข้ากัน และวางทิ้งไว้ 30 min จากนั้นปิเปตสารละลายเพกทิน ปริมาตร 10 mL แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 mL ปิเปตสารละลายเจือจางใส่ลงในหลอดทดลอง 3 หลอด ๆ ละ 2 mL เติมสารละลาย คาร์บาซอลเข้มข้น 0.1% ลงในหลอดทดลอง หลอดละ 1 mL และเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปริมาตร 12 mL ผสมให้เข้ากัน และวางทิ้งไว้ 25 min จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 525 nm เพื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดกาแลคทูโรนิกจากกราฟมาตรฐาน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและค่า pH ต่อสมบัติของเพกทินจากเปลือกโกโก้พบว่า ปริมาณเพกทินอยู่ในช่วง 3.50–7.78% โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 60 เป็น 70°C ปริมาณเพกทินที่สกัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Fig. 1 เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นช่วยในการละลายของเพกทินและส่วนประกอบอื่นๆ ของเพกทินที่อยู่ในผนังเซลล์ของพืช เช่น โปรโตเพกทิน (protopectin) ส่งผลให้ปริมาณเพกทินที่สกัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น (Greve et al., 1994) นอกจากนี้ในภาวะที่อุณหภูมิต่ำอาจไม่เพียงพอต่อการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของโปรโตเพกทิน ซึ่งเป็นรูปแบบของเพกทินที่ไม่ละลายน้ำ (El-Nawawi and Shehata, 1987) ในขณะที่การสกัดเพกทินที่อุณหภูมิ 80°C พบว่า ปริมาณเพกทินที่สกัดได้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการสกัดที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปสามารถกระตุ้นการไฮโดรไลซิสของเพกทินไปเป็น

น้ำตาลสายสั้น ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนโดยใช้เอทานอล ส่งผลให้ปริมาณเพกตินที่สกัดได้มีค่าลดลง (Canteri-Schemin et al., 2005)

การศึกษาค่า pH ต่อปริมาณเพกตินที่สกัดจากเปลือกโกโก้พบว่า การสกัดด้วยสารละลาย pH 4.0 ได้ปริมาณเพกตินสูงกว่า pH 10.0 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ojeda et al. (2016) โดยระบุว่า ปริมาณเพกตินที่สูงขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายที่ใช้สกัดลดลงหรือมีความเป็นกรดสูงขึ้น อาจสัมพันธ์กับการไฮโดรไลซิสที่เพิ่มขึ้นในพันธะของโปรโทเพกติน ซึ่งเปลี่ยนเป็นเพกตินที่สามารถละลายน้ำได้ นอกจากนี้การใช้ความร้อนร่วมกับสารละลายที่เป็นกรดช่วยสลายพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) และพันธะเอสเทอร์ (ester bond) ที่เชื่อมระหว่างเพกตินกับผนังเซลล์ และเพิ่มอัตราการแพร่และการสกัดเพกติน (Hamidon and Zaidel, 2017) ส่งผลให้ปริมาณเพกตินที่สกัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น

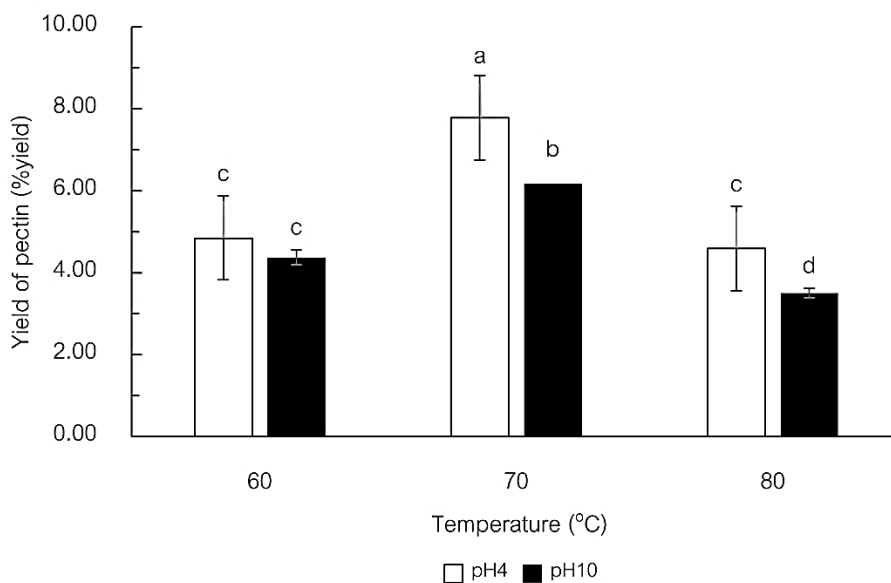


Fig. 1 Effect of temperature and pH on the yield of pectin extracted from cocoa shell

นอกจากนี้จากการศึกษาค่าของอุณหภูมิและค่า pH ต่อสมบัติของเพกตินที่สกัดจากเปลือกโกโก้พบว่า การสกัดที่ภาวะแตกต่างกัน ส่งผลให้ระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันมีค่าต่างกัน ดังแสดงใน Fig. 2 ซึ่งระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันแสดงถึงปริมาณหมู่เมทอกซิล (methoxyl group) ที่เป็นองค์ประกอบของเพกติน โดยทั่วไปเพกตินสามารถแบ่งประเภทได้ 2 ชนิด คือ high methoxyl (HM) pectin ที่มีระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันมากกว่า 50% และ low methoxyl (LM) pectin ที่มีระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันต่ำกว่า 50% โดยเพกตินที่สกัดได้จากเปลือกโกโก้จากทุกภาวะการสกัดมีระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันมากกว่า 50% ดังนั้นจึงจัดเป็น HM pectin ซึ่งเป็นประเภทของเพกตินที่มีความคงตัวและมีความหนืดสูง และไม่จำเป็นต้องใช้ไอออนของโลหะหนักในการเกิดเจล (องอาจ, 2553) โดยเพกตินจากการสกัดด้วยภาวะกรด (pH 4.0) มีระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันสูงกว่าการสกัดที่ภาวะเบส (pH 10.0) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากในภาวะเบสสามารถเร่งการเกิดการสลายหมู่เอสเทอร์ (de-esterification) ส่งผลให้เพกตินที่สกัดได้มีระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันต่ำ (Yu et al., 2021)

กรดกาแลคทูโรนิกมีโครงสร้างเป็นสายตรง (linear chain) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโมเลกุลเพกติน (Mohnen, 2008) การใช้ภาวะการสกัดที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณกรดกาแลคทูโรนิกของโมเลกุลเพกตินที่สกัดได้มีค่าต่างกัน เนื่องจากโมเลกุลเพกตินถูกทำลายในระหว่างกระบวนการสกัดมากน้อยต่างกัน (องอาจ, 2553) จาก Fig. 3 พบว่า เพกตินที่สกัดได้จากเปลือกโกโก้ทุกภาวะการสกัดมีองค์ประกอบของกรดกาแลคทูโรนิกอยู่ในช่วง 14.96–35.70 $\mu\text{g/mL}$ และการสกัดที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C พบว่า เพกตินที่ได้จากการสกัดที่ภาวะเบส (pH 10.0) มีปริมาณกรดกาแลคทูโรนิกของโมเลกุลเพกตินลดลง

จากการสกัดที่ภาวะกรด (pH 4.0) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยลดลงจากช่วง 70.20–75.83 เป็น 50.73–55.67 $\mu\text{g/mL}$ เนื่องจากการสกัดเพกทินในภาวะเบสก่อให้เกิดปฏิกิริยา β -elimination ซึ่งเป็นหนึ่งในกลไกการย่อยสลายเพกทิน และปฏิกิริยานี้สามารถตัดฮอโมกาแลคทูโรแนน (homogalacturonan) ที่เป็นแกนหลักของโมเลกุลเพกทินให้กลายเป็นโอลิโกเมอร์ของพอลิกลาแลคทูโรนิกและ rhamnagalacturonan I (RG-I) ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดได้ที่ความยาวคลื่นสำหรับการตรวจวัดกรดกาแลคทูโรนิก ส่งผลให้ปริมาณกรดกาแลคทูโรนิกที่วัดได้มีค่าลดลง (Fracasso et al., 2018)

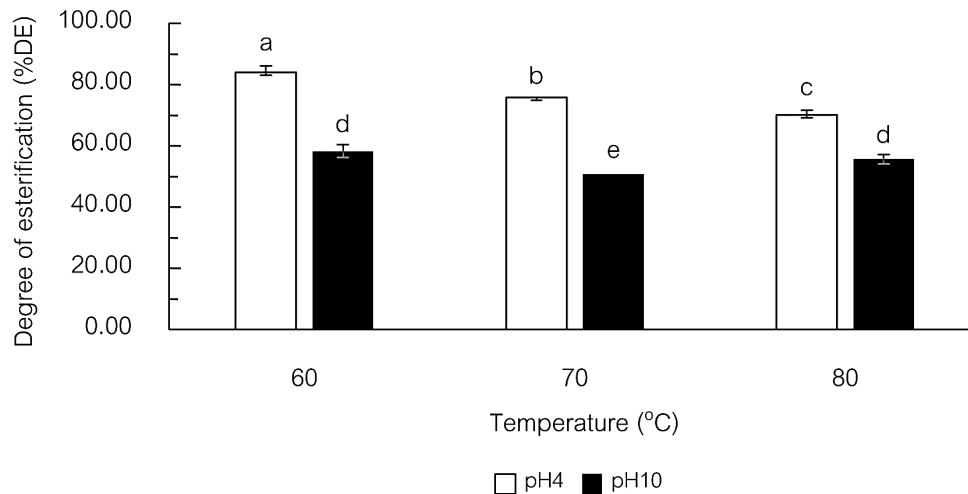


Fig. 2 Effect of temperature and pH on the degree of esterification (%DE) of pectin extracted from cocoa shell

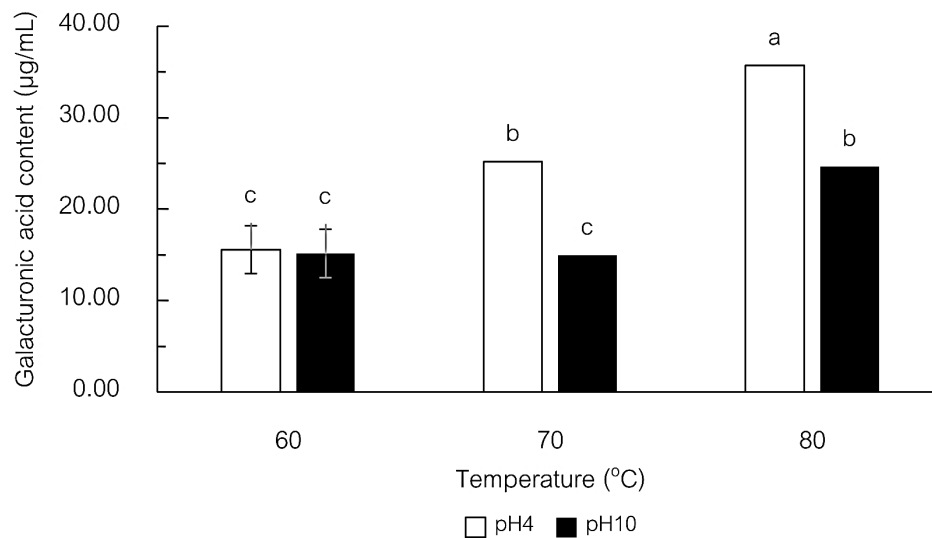


Fig. 3 Effect of temperature and pH on galacturonic acid content of pectin extracted from cocoa shell

สรุป

การสกัดเพกทินจากเปลือกโกโก้โดยใช้อุณหภูมิและค่า pH ต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณเพกทิน ระดับของเอสเทอร์ฟิเคชัน และกรดกาแลคทูโรนิกของเพกทินที่สกัดได้มีค่าต่างกัน โดยมีค่าในช่วง 3.50–7.78%, 50.73–84.07% และ 15.15–35.70 $\mu\text{g/mL}$ ตามลำดับ และภาวะในการสกัดที่ได้ปริมาณเพกทินสูง คือ การสกัดที่อุณหภูมิ 70°C และค่า pH 4.0 โดยสกัดได้ปริมาณเพกทิน 7.78% ที่มีระดับของเอสเทอร์ฟิเคชัน 75.83% และมีปริมาณกรดกาแลคทูโรนิก 25.15 $\mu\text{g/mL}$ นอกจากนี้เพกทินที่สกัดได้จากเปลือกโกโก้จัดเป็น HM pectin เนื่องจากมีระดับของเอสเทอร์ฟิเคชันสูงกว่า 50% และการใช้อุณหภูมิในการสกัดที่สูงขึ้น

ร่วมกับการใช้กรดในการสกัด ส่งผลให้ได้ปริมาณเพกตินเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิในการสกัดที่สูงเกินไป เพกตินสามารถถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นน้ำตาลสายสั้น ส่งผลให้ปริมาณเพกตินที่สกัดได้มีค่าลดลง ดังนั้นการเลือกภาวะในการสกัดเพกตินที่เหมาะสม ส่งผลให้ได้ปริมาณและสมบัติของเพกตินที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการ “การยกระดับห่วงโซ่อุปทานโกโก้ในพื้นที่จังหวัดน่านบนฐานทรัพยากรพื้นที่ถิ่นสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน” ซึ่งได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจากหน่วยบริหารและจัดการทุนวิจัยด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) ภายใต้แผนงานริเริ่มสำคัญ (Flagship) ประจำปี 2564

เอกสารอ้างอิง

- ชวนิษฐ สิริดิถิตถรัตน์, พิลาณี ไวกนอมสัจย์, จิราพร เชื้อกุล, ปริศนา สิริอาชา. 2548. การผลิตเพกตินจากเปลือกและ กากผล ส้มเหลืองทิ้ง. ใน: เรื่องเตรียมการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 469–480.
- องอาจ เด็ดดวง. 2553. การเปรียบเทียบเพกตินสกัดจากฝรั่งสามชนิดกับเพกตินมาตรฐาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Canteri-Schemin M.H., Fertonani H.C.R., Waszczyński N., Wosiacki G. 2005. Extraction of pectin from apple pomace. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 48(2): 259–266.
- El-Nawawi, S.A., Shehata, F.R. 1987. Extraction of pectin from Egyptian orange peel. Factors affecting the extraction. *Biol. Wastes.* 20: 281–290.
- Fracasso, A.F., Perussello, C.A., Carpine, D., Petkowicz, C.L.D.O., Haminiuk, C.W.I. 2018. Chemical modification of citrus pectin: Structural, physical and rheological implications. *Int. J. Biol. Macromol.* 109: 784–792.
- Greve, L.C., McArdle, R.N., Gohlke, J.R., Labavitch, J.M. 1994. Impact of heating on carrot firmness: Changes in cell wall components. *J. Agric. Food Chem.* 42: 2900–2906.
- Hamidon, N.H., Zaidel, D.N.A. 2017. Effect of extraction conditions on pectin yield extracted from sweet potato peels residues using hydrochloric acid. *Chem. Eng. Trans.* 56: 979–984.
- Jozinovic, A., Panak Balentic, J., Ackar, D., Babic, J., Pajin, B., Milicevic, B., Guberac, S., Subaric, D. 2017. Cocoa husk application in enrichment of extruded snack products. In: *Proceedings of the Fourth International Congress on Cocoa Coffee and Tea*, pp. 68.
- Kazemi, M., Khodaiyan, F., Hosseini, S.S. 2019. Eggplant peel as a high potential source of high methylated pectin: Ultrasonic extraction optimization and characterization. *LWT-Food Sci. Technol.* 105: 182–189.
- Mohnen, D. 2008. Pectin structure and biosynthesis. *Curr. Opin. Plant Biol.* 11(3): 266–277.
- Ojeda, K.A., Marsiglia, D.E., Ramirez, M.C., Sanchez, E. 2016. Pectin extraction from cocoa pod husk (*Theobroma cacao L.*) by hydrolysis with citric and acetic acid. *Int. J. Chem1Tech Res.* 9(7): 497–507.
- Pasandide, B., Khodaiyan, F., Mousavi, Z., Hosseini, S.S. 2018. Pectin extraction from citron peel: optimization by Box-Behnken response surface design. *Food Sci. Biotechnol.* 27: 997–1005.

Redgwell, R., Trovato, V., Merinat, S., Curti, D., Hediger, S., Manez, A. 2003. Dietary fibre in cocoa shell: characterisation of component polysaccharides. *Food Chemistry*. 81: 103–112.

Yu, M., Xia, Y., Zhou, M., Guo, Y., Zheng, J., Zhang, Y. 2021. Effects of different extraction methods on structural and physicochemical properties of pectins from finger citron pomace. *Carbohydr. Polym.* 258: 117662.

ผลของการอบแห้งต่อปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลัง

Effect of drying on cyanide content in cassava

พิมภัก ทวีวงษ์, จิรรัตน์ อนันตกุล*

Pimphak Thaweewong, Jirarat Anuntagool*

^aภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^aDepartment of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: jirarat.t@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การผลิตแป้งมันสำปะหลังในปัจจุบันโดยการโม่เปียก ซึ่งมีการใช้น้ำและทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก การโม่แห้งเป็นทางเลือกที่มีการใช้น้ำน้อย แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ตามมาตรฐาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งต่อปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลัง และศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังโม่แห้ง จากการทดลองอบแห้งที่ 60°C 70°C และ 80°C พบว่ามันสำปะหลังมีไซยาไนด์เพิ่มขึ้นในช่วง 40 นาทีแรก และลดลงในช่วงหลังของการอบแห้ง โดยการอบแห้งที่ 80°C นาน 240 นาที ทำให้ปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลังลดลงตั้งแต่ร้อยละ 54 ถึงร้อยละ 78 ของปริมาณไซยาไนด์ตั้งต้น (ฐานแห้ง) แต่การลดดังกล่าวยังไม่ทำให้แป้งมันสำปะหลังโม่แห้งมีปริมาณไซยาไนด์ต่ำกว่ามาตรฐาน นอกจากนี้พบว่าแป้งมันสำปะหลังโม่แห้งมีความสามารถในการจับน้ำ กำลังการพองตัว การละลาย และความหนืดสูงสุดสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตจากกระบวนการโม่เปียก

คำสำคัญ: ไซยาไนด์, แป้งมันสำปะหลัง, โม่เปียก, โม่แห้ง, อบแห้ง

Abstract

The current cassava starch production is done by wet milling, which utilizes a substantial amount of water and causes a large amount of wastewater. Dry milling is an alternative method with low water consumption. The limitation of the dry milling method is that it cannot reduce the level of cyanide content to comply with the standard. This research aimed to study the effect of drying temperature on the change of cyanide content in cassava before milling. The experiment was carried out by drying at 3 different temperatures, at 60, 70 and 80°C, and cyanide content in cassava was monitored during drying. It was found that cassava had increased cyanide during the first 40 minutes of drying, and cyanide was reduced in the latter part of drying. Drying at 80 °C for 240 minutes resulted in a reduction in the cyanide content of cassava from 54% to 78% (dry basis). However, this reduction did not result in starch that complies with standard cyanide content in cassava starch. The swelling capacity, solubility and peak viscosity of dry-milled cassava flour were higher than the cassava starch produced by wet milling.

Keywords: Cassava flour, Cyanide, Dry milling, Drying, Wet milling

คำนำ

อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง นับเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย โดยส่วนหัวหรือรากมันสำปะหลัง นิยมนำมาแปรรูปเป็นสตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava starch) หรือเรียกว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ หรือนำไปทำสตาร์ชตัดแปรรูป น้ำเชื่อมกลูโคส มอลโทเดกซ์ทริน เป็นต้น

ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycosides) คือ ไซยาไนด์ที่เชื่อมกับโมเลกุลแป้ง พบในทุกส่วนของมันสำปะหลัง ซึ่งมีรายงานว่าไม่มีพิษ แต่เมื่อมีการทำให้เนื้อเยื่อพืชเสียหาย เช่น กระบวนการแปรรูป สารในกลุ่มไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์จะถูกย่อยโดยเอนไซม์ลินามาเรส (linamarase) ทำให้เกิดไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ซึ่งเป็นพิษ นอกจากไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ ในมันสำปะหลังยังมีไซยาไนด์ในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ ไซยาโนไฮไดริน (cyanohydrin) เป็นไซยาไนด์ที่เชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่นที่ไม่ใช่แป้ง และไซยาไนด์อิสระ (free cyanide) ซึ่งจะอยู่ในรูปกรดไฮโดรเจนไซยาไนด์ กระบวนการแปรรูปโดยการไม่เปียกสามารถกำจัดสารประกอบไซยาไนด์ได้ โดยมีไซยาไนด์อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังกำหนดให้แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณไซยาไนด์ไม่เกิน 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง (Cardoso et al., 2005; Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 1991)

ในอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ทำได้โดยใช้วิธีการไม่เปียก (Wet-milling) โดยการไม่จะเป็นการสกัดแป้งออกจากหัวมัน ซึ่งวิธีนี้สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังจนถึงระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อการบริโภค แต่วิธีการไม่เปียกนี้มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตมาก ทำให้เกิดน้ำเสียจากการผลิตมากตามไปด้วย ส่งผลต่อต้นทุนทั้งในเรื่องปริมาณน้ำ และการบำบัดของเสีย ส่วนวิธีการไม่แห้ง (dry-milling) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ไม่มีการใช้น้ำในระบบการผลิต ทำให้สามารถประหยัดต้นทุนและพลังงานได้ อีกทั้งยังช่วยลดภาระในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการไม่เปียก แต่การไม่แห้งจะทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณไซยาไนด์สูงเกินมาตรฐาน โดยรายงานของ Ginting และ Widodo (2013) พบว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์ลดลงจาก 85 เป็น 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ทั้งนี้ยังไม่พบว่ามีการศึกษาผลของระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลัง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลังเพื่อใช้ผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังไม่แห้ง เพื่อเป็นประโยชน์ในการกำหนดอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งที่จะลดปริมาณไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมมันสำปะหลัง

นำมันสำปะหลังสดมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก และหั่นเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.5 เซนติเมตร × 0.5 เซนติเมตร × 0.5 เซนติเมตร และนำเนื้อมันสำปะหลังที่ได้มาอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 60°C, 70°C และ 80°C ตรวจสอบค่ากิจกรรมของน้ำของมันสำปะหลังอบแห้งโดยใช้เครื่องวัดกิจกรรมของน้ำ โดยควรมีค่าไม่เกิน 0.6 ติดตามปริมาณไฮโดรเจนไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้ง จากนั้นนำมันสำปะหลังอบแห้งที่ได้มาโม่ และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh เก็บแป้งที่ได้ในถุงปิดสนิท แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณไซยาไนด์ ความสามารถในการจับน้ำ กำลังการพองตัว การละลาย ความชื้น สมบัติการเกิดเฟส และสี

การหาปริมาณไซยาไนด์

ซึ่งตัวอย่าง 0.3 กรัม จากนั้นเติมสารละลายที่ใช้สกัด 1 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำอุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 9000 g ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 15 นาที ปิดสารละลายส่วนใสมา 0.1 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.0 ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร และ Chloramine-T เข้มข้น 0.5% ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร นำไปแช่เย็น 5 นาที แล้วเติม pyridine/pyrazolone 0.8 มิลลิลิตร วางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง 90 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร และคำนวณปริมาณไซยาไนด์ตาม Equation 1

$$\text{Cyanide concentration (ppm)} = \frac{\text{volume} \times \text{Abs} \times 10}{\text{Abs of } 1 \mu\text{g HCN} \times \text{weight of sample}} \quad (1)$$

ความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity)

ซึ่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร นำหลอดไปแช่ใน shaking water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 9000 g เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งน้ำหนักตะกอนแห้งและคำนวณค่าความสามารถในการจับน้ำตาม Equation 2

$$\text{Water binding capacity} = \frac{\text{weight of residual} - \text{weight of sample}}{\text{weight of sample}} \quad (2)$$

กำลังการพองตัว (Swelling power) และการละลาย (Solubility)

ซึ่งตัวอย่าง 0.5 กรัม เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร นำไปต้มใน shaking water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 60, 70, 80 และ 90°C โดยแช่ตลอดเวลา เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 9000 g เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งน้ำหนักตะกอนแห้ง นำสารละลายส่วนใสไปอบแห้งที่ 105°C แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก คำนวณกำลังการพองตัว และการละลายตาม Equation 3 และ 4

$$\text{Swelling power (g/g)} = \frac{\text{weight of sedimental paste}}{\text{weight of sample} \times [(100 - \text{solubility})/100]} \quad (3)$$

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{\text{weight of soluble starch} \times 100}{\text{weight of sample}} \quad (4)$$

ความชื้น

วิเคราะห์ความชื้นของตัวอย่างโดยการอบด้วยลมร้อนที่ 105°C จนน้ำหนักคงที่ตามวิธีของ AOAC (2005)

สมบัติการเกิดเพสต์ (Pasting properties)

วัดสมบัติการเกิดเพสต์โดยใช้เครื่อง Rapid visco analyzer (RVA) ใช้ standard profile AACC (2000) บันทึกอุณหภูมิที่น้ำแป้งเกิดเจลานีในซีแซน (pasting temperature) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ความหนืดสูงสุด

(peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ผลต่างความหนืดสูงสุดกับต่ำสุด (breakdown) การคืนตัวของสตาร์ช (setback) และความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

ค่าสี

วัดค่าสีโดยใช้เครื่อง colorimeter โดยวัดเป็นค่า $L^* a^* b^*$ และคำนวณค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ตาม Equation 5

$$\text{Whiteness index} = \sqrt{(100-L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (5)$$

การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DNMRT) ระบุความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมันสำปะหลังต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ โดยแปรอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 60°C, 70°C และ 80°C พบว่าการอบแห้งในช่วง 40 นาทีแรกส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์เพิ่มขึ้น ส่วนการอบแห้งตั้งแต่นาทีที่ 40 เป็นต้นไปส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์ลดลง (Fig. 1) ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ในระหว่างการอบแห้ง (k) ทั้ง 2 ช่วง แสดงใน Table 1

ผลการเพิ่มขึ้นของไซยาไนด์ในมันสำปะหลังที่ช่วง 0–40 นาที ของการอบแห้งแสดงใน Fig. 1(A) โดยการเพิ่มขึ้นของไซยาไนด์ในระหว่างการอบแห้งช่วง 40 นาทีแรกเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง นั่นคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง โดยอุณหภูมิการอบแห้ง ได้แก่ 60°C, 70°C และ 80°C มีค่า k เท่ากับ 0.0190, 0.0178 และ 0.0140 ppm/min ตามลำดับ โดยค่า k ของอุณหภูมิ 60°C มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ โดยปกติแล้วไซยาไนด์ในมันสำปะหลังจะอยู่ในรูปไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycoside) ซึ่งเรียกว่าลินามาริน (linamarin) เมื่อมีการกระทำให้น้ำเยื่อพืชเสียหายจะทำให้เกิดการย่อยของเอนไซม์ลินามารเอส (linamarase) ทำให้ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์เปลี่ยนรูปไปเป็นไซยาโนไฮไดริน (cyanohydrin) และถูกเอนไซม์ไฮโดรอกซีไนไตรไลเอส (hydroxynitrile lyase) ย่อยต่อจนกลายเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ทั้งนี้นอกจากการเปลี่ยนรูปของไซยาไนด์โดยใช้เอนไซม์แล้ว ในขั้นการเปลี่ยนจากไซยาโนไฮไดรินไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยไม่ต้องใช้เอนไซม์ถ้าอยู่ในสภาวะที่มีค่า pH เท่ากับ 5 หรือที่อุณหภูมิในช่วง 50–60°C จะช่วยเร่งการเปลี่ยนแปลงนี้ ทั้งนี้ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ไม่สามารถระเหยออกจากมันสำปะหลังได้เอง จึงต้องทำให้เกิดการเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ จึงจะสามารถระเหยและกำจัดไซยาไนด์ออกจากมันสำปะหลังได้ (Szabo et al., 2010) ทั้งนี้ในการเตรียมมันสำปะหลังจะปอกเปลือกและหั่นเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำให้มีเนื้อเยื่อพืชบางส่วนถูกทำลายและเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเอนไซม์แล้วส่วนหนึ่ง และเมื่อนำไปอบแห้ง การให้ความร้อนจะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนไซยาโนไฮไดรินไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์และระเหยออกไปในที่สุด โดยการที่ใช้อุณหภูมิตั้งที่ 60°C สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ได้มากที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเปลี่ยนไซยาโนไฮไดรินไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ โดยในช่วงแรกจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนจากลมร้อนเข้าสู่มันสำปะหลัง ทำให้มันสำปะหลังมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อใช้ระเหยน้ำ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ช่วงแรกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไซยาโนไฮโดรจีนกลายเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ ทำให้ไซยาไนด์ในช่วงแรกเกิดการเพิ่มขึ้น ค่า k ที่ลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งแสดงให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในตัวอย่างลดลงตามอุณหภูมิ ซึ่งอาจจะเกิดเนื่องจากไฮโดรเจนไซยาไนด์ระเหยได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

การลดลงของไซยาไนด์ในช่วงหลังของการอบแห้งที่เวลา 40–240 นาที แสดงใน Fig. 1(B) โดยการลดลงของปริมาณไซยาไนด์เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่สอง กล่าวคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้น ยกกำลังสอง มีค่า k เท่ากับ 0.0032, 0.0047 และ 0.0040 ppm/min ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ โดยการลดลงของไซยาไนด์ในช่วงหลังจากการที่อุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้เกิดการระเหยและสลายตัวของไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่สามารถระเหยไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้คือตั้งแต่ 25.6°C และจะระเหยได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

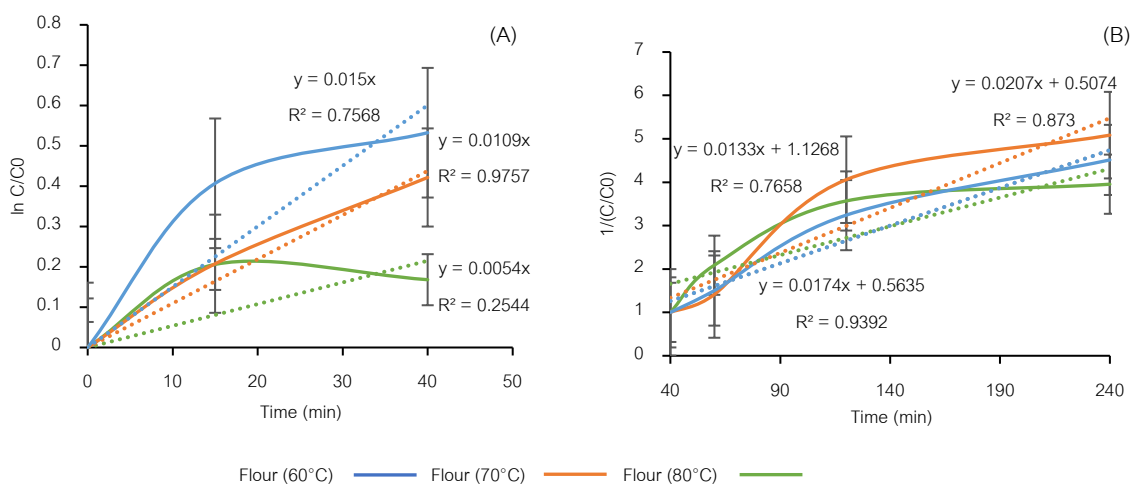


Fig. 1 Removal of cyanide from cassava at different drying temperatures (60°C, 70°C and 80°C). Exponential decay equations are shown: (A) Cyanide development at 0–40 min; (B) Cyanide degradation at 40–240 min

Table 1 k -value and R^2 of cyanide development at 0–40 and degradation at 40–240 min

Samples	Cyanide development at 0–40 min		Cyanide degradation at 40–240 min	
	k^{ns} (ppm/min)	R^2	k^{ns} (ppm/min)	R^2
Flour (60°C)	0.0190±0.0117	0.8307–0.9446	0.0032±0.0028	0.7514–0.8763
Flour (70°C)	0.0178±0.0083	0.9701–0.9995	0.0047±0.0012	0.6016–0.9984
Flour (80°C)	0.0140±0.0069	0.8684–0.9066	0.0040±0.0015	0.6232–0.8373

อัตราส่วนของปริมาณไซยาไนด์หลังอบแห้งต่อไซยาไนด์เริ่มต้นแสดงใน Fig. 2 โดยอุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) แต่มีแนวโน้มของการลดลงของปริมาณไซยาไนด์ตามอุณหภูมิในการอบแห้ง

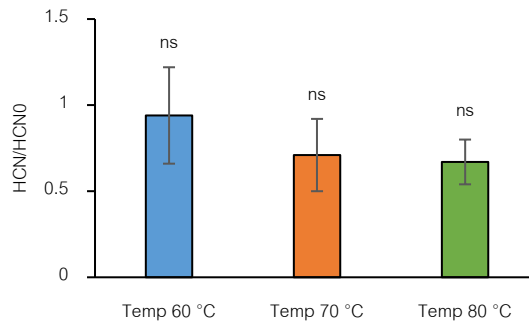


Fig. 2 HCN concentration ratio of dry-milled cassava flour at different drying temperatures (60°C, 70°C and 80°C)

ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชมันสำปะหลังที่เป็นแป้งที่ได้จากการไม่เปียกซึ่งใช้เป็นตัวอย่างควบคุมเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ได้จากไม่แห้งที่อบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีความสามารถในการจับน้ำมากกว่าสตาร์ชในทุกตัวอย่าง (Fig. 3) ทั้งนี้เนื่องจากแป้งที่ผ่านการอบแห้งก่อนแล้วนำไปไม่จะได้รับแรงเคียนโดยตรง ทำให้เม็ดแป้งที่เกิดความเสียหายมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ได้ใช้น้ำซึ่งจะช่วยรองรับแรงกระแทกได้มากกว่า โดยแป้งที่มีความเสียหายอาจทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งไม่สมบูรณ์จึงสามารถเผยแพร่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลแป้งออกมาได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถจับกับน้ำได้เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาเฉพาะตัวอย่างที่เป็นแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งพบว่าแป้งที่อบที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีความสามารถในการจับน้ำน้อยลง

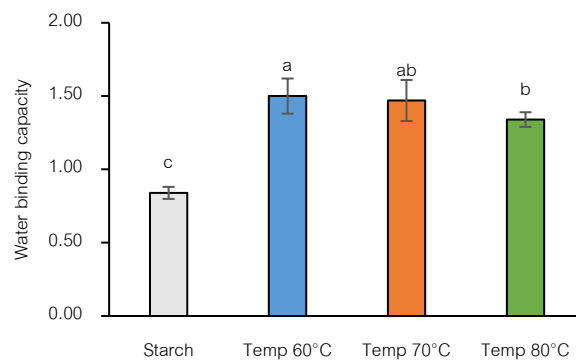


Fig. 3 Water binding capacity of wet-milled cassava starch and dry-milled cassava flour at different drying temperatures (60°C, 70°C and 80°C)

กำลังการพองตัวของสตาร์ชเทียบกับแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน แสดงใน Fig. 4A กำลังการพองตัวของแป้งขึ้นกับความสามารถในการจับน้ำของโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 80°C และ 90°C แป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ช เนื่องจากแป้งที่ผ่านการไม่แห้งอาจเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช โดยมีรายงานของ Leewatchararongjareon และ Anuntagool (2016) ว่าการไม่แห้งทำลายโครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดสตาร์ช และเผยแพร่ไฮดรอกซิลที่สามารถจับกับน้ำได้มากขึ้น ทำให้แป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีกำลังการพองตัวมากกว่า และเมื่อพิจารณาเฉพาะแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งที่อบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่ากำลังการพองตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ดังนั้นอุณหภูมิการอบแห้งไม่มีผลต่อการพองตัวของสตาร์ช ค่าการละลายแสดงดัง Fig.4B พบว่าแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีค่าการละลายสูงกว่าสตาร์ช เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีส่วนเม็ดสตาร์ชที่เสียหายมากกว่าสตาร์ช จึงทำให้แป้งมันสำปะหลังไม่แห้งสามารถละลายได้ดีกว่าสตาร์ช

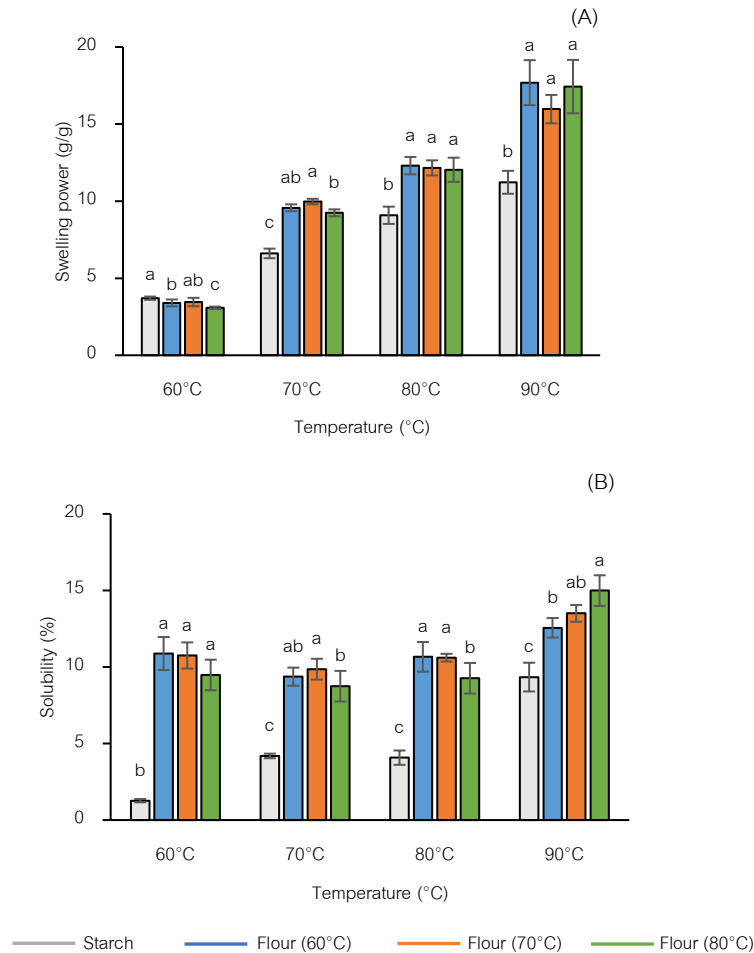


Fig. 4 Swelling power and solubility of wet-milled cassava starch and dry-milled cassava flour at different drying temperatures (60°C, 70°C and 80°C)

ความชื้นของแป้งมันสำปะหลังแสดงใน Fig. 5 พบว่าสตาร์ชที่ได้จากการไม่เปียกมีความชื้นสูงสุด เนื่องจากการไม่เปียกจะมีการใช้น้ำในการสกัดแป้ง ทำให้มีความชื้นที่เหลืออยู่ในแป้งสูงกว่าแป้งที่ผ่านการไม่แห้งที่ไม่มีการใช้น้ำร่วมกับการไม่

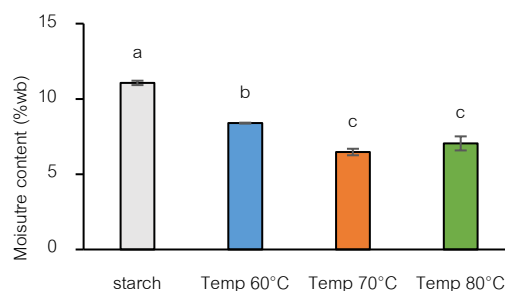


Fig. 5 Moisture content of wet-milled cassava starch and dry-milled cassava flour at different drying temperatures (60°C, 70°C and 80°C)

Table 2 แสดงสมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชมันสำปะหลังจากการไม่เปียกและแป้งมันสำปะหลังไม่แห้ง พบว่าสตาร์ชมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาตินในเซชัน (pasting temperature) ต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังไม่แห้ง และมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) แป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีความหนืดสูงกว่าสตาร์ช เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งสามารถพองตัวได้ดีกว่าสตาร์ชทำให้มีความหนืดที่สูงกว่าตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ

ต่างกันมีความหนืดสูงสุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ส่วนค่า breakdown บ่งบอกความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงและแรงเฉือน โดยพบว่ามีความมากขึ้นในตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังไม่แห้ง แสดงว่าแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีความสามารถในการคงทนต่อแรงเฉือนและความร้อนน้อยลง และค่า setback ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดรีโทรเกรดชันพบว่ามีความลดลงในตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังไม่แห้ง

Table 2 Pasting properties of wet-milled cassava starch and dry-milled cassava flour at different drying temperatures (60°C, 70°C and 80°C)

Samples	Pasting temperature (°C)	Peak time ^{ns} (min)	Pasting viscosity (cP)				
			Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback
Starch	71.4 ^c ±0.6	4.2±0.0	2803.3 ^b ±10.2	1256.3 ^a ±21.6	1547.0 ^b ±11.4	2204.7 ^a ±2.5	948.3 ^a ±19.9
Flour (60°C)	75.4 ^a ±0.8	4.1±0.08	3262.5 ^a ±160.4	1178.0 ^a ±78.4	2084.5 ^a ±86.7	1949.0 ^b ±116.2	771.0 ^b ±39.5
Flour (70°C)	74.4 ^b ±0.1	4.1±0.1	3157.0 ^a ±234.0	1050.5 ^b ±45.5	2106.5 ^a ±256.1	1655.8 ^c ±76.2	605.3 ^c ±34.2
Flour (80°C)	74.2 ^b ±0.4	4.1±0.1	3255.3 ^a ±31.3	1199.7 ^a ±41.9	2055.5 ^a ±70.8	1982.0 ^b ±41.9	782.3 ^b ±14.1

Note: *Assay was performed in triplicate. Mean±SD values in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$). cP, centipoise.

Table 3 Color values (L*, a*, b*) and whiteness index of wet-milled cassava starch and dry-milled cassava flour at different drying temperatures (60°C, 70°C and 80°C)

Samples	Color value			Whiteness index ^{ns}
	L* ^{ns}	a*	b*	
Starch	98.5 ^a ±0.1	0.2 ^a ±0.0	1.4 ^c ±0.0	97.9 ^a ±0.1
Flour (60 °C)	64.9 ^b ±2.3	-1.7 ^c ±0.1	6.2 ^a ±0.3	64.3 ^b ±2.3
Flour (70 °C)	63.9 ^b ±0.6	-1.6 ^c ±0.1	5.7 ^a ±0.6	63.4 ^b ±0.6
Flour (80 °C)	65.6 ^b ±2.1	-1.4 ^b ±0.1	4.5 ^b ±2.1	65.2 ^b ±2.1

Note: *Assay was performed in triplicate. Mean±SD values in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

ค่าสีและค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชและแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งแสดงใน Table 3 โดยค่า L* ในตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความขาว พบว่าแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีค่าดัชนีความขาวน้อยกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอย่างปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) และกรดอะมิโนภายในโปรตีน ซึ่งแป้งมันสำปะหลังไม่แห้งมีปริมาณโปรตีนมากกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชเนื่องจากการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังในขั้นตอนการสกัดแป้งโดยใช้น้ำจะทำให้องค์ประกอบทางเคมีอื่น เช่น โปรตีน ถูกชะล้างทิ้งออกไป ทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังเกือบจะไม่มีโปรตีนหลงเหลืออยู่เลย

สรุป

ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลัง พบว่าการใช้การอบแห้งสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้เพียงบางส่วน โดยช่วงแรกของการอบแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์อินไปเป็นไฮโดรเจน

ไซยาไนด์ และในช่วงหลังของการอบแห้งเป็นการระเหยไฮโดรเจนไซยาไนด์ ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณไซยาไนด์ลดลง โดยเมื่อนำมันสำปะหลังอบแห้งไปผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังโม้แห้ง พบว่าการโม้แห้งทำให้เม็ดสตาร์ชเสียหายบางส่วนและมีความเป็นผลึกลดลง ทำให้แป้งมันสำปะหลังโม้แห้งมีความสามารถในการจับน้ำ กำลังการพองตัว การละลาย และความหนืดสูงสุดสูงกว่า แต่มีค่าดัชนีความขาวต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ได้จากการไม่เปียก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทธนะวัฒน์ สตาร์ช ควอลิตี้ และโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) โดยสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

- Food and Agriculture Organization/World Health Organization (FAO/WHO). 1991. Joint FAO/WHO Food Standards Programme. Co34. Dex Alimentarius Commission XII. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy. Supplement 4.
- Cardoso, A.P., Mirione, E., Ernesto, M., Massaza, F., Cliff, J., Haque, M.R., Bradbury, J.H. 2005. Processing of cassava roots to remove cyanogens. *J. Food Compos. Anal.* 18: 451–460.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis, 17th Ed. Association of Official Analysis Chemists. Washington, DC, USA.
- Ginting, E., Widodo, Y. 2013. Cyanide reduction in cassava root products through processing and selection of cultivars in relation to food safety. *Diterbitkan di Buletin Palawija* 25: 25–36.
- Leewatcharongjareon, J., Anuntagool, J. 2016. Effects of dry-milling and wet-milling on chemical, physical and gelatinization properties of rice flour. *Rice Science* 23(5): 274–281.
- Szabo, E.A., Jansson, E., Miles, D., Hambridge, T., Stanley, G., Baines, J., Brent, P. 2010. Chapter 24 - Responding to incidents of low level chemical contamination in food. In: Martinovic, A., Oh, S., Lelieveld, H. (Eds.) *Ensuring Global Food Safety*, pp. 411–437.

การผลิตร่วมกันของไฟโคอีริทริน เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ และกรดไขมัน จาก *Porphyridium cruentum* ภายใต้ความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

Co-Production of phycoerythrin, exo-polysaccharide and fatty acids of *Porphyridium cruentum* under difference light intensity

กัญยัตนัย ททรัพย์อุดมมาก^a, สุริยัน ธัญกิจจานุกิจ^a จันทนา ไพรบูรณ์^{b,*}

Kunadanai Sup-udommak^a, Suriyan Tunkijjanukij^a, Jantana Praiboon^{b,*}

^aภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10900

^bภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10900

^aDepartment of aquaculture, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bang Khen Campus, Bangkok 10900, Thailand

^bDepartment of Fishery Biology, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bang Khen Campus, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ffsjt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

Porphyridium cruentum เป็นสาหร่ายสีแดงขนาดเล็กที่มีศักยภาพในการผลิตไฟโคอีริทริน (Phycoerythrin, PE) เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (Exopolysaccharides, EPS) กรดไขมันเออาร์เอ (Arachidonic acid, ARA) และกรดไขมันอีพีเอ (Eicosapentaenoic acid, EPA) ซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์ทางการแพทย์และมีมูลค่าทางการตลาดสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มแสงต่อประสิทธิภาพในการผลิตร่วมกันของสารสำคัญดังกล่าวจาก *P. cruentum* โดยใช้ความเข้มแสงที่ 50, 80, 100 และ 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ภายใต้สภาวะในห้องปฏิบัติการ ผลจากการศึกษาพบว่าความเข้มแสง 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ให้กำลังผลิตชีวมวล (4.57 g/L/d) ผลผลิต EPS (2.17 g/L) กำลังผลิตไขมัน (147.61 mg/L/d) และกำลังผลิตกรดไขมัน ARA (7.87 mg/L/d) สูงสุด ขณะที่การเลี้ยงที่ความเข้มแสง 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้กำลังผลิต PE สูงสุด 55.01 mg/L/d และที่ความเข้มแสง 80 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้ผลผลิตกรดไขมัน EPA สูงสุด 4.09 mg/L/d ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงมีผลต่อการผลิตสารสำคัญที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการคัดเลือกความเข้มแสงที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้เพื่อผลิตสารสำคัญตามความต้องการของการตลาดได้

คำสำคัญ: กรดไขมันเออาร์เอ, กรดไขมันอีพีเอ, ความเข้มแสง, ไฟโคอีริทริน, *Porphyridium cruentum*

ABSTRACT

Porphyridium cruentum, a red microalga that has the potential to produce phycoerythrin (PE), exopolysaccharides (EPS) and eicosapentaenoic acid (EPA) and arachidonic acid (ARA), which are important substances that has medical benefits and has a high market value. Therefore, the purpose of this study was to determine the effect of light intensity at 50, 80, 100 and 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ on the co-production efficiency of those active substances from *P. cruentum* under laboratory condition. The results show that the highest biomass productivity (4.57 g/L/d), EPS production (2.17 g/L), lipid productivity (147.61 mg/L/d) and ARA productivity (7.87 mg/L/d) obtained from the light intensity of 100 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$. Whereas, the highest PE productivity was 55.01 mg/L/d obtained from the light intensity at 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ and the highest EPA productivity was 4.09 mg/L/d at a light intensity of 80 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$. These results show that light intensity has different effects on the production of the active substance. The results of this study can be used to select the appropriate light intensity for culturing this alga to produce the active substances according to market demand.

Keywords: Arachidonic acid, Eicosapentaenoic acid, Light intensity Phycoerythrin, *Porphyridium cruentum*

คำนำ

Porphyridium cruentum เป็นสาหร่ายสีแดงขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวหรืออยู่เป็นกลุ่มโดยมีเมือกล้อมรอบ เป็นแหล่งของสารที่มีมูลค่าในอุตสาหกรรม เช่น ไฟโคอีริทริน (Phycocerythrin, PE) เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (Exopolysaccharides, EPS) กรดไขมันเออาร์เอ (Arachidonic acid, ARA) และกรดไขมันอีพีเอ (Eicosapentaenoic acid, EPA) (Guihéneuf et al., 2015; Pignolet et al., 2013) ไฟโคอีริทรินเป็นรงควัตถุสีแดงในกลุ่มไฟโคบิลิโปรตีน ที่พบในสาหร่ายสีแดง เช่น *Gracilaria* sp., *Grateloupia* sp. และ *Porphyridium* sp. โดยมีรายงานว่าสาหร่ายในกลุ่มของ *Porphyridium* สามารถผลิตสารไฟโคอีริทรินได้อยู่ในช่วง 38.8–213.38 mg/L (Kathiresan et al., 2007; Guihéneuf et al., 2015) ปัจจุบันมีการนำสารไฟโคอีริทรินมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง การแพทย์ และเภสัชกรรม (Arad and Yaron, 1992; D'Agnolo et al., 1994) โดยเฉพาะในทางการแพทย์มีการนำสารชนิดนี้มาใช้ในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกัน เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติเรืองแสงที่มีความไวสูง และไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์สิ่งมีชีวิต (Spolaore et al., 2006) ในปัจจุบันสารไฟโคอีริทรินมีมูลค่าทางการตลาดอยู่ที่ 1,466 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และคาดว่าจะมีมูลค่าสูงถึง 1,919 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี ค.ศ. 2025 (More, 2021) นอกจากนี้สาหร่าย *P. cruentum* ยังสามารถผลิตสารในกลุ่มเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ ที่สร้างและขับออกมาภายนอกเซลล์ โดยเป็นสายพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส, กลูโคส, กาแล็กโทส และมีหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์อยู่ในโครงสร้าง (Arad et al., 1985) สารเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์จากสาหร่ายชนิดนี้มีรายงานว่า เป็นสารที่มีฤทธิ์ต้านทานไวรัสเริม ไวรัสอีโบล่า และไวรัสตับอักเสบบี (Huang et al., 2001; Huheihel et al., 2002) และมีรายงานว่า *P. cruentum* สามารถผลิตสารเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ได้สูงถึง 4,630 mg/L (You and Barnett, 2004)

นอกจากสารไฟโคอีริทรินและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว สาหร่าย *P. cruentum* ยังมีความสามารถในการผลิตกรดไขมันจำเป็นได้ โดยกรดไขมันที่พบโดยส่วนใหญ่คือ กรดไขมันเออาร์เอและกรดไขมันอีพีเอ (Klyachko-Gurvich et al., 1994; Khozin et al., 1997) กรดไขมันเออาร์เอเป็นกรดไขมันจำเป็นที่มีผลต่อการพัฒนาระบบประสาทและสมอง มีส่วนช่วยในการลดระดับคอเลสเตอรอลและป้องกันโรคหลอดเลือด ขณะที่กรดไขมันอีพีเอมีรายงานว่า มีส่วนช่วยในการต้านการอักเสบ ป้องกันโรคหัวใจ และโรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น (Guil-Guerrero et al., 2000) จากการศึกษาของ Hu et al. (2018) รายงานว่าสาหร่าย *P. cruentum* สามารถผลิตเออาร์เอได้ 53.20 mg/L และผลิตอีพีเอได้ 16.40 mg/L

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Porphyridium* มีปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ มีผลต่อการเจริญและการผลิตสารสำคัญภายในเซลล์ (Yang et al., 2000) ซึ่งแสดงถึงว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง (Dubinsky and Stambler, 2009; Oh et al., 2009) โดยมีรายงานว่า หากใช้ความเข้มแสงสูงในการเลี้ยง *Porphyridium* spp. จะส่งผลให้สาหร่ายมีการเจริญและผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เพิ่มขึ้น (Mandalam and Palsson, 1998; Yang et al., 2000) ขณะที่ความเข้มแสงต่ำจะส่งผลให้สาหร่ายชนิดนี้สามารถสะสมปริมาณไขมันได้มากกว่าที่ความเข้มแสงสูง (Falkowski and Owens, 1980; Su et al., 2016) จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่าความเข้มแสงมีบทบาทต่อการเจริญและการสะสมสารสำคัญต่างๆ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จึงควรมีการศึกษาถึงความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญและสำหรับการผลิตสารสำคัญในสาหร่ายชนิดนี้

จากรายงานที่ผ่านมา พบว่ามีผู้ศึกษาผลความเข้มแสงต่อการผลิตสารสำคัญ ในสาหร่าย *P. cruentum* อยู่บ้าง อย่างไรก็ตาม การศึกษาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อการผลิตสารสำคัญเพียง 1–2 ชนิดเท่านั้น เช่น การศึกษาของ Wang et al. (2007) เกี่ยวกับความเข้มแสงต่อผลผลิตไฟโคอีริทรินกับเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ และ Sánchez-Saavedra et al. (2018) รายงานได้ศึกษาถึงผลความเข้มแสงและแหล่งไนโตรเจนต่อการผลิตไฟโคอีริทรินและไขมัน เป็นต้น แต่ยังไม่มีการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อการผลิตไฟโคอีริทรินร่วมกับเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ และกรดไขมัน ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มแสงต่อการผลิตร่วมกันของสารสำคัญดังกล่าว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมหัวเชื้อ

สำหรับ *P. cruentum* ได้รับความอนุเคราะห์จาก Faculty of Fisheries, Cukurova University ประเทศตุรกี เตรียมหัวเชื้อเริ่มต้น โดยการนำมาเพาะขยายด้วยอาหารเหลวสูตร F/2 medium (Guillard and Ryther, 1962) ที่ความเค็ม 27 ppt ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL ภายใต้ความเข้มแสงที่ 80 $\mu\text{mol photons/m}^2\text{s}$ (12 L : 12 D) และมีเติมอากาศในระหว่างการเลี้ยงทำการเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ $25 \pm 1^\circ\text{C}$

การศึกษามวลของความเข้มแสง

นำหัวเชื้อมาเพาะขยายในหลอดแก้วกันแหลม ขนาดกว้าง 3.5 cm สูง 33.8 cm ปริมาตร 200 mL โดยใช้หัวเชื้อในปริมาณ 10% ในอาหารเหลวสูตร F/2 โดยเพาะเลี้ยงที่ความเข้มแสง 50, 80, 100 และ 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ (12 L : 12 D) ตามลำดับ และให้ CO_2 1% ในอากาศ นำไปเพาะเลี้ยงในตู้เพาะเลี้ยงควบคุมอุณหภูมิ (LGS-5201, Latch, Korea) ที่อุณหภูมิ 25°C ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ โดยเก็บตัวอย่างเซลล์ทุกวัน เพื่อวัดการเจริญโดยการนับเซลล์ด้วยสไลด์นับเม็ดเลือด (Hemocytometer) ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า และเก็บเกี่ยวเซลล์ในระยะ late log phase โดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,146 g เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นแยกเซลล์สาหร่ายที่ได้ไปทำแห้ง ด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dry, รุ่น 55-150 pro, Coolsafe, Denmark) และนำส่วนของอาหารเหลวที่มีสารเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์มาทำให้มีความเข้มข้นขึ้นโดยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator, Rotavapor R-200, Buchi, Germany) ที่อุณหภูมิ 50°C จากนั้นนำมาไปกำจัดเกลือออกโดยใช้เทคนิคไดอะไลซิส (Dialysis) ผ่านถุงไดอะไลซิสที่มีขนาดตา (MWCO) 12,000 Da ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 h เปลี่ยนน้ำทุกๆ 6 h ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) จากนั้นนำตัวอย่างเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้ไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dry) นำเซลล์สาหร่ายและสารเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่แห้งแล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาปริมาณผลผลิต

การวิเคราะห์ไขมันและกรดไขมัน

นำตัวอย่างสาหร่ายแห้ง 150 mg มาสกัดไขมันตามวิธีของ Bligh and Dyer (1959) และเปลี่ยนไขมันให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ของเมทิลเอสเทอร์ตามวิธีของ Niemi et al. (2019) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้คอลัมน์ DB WAX (30 m \times 0.25 mm) โดยเปรียบเทียบกับกรดไขมันที่สกัดกับกรดไขมันมาตรฐาน (Supelco 37 FAME mix standard, C4-C24) และวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันเออาร์ไอและกรดไขมันอีพีเอ โดยใช้ C19:0 (Nonadecanoic acid, Sigma-Aldrich, USA) เป็น Internal standard โดยคำนวณปริมาณกรดไขมันได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงในโครมาโตแกรม

การวิเคราะห์ปริมาณไฟโคอีรีทริน

นำตัวอย่างสาหร่ายแห้ง 20 mg มาสกัดด้วย phosphate buffer ความเข้มข้น 0.1 M (pH 6.8) ปริมาตร 50 mL ตามวิธีการของ Li et al. (2019) และคำนวณปริมาณไฟโคอีรีทริน ตามวิธีการของ Bennett and Bogorad (1973)

การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์

นำตัวอย่างพอลิแซ็กคาไรด์ 20 mg มาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2 N ปริมาตร 0.5 mL ที่อุณหภูมิ $95-100^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 h จากนั้นนำมาวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตตามวิธีการของ Dubois et al. (1956) โดยใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นสารมาตรฐาน

การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตในเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์

นำตัวอย่างเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการย่อยในการวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตข้างต้นมาวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต ด้วยวิธี BaCl_2 -gelatin ตามวิธีการของ Dodgson and Price (1962) โดยใช้ K_2SO_4 เป็นสารมาตรฐาน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตชีวมวล ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมประมวลผล SPSS Version 27

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลของความเข้มแสงต่ออัตราการเจริญจำเพาะ ผลผลิตชีวมวล และกำลังการผลิตชีวมวล

จากการศึกษาผลของความเข้มแสงต่ออัตราการเจริญจำเพาะ ผลผลิตชีวมวล และกำลังการผลิตชีวมวลของ *P. cruentum* พบว่า ที่ความเข้มแสง $100 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้อัตราการเจริญจำเพาะ ผลผลิตชีวมวล และกำลังการผลิตชีวมวลสูงสุด คือ $0.68 \pm 0.04/\text{d}$, $6.68 \pm 0.65 \text{ g/L}$ และ $4.57 \pm 0.45 \text{ g/L/d}$ ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับความเข้มแสงอื่นๆ (Fig 1a และ 1b) จากผลการศึกษาเห็นได้ชัดว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง $100 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ทำให้สาหร่ายมีการเจริญและผลิตชีวมวลเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Ahern et al. (1983) และ Chang et al. (2017) ที่พบว่าการเพิ่มความเข้มแสงส่งผลให้ปริมาณชีวมวลสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้พบว่า ที่ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้ปริมาณชีวมวลน้อยกว่าที่ความเข้มแสง $100 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ อาจเนื่องมาจากเป็นปริมาณความเข้มแสงที่มากเกินไปทำให้เกิดการยับยั้งด้วยแสง (photoinhibition) กระตุ้นให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระ Reactive oxygen species (ROS) ที่ไปทำลายการทำงานของ Photosystem II ส่งผลให้การเจริญของเซลล์น้อยลง (Pathak et al., 2019) สอดคล้องกับรายงานของ Liqin et al. (2008) พบว่าที่ความเข้มแสง $80 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ สำหรับชนิดนี้ให้ปริมาณชีวมวล (2.35 g/L) สูงกว่าที่ความเข้มแสง $100 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ (1.81 g/L) เนื่องจากเกิดการยับยั้งด้วยแสง

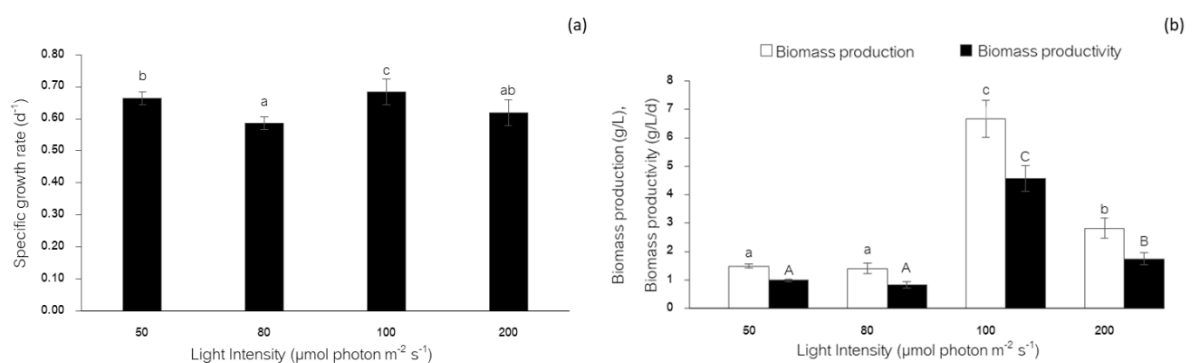


Fig. 1 Effect of light intensity on growth (a) and biomass production and biomass productivity (b) of *P. cruentum*

Note: Vertical bars represent mean \pm SD ($n = 3$). Different letters indicated significant at $p < 0.05$.

ผลของความเข้มแสงต่อการผลิตไฟโคอีริทริน

จากการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อการผลิตไฟโคอีริทรินของ *P. cruentum* พบว่าความเข้มแสงที่ $80 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ส่งผลให้เซลล์มีการสะสมไฟโคอีริทรินภายในเซลล์สูงสุด $5.70 \pm 0.36\% \text{ dw}$ (Fig. 2a) และที่ความเข้มแสงที่ $100 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ทำให้เซลล์มีการผลิตไฟโคอีริทรินภายในเซลล์น้อยที่สุด ($1.00 \pm 0.25\% \text{ dw}$) อาจเป็นผล

เนื่องมาจากที่ความเข้มแสงนี้ทำให้สาหร่ายผลิตชีวมวลได้สูงกว่าที่ความเข้มแสงอื่น เมื่อมีความหนาแน่นของเซลล์มากจึงทำให้เกิดการบดบังแสงกันเอง ส่งผลให้สาหร่ายสังเคราะห์ไฟโคอีริทรินได้ลดลง (Borowitzka, 2018; Racault et al., 2015) ในการศึกษาวิจัยพบว่าที่ความเข้มแสง 80 และ 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้ผลผลิตไฟโคอีริทรินสูงสุดเท่ากับ $80.14 \pm 5.02 \text{ mg/L}$ และ $88.84 \pm 11.01 \text{ mg/L}$ ขณะที่กำลังการผลิตไฟโคอีริทรินสูงสุดเท่ากับ $55.01 \pm 6.82 \text{ mg/L/d}$ ที่ความเข้มแสง 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ (Fig 2b) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Wang et al. (2007) พบว่าสาหร่ายชนิดนี้ให้ผลผลิตไฟโคอีริทรินสูงสุดเท่ากับ 132 mg/L ซึ่งสูงกว่าการศึกษาในครั้งนี้ แต่ผลจากการศึกษาให้ผลผลิตและกำลังผลิตไฟโคอีริทรินสูงกว่ารายงานของ Sánchez-Saavedra et al. (2018) ที่ให้ ให้ผลผลิตและกำลังผลิตไฟโคอีริทรินเท่ากับ 1 mg/L และ 0.8 mg/L/d ที่ความเข้มแสง 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ผลการศึกษาที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจากมีสภาวะการเลี้ยงที่แตกต่างกัน เช่น สูตรอาหาร และการปรับ pH ที่เหมาะสมในการเลี้ยง

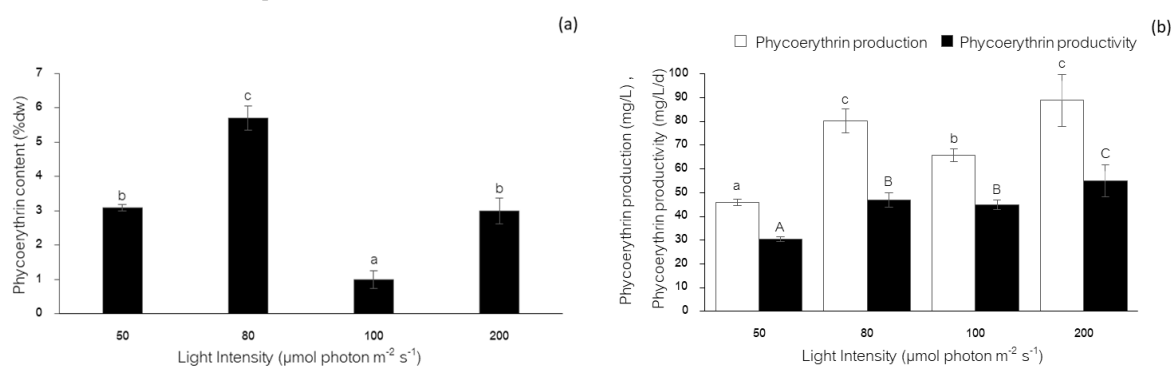


Fig. 2 Effect of light intensity on phycoerythrin content (a), phycoerythrin production and phycoerythrin productivity (b) of *P. cruentum*

Note: Vertical bars represent mean \pm SD ($n = 3$). Different letters indicated significant at $p < 0.05$.

ผลของความเข้มแสงต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์

จากการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อปริมาณของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของ *P. cruentum* พบว่าที่ความเข้มแสง 100 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้ปริมาณมากที่สุด $2.17 \pm 0.14 \text{ g/L}$ (Fig. 3a) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณชีวมวล ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Liqin et al., (2008) เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีในเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้พบว่า มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบสูงสุด $49.31 \pm 2.57\%$ ที่ความเข้มแสง 200 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ และมีปริมาณซัลเฟตสูงสุด $25.37 \pm 0.37\%$ ที่ความเข้มแสง 100 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ (Fig. 3b) ซึ่งปริมาณของซัลเฟตในเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในการศึกษานี้สูงกว่าที่เคยมีรายงานมาก่อนในสาหร่ายชนิดนี้ที่โดยทั่วไปมีปริมาณซัลเฟตอยู่ระหว่าง 7.6% ถึง 14.6% (Arad et al., 1985; Sun et al., 2009) โดยปริมาณซัลเฟตที่สูงนั้นมีรายงานว่ามีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับการความสามารถในเป็นสารออกฤทธิ์ต้านไวรัสริมและไวรัสฮีโบล่า รวมถึงยับยั้งไวรัสตับอักเสบบี (Huang et al., 2001; Huheihel et al., 2002)

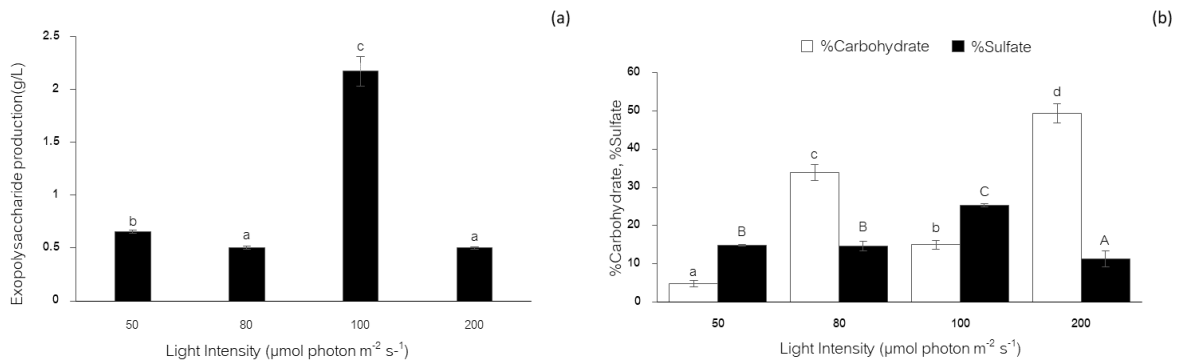


Fig 3 Effect of light intensity on exopolysaccharide production (a) and chemical composition of exopolysaccharides (b) from *P. cruentum*.

Note: Vertical bars represent mean±SD ($n = 3$). Different letters indicated significant at $p < 0.05$.

ผลของความเข้มแสงต่อไขมัน

จากการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อไขมันของ *P. cruentum* พบว่าความเข้มแสงที่ 50 และ 80 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ มีปริมาณไขมันภายในเซลล์สูงสุดเท่ากับ $6.09 \pm 0.59\%$ dw และ $5.34 \pm 0.48\%$ dw (Fig. 4a) ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าที่เคยมีรายงานว่าสาหร่ายชนิดนี้มีปริมาณไขมันภายในเซลล์อยู่ในช่วง 9–14% dw (Becker, 1994) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสภาวะการเลี้ยงที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มแสงต่ำส่งผลให้มีการสะสมไขมันได้ดีกว่าที่ความเข้มแสงสูง สอดคล้องกับการศึกษาของ Klyachko-Gurvich et al. (1994) พบว่าที่ความเข้มแสง 14 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้ปริมาณไขมันภายในเซลล์สูงสุดเท่ากับ 8.18% dw อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าผลผลิตไขมัน (215.87 ± 59.83 mg/L) และกำลังผลิตไขมัน (147.61 ± 40.92 mg/L/d) สูงสุด ที่ความเข้มแสง 100 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ (Fig. 4b) ซึ่งเป็นผลจากปริมาณชีวมวลที่สูงกว่าที่ความเข้มแสงอื่นๆ

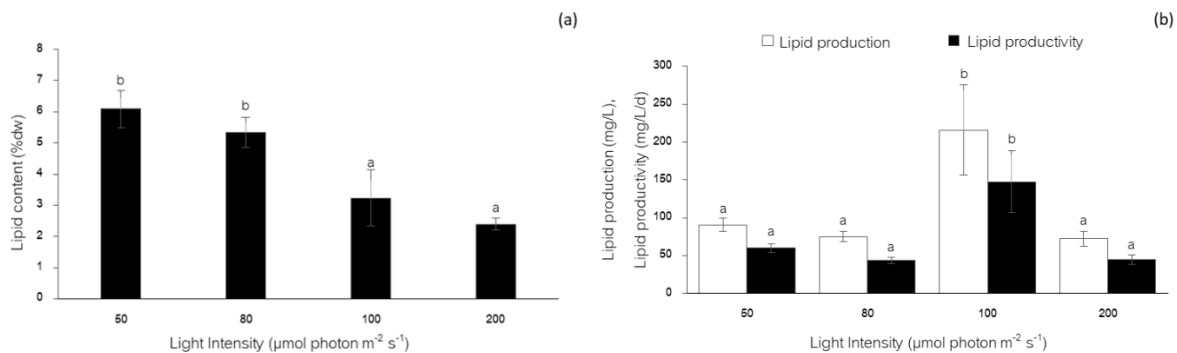


Fig 4 Effect of light intensity on lipid content (a) and lipid production and lipid productivity (b) of *P. cruentum*

Note: Vertical bars represent mean±SD ($n = 3$). Different letters indicated significant at $p < 0.05$.

ผลของความเข้มแสงต่อกรดไขมันเออาร์เอและกรดไขมันอีพีเอ

โดยทั่วไปสาหร่าย *P. cruentum* สามารถผลิตเออาร์เอและอีพีเออยู่ในช่วง 0.91–3.3% dw และ 0.08–1.02% dw ตามลำดับ (Chang et al., 2017; Jiao et al., 2017; Hu et al., 2018) จากผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มแสง 80 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ มีกรดไขมันเออาร์เอภายในเซลล์สูงสุด เท่ากับ $0.54 \pm 0.03\%$ dw ขณะที่ความเข้มแสง 100 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ (Fig. 5a) ให้ผลผลิตและกำลังการผลิตกรดไขมันเออาร์เอมากที่สุดเท่ากับ 11.51 ± 1.48 mg/L และ 7.87 ± 1.01 mg/L/d (Fig 5b) ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณชีวมวลที่มากที่สุด ในส่วนของการผลิตกรดไขมันอีพีเอในสาหร่ายชนิดนี้พบว่ามีปริมาณอีพีเอภายในเซลล์ ($0.50 \pm 0.04\%$ dw) ผลผลิตอีพีเอ (6.99 ± 0.52 mg/L) และกำลังผลิตอีพีเอ (4.09 ± 0.30 mg/L/d) สูงสุด ที่ความเข้มแสง 80 $\mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ (Fig. 6) ซึ่งต่างจากการศึกษาของ Hu et al. (2018) ที่เพาะเลี้ยง *P. cruentum*

ภายใต้ความเข้มแสง $40 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้ผลผลิตเออาร์เอและผลผลิตอีพีเอ 53.2 mg/L และ 16.4 mg/L ซึ่งมากกว่าการศึกษาในครั้งนี้ เนื่องจากมีสภาวะในการเลี้ยงที่ต่างกัน เช่น การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเลี้ยง และเป็นการเลี้ยงด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 2 L ที่สามารถควบคุมสภาวะในการเลี้ยงได้ดีกว่า เป็นต้น

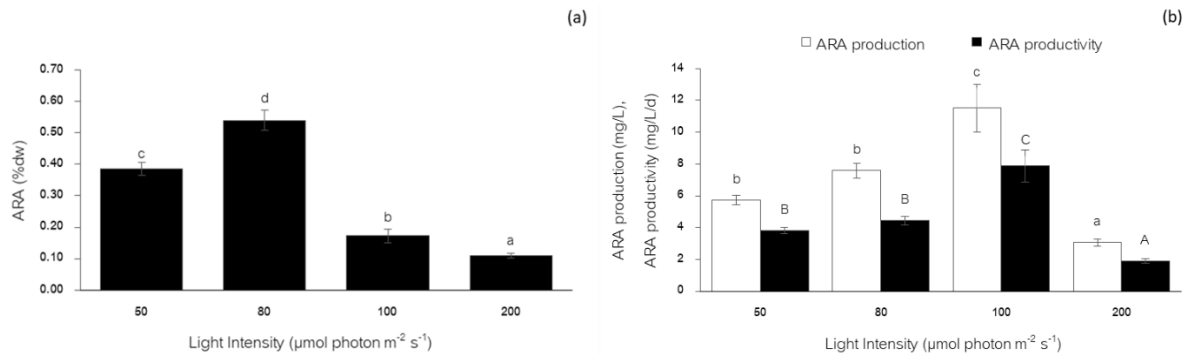


Fig 5 Effect of light intensity on ARA content (a) and ARA production and ARA production (b) of *P. cruentum*

Note: Vertical bars represent mean \pm SD ($n = 3$). Different letters indicated significant at $p < 0.05$.

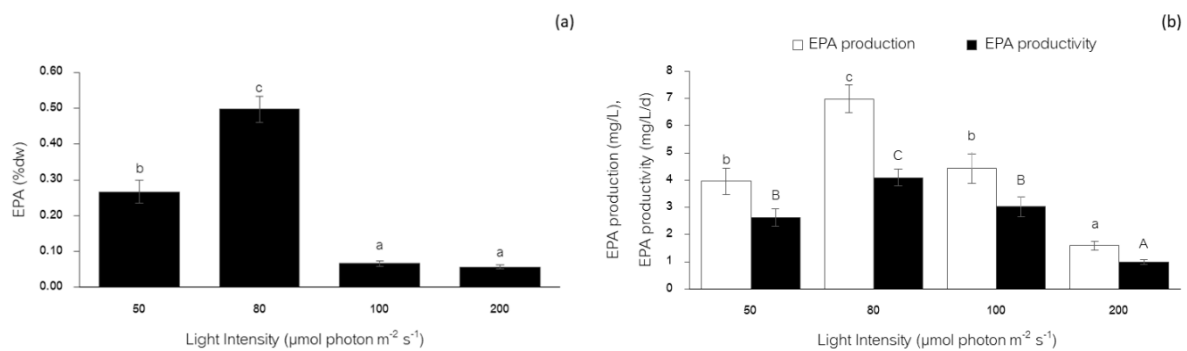


Fig 6 Effect of light intensity on EPA content (a) and EPA production and EPA production (b) of *P. cruentum*.

Note: Vertical bars represent mean \pm SD ($n = 3$). Different letters indicated significant at $p < 0.05$.

สรุปผลและเสนอแนะ

จากผลการศึกษพบว่าพบบว่าที่ความเข้มแสง $100 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้กำลังผลิตชีวมวล (4.57 g/L/d) ผลผลิต EPS (2.17 g/L) กำลังผลิตไขมัน (147.61 mg/L/d) และกำลังผลิตกรดไขมัน ARA (7.87 mg/L/d) สูงสุด ขณะที่การเลี้ยงที่ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้กำลังผลิต PE สูงสุด 55.01 mg/L/d และที่ความเข้มแสง $80 \mu\text{mol photon/m}^2\text{s}$ ให้ผลผลิตกรดไขมัน EPA สูงสุด 4.09 mg/L/d ผลการทดลองในครั้งนี้ถือเป็นการเริ่มต้นแบบของการเลี้ยงเพื่อผลิตสารสำคัญ นอกจากนี้เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพให้กับสาหร่ายชนิดนี้ ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น อุณหภูมิ ชนิดของแสง และการปรับเปลี่ยนปริมาณสารอาหารในการเลี้ยง รวมถึงการขยายการเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- Ahern, T.J., Katoh, S., Sada, E. 1983. Arachidonic acid production by the red alga *Porphyridium cruentum*. Biotechnol. Bioeng. 25(4): 1057–1070.
- Arad, S., Yaron, A. 1992. Natural pigments from red microalgae for use in foods and cosmetics. Trends Food Sci Technol. 3: 92–97.
- Arad, S.M., Adda, M., Cohen, E. 1985. The potential of production of sulfated polysaccharides from *Porphyridium*. Plant Soil 89(1–3): 117–127.
- Becker, E.W. 1994. Microalgae: Biotechnology and microbiology (Vol. 10). Cambridge University Press.

- Bennett, A., Bogorad, L. 1973. Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga. *J. Cell Biol.* 58(2): 419–435.
- Bligh, E.G., Dyer, W.J. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.* 37(8): 911–917.
- Borowitzka, M. 2018. Commercial-Scale Production of Microalgae for Bioproducts. *Blue biotechnology: production and use of marine molecules.* 1: 33–65.
- Chang, J., Le, K., Song, X., Jiao, K., Zeng, X., Ling, X., Lin, L. 2017. Scale-up cultivation enhanced arachidonic acid accumulation by red microalgae *Porphyridium purpureum*. *Bioprocess Biosyst Eng.* 40(12): 1763–1773.
- D’Agnolo, E., Rizzo, R., Paoletti, S., Murano, E. 1994. R-phycoerythrin from the red alga *Gracilaria longa*. *Phytochemistry* 35(3): 693–696.
- Dodgson, K., Price, R. 1962. A note on the determination of the ester sulphate content of sulphated polysaccharides. *Biochem. J.* 84(1): 106–110.
- Dubinsky, Z., Stambler, N. 2009. Photoacclimation processes in phytoplankton: mechanisms, consequences, and applications. *Aquat. Microb. Ecol.* 56(2–3): 163–176.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.t., Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28(3): 350–356.
- Falkowski, P., Owens, T. 1980. Light—shade adaptation. Two strategies. *Mar. Phytoplankton* 66: 592–595.
- Guihéneuf, F., Schmid, M., Stengel, D.B. 2015. Lipids and fatty acids in algae: Extraction, fractionation into lipid classes, and analysis by gas chromatography coupled with flame ionization detector (GC-FID). In *Natural Products from Marine Algae*. Springer. pp. 173–190.
- Guihéneuf, F., Stengel, D.B. 2015. Towards the biorefinery concept: Interaction of light, temperature and nitrogen for optimizing the co-production of high-value compounds in *Porphyridium purpureum*. *Algal Res.* 10: 152–163.
- Guil-Guerrero, J., Belarbi, E.-H., Reboloso-Fuentes, M. 2000. Eicosapentaenoic and arachidonic acids purification from the red microalga *Porphyridium cruentum*. *Bioseparation* 9(5): 299–306.
- Guillard, R.R., Ryther, J.H. 1962. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. *Can. J. Microbiol.* 8(2): 229–239.
- Hu, H., Wang, H.-F., Ma, L.-L., Shen, X.-F., Zeng, R.J. 2018. Effects of nitrogen and phosphorous stress on the formation of high value LC-PUFAs in *Porphyridium cruentum*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 102(13): 5763–5773.
- Huang, J., Chen, B., You, W. 2001. Studies on separation of extracellular polysaccharide from *Porphyridium cruentum* and its anti-HBV activity in vitro. *Chin. J. Mar. Drugs.* (05).
- Huheihe, M., Ishanu, V., Tal, J., Arad, S. M. 2002. Activity of *Porphyridium* sp. polysaccharide against herpes simplex viruses in vitro and in vivo. *J. Biochem. Biophys.* 50(2–3), 189–200.
- Jiao, K., Chang, J., Zeng, X., Ng, I.-S., Xiao, Z., Sun, Y., Tang, X., Lin, L. 2017. 5-Aminolevulinic acid promotes arachidonic acid biosynthesis in the red microalga *Porphyridium purpureum*. *Biotechnol. Biofuels.* 10(1): 1–10.
- Kathiresan, S., Sarada, R., Bhattacharya, S., Ravishankar, G.A. 2007. Culture media optimization for growth and phycoerythrin production from *Porphyridium purpureum*. *Biotechnol. Bioeng.* 96(3): 456–463.
- Khozin, I., Adlerstein, D., Bigongo, C., Heimer, Y.M., Cohen, Z. 1997. Elucidation of the biosynthesis of eicosapentaenoic acid in the microalga *Porphyridium cruentum* (II. Studies with radiolabeled precursors). *Physiol. Plant* 114(1): 223–230.

- Klyachko-Gurvich, G., Doucha, J., Kopezkii, J., Ryabykh, I., Semenenko, V. 1994. Comparative investigation of fatty acid composition in lipids of various strains of *Porphyridium cruentum* and *Porphyridium aeruginum*. Russ. J. Plant Physiol. 41(2): 248–255.
- Li, T., Xu, J., Wu, H., Jiang, P., Chen, Z., Xiang, W. 2019. Growth and biochemical composition of *Porphyridium purpureum* SCS-02 under different nitrogen concentrations. Mar. Drugs 17(2): 124.
- Liqin, S., Wang, C., Lei, S. 2008. Effects of light regime on extracellular polysaccharide production by *Porphyridium cruentum* cultured in flat plate photobioreactors. In: the 2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering.
- Mandalam, R. K., Palsson, B. 1998. Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures. Biotechnol. Bioeng. 59(5): 605–611.
- More, A. 2021. Phycoerythrin market 2021: Size, growth rate analysis, share and revenue analysis with CAGR status, market drivers and trends, evolving technologies global industry forecast to 2025. <https://www.wboc.com/story/44242072/phycoerythrin-market-2021-size-growth-rate-analysis-share-and-revenue-analysis-with-cagr-status-market-drivers-and-trends-evolving-technologies>, 30 March 2022.
- Niemi, C., Lage, S., Gentili, F. G. 2019. Comparisons of analysis of fatty acid methyl ester (FAME) of microalgae by chromatographic techniques. Algal Res. 39: 101449.
- Oh, S. H., Han, J.G., Kim, Y., Ha, J.H., Kim, S.S., Jeong, M.H., Yoon, W.B. 2009. Lipid production in *Porphyridium cruentum* grown under different culture conditions. J. Biosci. Bioeng. 108(5): 429–434.
- Pathak, J., Ahmed, H., Singh, P.R., Singh, S.P., Häder, D.-P., Sinha, R.P. 2019. Mechanisms of photoprotection in cyanobacteria. In: Mishra, A.K., Tiwari, D.N. Rai, A.N. (Eds.). Cyanobacteria. Elsevier, pp. 145–171.
- Pignolet, O., Jubeau, S., Vaca-Garcia, C., Michaud, P. 2013. Highly valuable microalgae: Biochemical and topological aspects 40(8): 781–796.
- Racault, M.-F., Raitsos, D.E., Berumen, M.L., Brewin, R.J., Platt, T., Sathyendranath, S., Hoteit, I. 2015. Phytoplankton phenology indices in coral reef ecosystems: Application to ocean-color observations in the Red Sea. Remote Sens. Environ. 160: 222–234.
- Sánchez-Saavedra, M.d.P., Castro-Ochoa, F.Y., Nava-Ruiz, V.M., Ruiz-Güereca, D.A., Villagómez-Aranda, A.L., Siqueiros-Vargas, F., Molina-Cárdenas, C.A. 2018. Effects of nitrogen source and irradiance on *Porphyridium cruentum*. J. Appl. Phycol. 30(2): 783–792.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., Isambert, A. 2006. Commercial applications of microalgae. J. Biosci. Bioeng. 101(2): 87–96.
- Su, G., Jiao, K., Chang, J., Li, Z., Guo, X., Sun, Y., Lin, L. 2016. Enhancing total fatty acids and arachidonic acid production by the red microalgae *Porphyridium purpureum*. Bioresour. Bioprocess 3(1): 1–9.
- Sun, L., Wang, C., Shi, Q., & Ma, C. 2009. Preparation of different molecular weight polysaccharides from *Porphyridium cruentum* and their antioxidant activities. Int. J. Biol. Macromol. 45(1): 42–47.
- Wang, J., Chen, B., Rao, X., Huang, J., Li, M. 2007. Optimization of culturing conditions of *Porphyridium cruentum* using uniform design. World J. Microbiol. Biotechnol. 23(10): 1345–1350.
- Yang, C., Hua, Q., Shimizu, K. 2000. Energetics and carbon metabolism during growth of microalgal cells under photoautotrophic, mixotrophic and cyclic light-autotrophic/dark-heterotrophic conditions. Biochem. Eng. J. 6(2): 87–102.
- You, T., Barnett, S.M. 2004. Effect of light quality on production of extracellular polysaccharides and growth rate of *Porphyridium cruentum*. Biochem. Eng. J. 19(3): 251–258.

การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึงด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

Validation of a HPLC Method for the determination of alkaloids in *Crinum asiaticum* extract via HPLC

อภิสร่า บุนหารัตน์^๑, ธนภูมิ มณีบุญ^๒, ประภัสสร รุกถาวร^๑, เกสรี กลิ่นสุคนธ์^๑, ลลิตา คชารัตน์^๑,
สุริสา สากยโรจน์^๑, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ^{๑,*}

Apisara Bungarat^๑, Thanapoom Maneeboon^๒, Prapassorn Rugthaworn^๑, Ketsaree Khinsukhon^๑,
Lalita Kacharat^๑, Surisa Sakayaroj^๑, Udomlak Sukatta^{๑,*}

^๑สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^๒สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^๑Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University,
Bangkok 10900, Thailand

^๒Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Kasetsart University, Bangkok 10900,
Thailand

*Corresponding author. E-mail address: aapuls@ku.ac.th

บทคัดย่อ

พลับพลึงมีสารประกอบอัลคาลอยด์ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่น่าสนใจ คือ Lycorine และ Crinamine ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมในการหาปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึง ด้วยเครื่อง HPLC ชนิดวัฏภาคย้อนกลับ คอลัมน์คาร์บอน 18 โดยมีวัฏภาคเคลื่อนที่ คือ อะซิโตนไนโตรลต่อสารละลายบัฟเฟอร์ 1% (w/v) แอมโมเนียมอะซิเตท ที่ pH 6.6 และตรวจสอบ linearity, accuracy, precision, LOD และ LOQ. จากผลการศึกษาระยะยาวมาตรฐาน (1) ไลโครีน (2) 6-ไฮดรอกซีครินามีน (3) ครินามีน ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้ค่า r^2 มากกว่า 0.9950 ผลของความแม่นยำได้ค่า %RSD ที่วิเคราะห์ในวันเดียวกันและระหว่างวัน มีค่าไม่เกิน 2% ค่า LOD เท่ากับ (1) 3.646 (2) 0.512 (3) 0.851 และค่า LOQ เท่ากับ (1) 11.048 (2) 1.550 (3) 2.582 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ ความถูกต้องของวิธีได้ค่า %recovery อยู่ในช่วง 90–110%

คำสำคัญ: เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง, พลับพลึง, สารประกอบอัลคาลอยด์

ABSTRACT

This research aims to optimize HPLC method to determine alkaloid compounds in *C. asiaticum* using reversed phase C18 column and a gradient system with acetonitrile and 1% (w/v) ammonium acetate buffer (pH 6.6). The HPLC method was validated for linearity, accuracy, precision, LOD and LOQ. The results indicated good linearity ($R^2 > 0.9950$). The intraday and interday analysis showed satisfied precision with the coefficient of variation (CV) less than 2%. The LOD and LOQ were 3.646, 11.048 $\mu\text{g/ml}$ for lycorine, 0.512, 1.550 $\mu\text{g/ml}$ for 6-hydroxycrinamine and 0.851, 2.582 $\mu\text{g/ml}$ for crinamine, respectively. The percentage of recovery of all analytical markers were in range of 90–110.

Keywords: *Crinum asiaticum* L., Alkaloids, Extract, HPLC, Method validation

คำนำ

Crinum asiaticum L. หรือที่ในประเทศไทยคุ้นเคยกันในชื่อ “พลับพลึง” เป็นพรรณไม้ล้มลุกที่ขึ้นเป็นกอ มีหัวอยู่ใต้ดิน พืชชนิดนี้ถูกจัดอยู่ในวงศ์ Amaryllidaceae ซึ่งเป็นวงศ์ที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่น่าสนใจหลากหลายและหนึ่งในนั้นคือสารประกอบอัลคาลอยด์ (Alkaloids) ที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพที่หลากหลาย ได้แก่ สามารถช่วยยับยั้งแบคทีเรียต้านไวรัส ต้านเซลล์มะเร็งและต้านโรคมะเร็ง เป็นต้น (Khumkhong et al., 2019) สารประกอบอัลคาลอยด์ที่พบในพลับพลึง ได้แก่ ไลโครีน (Lycorine) ครินามีน (Crinamine) และ 6-ไฮดรอกซีครินามีน (6-Hydroxycrinamine) เป็นต้น

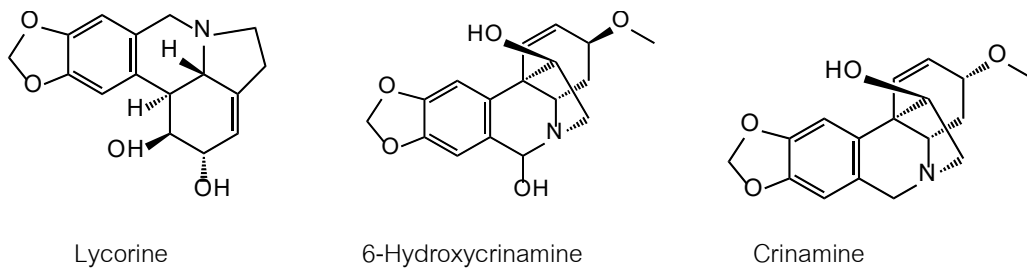


Fig. 1 Structure of *Crinum asiaticum* Alkaloids

ไลโครีนเป็นอัลคาลอยด์กลุ่ม pyrrolophenanthridine alkaloid ในพลับพลึง สารชนิดนี้เป็นสารประกอบอัลคาลอยด์ที่พบมากที่สุด คุณสมบัติของสารชนิดนี้มีการออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง สามารถต้านไวรัสได้ดี ได้แก่ ไวรัสที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคโปลิโอ (Poliovirus) โรคหัด (Measles) และโรคเริม (HSV-1) เป็นต้น ซึ่งประสิทธิภาพในการต้านไวรัสของไลโครีนนั้นสามารถต้านได้ดีเทียบได้กับยาต้านไวรัส (Ivanov et al., 2009) อีกหนึ่งสารประกอบอัลคาลอยด์ที่น่าสนใจที่พบในพลับพลึง คือ ครินามีน สารชนิดนี้มีคุณสมบัติมีความสามารถในการช่วยลดการอักเสบโดยการไปยับยั้งการผลิตไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide) ในเซลล์แมคโครฟาจที่ถูกกระตุ้นด้วยไลโปพอลิแซ็กคาไรด์ (Lipopolysaccharide) นอกจากนี้ครินามีนยังมีความเป็นพิษต่อเซลล์ที่มีเจริญเติบโตไปเป็นเนื้องอก ซึ่งได้แก่ มะเร็งในช่องปาก มะเร็งลำไส้ มะเร็งเต้านมและเนื้องอกในสมองชนิด glioblastoma (Khumkhong et al., 2019)

สำหรับในงานวิจัยเรื่องนี้ มีจุดประสงค์ในการหาวิธีการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึงและทำการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะ (HPLC) โดยการตรวจสอบนั้นประกอบไปด้วย ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linearity) ความแม่นยำ (Precision) ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (Limit of detection, LOD) ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ทดสอบซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ (Limit of quantitation, LOQ) และความถูกต้อง (Accuracy)

อุปกรณ์และวิธีการ

ตัวอย่างพืช

ตัวอย่างพลับพลึงสด (*Crinum asiaticum* L.) จากอุทยานธรรมชาติวิทยาสิริรุกชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม เก็บช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ถูกนำมาทำความสะอาดด้วยสารละลายคลอรีน ที่ระดับความเข้มข้น 50 ppm เพื่อกำจัดจุลินทรีย์ปนเปื้อน และนำมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากตัวอย่างแห้งแล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดพืช ได้เป็นผงพลับพลึงแห้ง

การสกัดสารประกอบอัลคาลอยด์จากพลับพลึง

นำผงพลับพลึง ได้แก่ ส่วนใบ ส่วนหัว และส่วนราก มาสกัดด้วยวิธี maceration (ดัดแปลงตามวิธีของ Arai *et al.* (2015)) โดยเตรียมแต่ละส่วนมาสกัด 300 กรัม ในเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 3000 มิลลิตร (อัตราส่วน ของแข็ง: ของเหลว = 1:10) แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นแยกสารละลายที่สกัดได้มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 แล้วนำกากที่เหลือมาสกัดต่อด้วยเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ จนครบทั้งหมด 3 ครั้ง นำสารสกัดทั้ง 3 ครั้งมารวมกัน และระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) ได้เป็นสารสกัดพลับพลึง (Ethanol crude extract)

อุปกรณ์และสารเคมี

สารมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ไลโครีน (Lycorine) ครินามีน (Crinamine) และ 6-ไฮดรอกซีครินามีน (6-Hydroxycrinamine) จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหงและสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ ได้แก่ แอมโมเนียมอะซิเตท (ammonium acetate) จากบริษัท KemAus™ (Australia) อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile) คุณภาพระดับ HPLC จากบริษัท Macron Fine Chemicals™ (USA) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) และเมทานอล (Methanol) คุณภาพระดับ HPLC จากบริษัท RCI LabScan® (Thailand)

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงรุ่น Alliance® HPLC - e2695 Separations Module by Waters (USA) และ 2998 PDA Detector จากบริษัท Water (USA) คอลัมน์ขนาด 4.6×150 mm ชนิด VertexPlus column Eurospher 100-10 C18 จากบริษัท KNAUER (Germany)

การวิเคราะห์สารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึงด้วย HPLC

การวิเคราะห์สารสกัดพลับพลึงด้วยเครื่อง HPLC ชนิดวัฏภาคย้อนกลับ (Reverse phase column) คอลัมน์ขนาด 4.6×150 mm ที่บรรจุด้วยคาร์บอน 18 ขนาดอนุภาค 10.0 µm โดยมีวัฏภาคเคลื่อนที่ คือ อะซิโตนไนไตรล์ (สารละลาย A) ต่อสารละลายบัฟเฟอร์ 1% (w/v) แอมโมเนียมอะซิเตท ที่ pH 6.6 ปรับด้วยกรดอะซิติก (สารละลาย B) ในสัดส่วนและอัตราการไหลตาม Table 1 ปริมาตรการฉีด 10 µL และทำการตรวจวัดโดยใช้ความยาวคลื่น 285 nm (ดัดแปลงจากวิธีของ Ivanov *et al.*, 2009)

Table 1 Gradient elution for the HPLC analysis of *Crinum asiaticum* alkaloids

Time (min)	Flow rate (ml/min)	%A	%B
0.00	0.40	10.0	90.0
11.00	0.30	31.0	69.0
15.00	0.50	70.0	30.0
16.00	0.50	80.0	20.0
18.00	0.50	80.0	20.0
20.00	0.50	90.0	10.0
22.00	0.40	90.0	10.0
24.00	0.40	31.0	69.0
26.00	0.40	10.0	90.0
34.00	0.40	10.0	90.0

การเตรียมสารตัวอย่าง

เตรียมสารละลายมาตรฐานไลโครีน (Lycorine) ครินามีน (Crinamine) และ 6-ไฮดรอกซีครินามีน (6-Hydroxycrinamine) ละลายสารมาตรฐานแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 1000 µg/ml โดยมีเมทานอลเป็นตัวทำละลาย ละลายจนหมด จากนั้นเตรียมสารละลายมาตรฐาน 6 ความเข้มข้น สำหรับสารละลายมาตรฐานไลโครีน คือ 10, 20, 50, 100, 150 และ 200 µg/ml และสำหรับครินามีนและ 6-ไฮดรอกซีครินามีน คือ 1, 2, 5, 10, 15 และ 20 µg/ml เตรียมใน volumetric flask เพื่อใช้สำหรับกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

การเตรียมสารละลายตัวอย่าง ละลายสารสกัดพลับพลึงส่วนต่างๆ ที่ความเข้มข้น 10 mg/ml โดยมีเมทานอลเป็นตัวทำละลาย เขย่าสารละลายให้ละลายเป็นเนื้อเดียวด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vertex mixer) แล้วนำมาปรับปริมาตรให้ครบ 10 ml ด้วยเมทานอล ใน volumetric flask จากนั้นปิเปตต์สารละลายตัวอย่างมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นสุดท้าย คือ 2 mg/ml กรองผ่าน filter membrane ขนาด 0.45 µm แล้วนำมาฉีดเข้าเครื่อง HPLC

การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์

การตรวจสอบความถูกต้องวิธีสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึง ได้มีการตรวจสอบทั้งหมด 5 ด้าน คือ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linearity) ความแม่นยำ (Precision) ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (Limit of detection, LOD) ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ทดสอบซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ (Limit of quantitation, LOQ) และความถูกต้อง (Accuracy)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากโครมาโตแกรมของสารมาตรฐานและสารสกัดพลับพลึง (Figure 2) พบว่า retention time ของไลโครีน 6-ไฮดรอกซีครินามีน และครินามีน เท่ากับ 14.5, 17.2 และ 18.2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์มีความเหมาะสม เนื่องจากสารมาตรฐานทั้งสามชนิดมีการแยกออกจากกันอย่างชัดเจน อีกทั้งเมื่อนำตัวอย่างสารสกัดมาวิเคราะห์ พบว่าพีคของสารทั้งสามปรากฏและแยกออกจากสารกลุ่มอื่นได้ดีและชัดเจนเช่นกัน แต่ในส่วนพีค

ของ 6-ไฮดรอกซีครินามีนและครินามีนในสารสกัดจากใบ พบว่า เกิดการซ้อนทับกับพีค Unknown ที่มีค่า retention time 17.6 นาที ดังนั้นการอินทิเกรตพีคของสารทั้งสองชนิดนี้ จึงใช้การกำหนดเส้น Baseline ในโปรแกรมแบบ Drop perpendicular จากนั้นแบ่งพีคทั้งสองออกจากกัน ซึ่งวิธีนี้จะเหมาะกับพีคที่มีความสมมาตร แม้ว่าพื้นที่พีคบางส่วนจะหายไป เป็นผลให้ปริมาณสารทั้งสอง ที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่าความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบถูกต้อง (Accuracy) ของวิธีวิเคราะห์ พบว่า ผลการวิเคราะห์ของสารทั้งสองชนิดนี้ ยังคงให้ค่า Recovery อยู่ในเกณฑ์การยอมรับ (98.89–109.98%)

การทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์ ตรวจสอบด้วยการวัดพื้นที่ใต้กราฟ (Area under the curve, AUC) ของสารมาตรฐานทั้งหมด 6 ความเข้มข้น สำหรับสารละลายมาตรฐานไลโครีน คือ 10, 20, 50, 100, 150 และ 200 µg/ml และสำหรับครินามีนและ 6-ไฮดรอกซีครินามีน คือ 1, 2, 5, 10, 15 และ 20 µg/ml เมื่อทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) ของค่าเฉลี่ยและสมการเส้นตรง ดังตาราง Table 2 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) แล้วค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 0.9950 ซึ่งเป็นค่าที่ผ่านเกณฑ์การยอมรับ

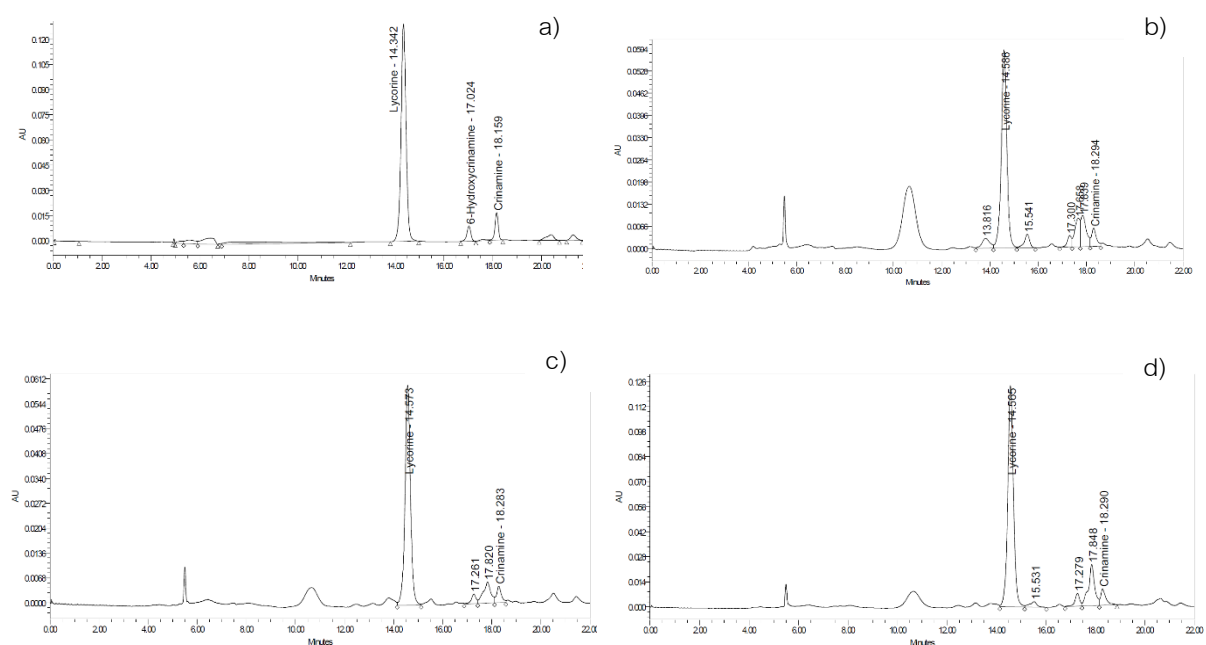


Fig. 2 HPLC chromatograms of a) Standard of *C. asiaticum* alkaloids, b) Crude extract (Leaf part), c) Crude extract (Bulb part) and d) Crude extract (Root part)

Table 2 HPLC data of calibration curve and limit of quantification and detection of *C. asiaticum* alkaloids

Alkaloid	Retention time (min)	Equation	r^2	Range (µg/ml)	LOQ (µg/ml)	LOD (µg/ml)
Lycorine	14.5	$y = 17260x + 19028$	0.9988	10-200	11.048	3.646
6-Hydroxycrinamine	17.2	$y = 11758.8x - 1826.4$	0.9977	1-20	1.550	0.512
Crinamine	18.2	$y = 14216x + 8893.6$	0.9987	1-20	2.582	0.852

การทดสอบปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (LOD) คือ ความเข้มข้นมาตรฐานต่ำสุดที่สามารถตรวจหรือวัดได้ แต่ไม่สามารถแสดงปริมาณได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ และปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ทดสอบซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ (LOQ) คือ ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของสารมาตรฐาน ซึ่งสามารถหาปริมาณได้โดยที่มีความถูกต้องและความแม่นยำเป็นที่ยอมรับแต่สามารถแสดงค่าความไม่แน่นอนการทดสอบได้ ดังนั้นขีดจำกัดในการวัดเชิงปริมาณจึงเป็นคุณสมบัติของวิธีที่แสดงความสามารถในการรายงานผลที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่มีความเชื่อมั่นระดับหนึ่ง (กรกนก และคณะ, 2561) ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้การคำนวณหาค่า LOD และ LOQ แบบการตรวจหาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณและความชันของกราฟมาตรฐาน (Based on the standard deviation of the response on the slope) ดัง Equation 1 และ Equation 2:

$$\text{LOD} = 3.3\sigma/S \quad (1)$$

$$\text{LOQ} = 10\sigma/S \quad (2)$$

เมื่อ σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ

S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

เมื่อนำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำสุดมาวิเคราะห์หาค่า SD โดยฉีดตัวอย่างทั้งหมด 7 ครั้งด้วยเครื่อง HPLC แล้วนำมาคำนวณดัง Equation 1 และ Equation 2 ได้ค่า LOD และ LOQ ดังตาราง Table 2

การทดสอบความแม่นยำ ตรวจสอบโดยการพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ซึ่งได้ทำการทดสอบสารละลายมาตรฐานของไลโครีนที่ความเข้มข้นในช่วง 50–100 $\mu\text{g/ml}$ และของ 6-ไฮดรอกซีครีนา มีนและครีนา มีนที่ความเข้มข้นในช่วง 10–20 $\mu\text{g/ml}$ ที่การทดสอบวันเดียวกัน (Intraday) และระหว่างวัน (Interday) โดยฉีดความเข้มข้นละ 5 ครั้งด้วยเครื่อง HPLC ได้ผลการทดสอบ %RSD ดังตาราง Table 3 และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบ โดยกำหนดให้ค่าสำหรับการผ่านเกณฑ์ของค่า %RSD ต้องน้อยกว่า 2% พบว่า สารละลายมาตรฐานทั้งหมดผ่านเกณฑ์ และในส่วนของ การทดสอบความถูกต้อง ได้มีการทดสอบโดยใช้วิธีแบบ standard addition จากผลการทดสอบได้ %recovery ของสารละลายมาตรฐานไลโครีน 6-ไฮดรอกซีครีนา มีนและครีนา มีน ดังตาราง Table 3 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบพบว่า %recovery ของสารละลายมาตรฐานทั้งสามชนิดอยู่ระหว่างช่วงที่ผ่านเกณฑ์ยอมรับ ซึ่งควรมีค่าอยู่ระหว่าง 90–110%

Table 3 Analytical results of intra-day and inter-day precision and accuracy

Alkaloid	Concentration (µg/ml)	Intra-day (n = 5)		Inter-day (n = 5)	
		RSD (%)	Accuracy (%)	RSD (%)	Accuracy (%)
Lycorine	50	0.364	98.323	0.372	90.071
	75	0.878	109.231	0.326	104.806
	100	0.426	105.839	1.425	108.173
6-Hydroxycrinamine	10	1.616	109.382	0.926	101.054
	15	1.354	102.140	0.172	100.160
	20	0.559	98.890	1.744	107.648
Crinamine	10	1.171	106.763	0.496	107.833
	15	0.397	100.868	1.165	104.880
	20	0.504	109.987	0.856	106.189

Table 4 HPLC data of determination of *Crinum* alkaloids in *C. asiaticum* crude extract

Sample	Replicate	Concentration (µg/ml)		
		Lycorine	6-Hydroxycrinamine	Crinamine
<i>C. asiaticum</i> Leaf part	1	26.358	2.266	1.872
	2	26.474	2.394	1.936
	3	26.502	2.347	1.882
Mean±SD		26.445±0.076	2.335±0.065	1.896±0.035
<i>C. asiaticum</i> Bulb part	1	25.939	1.782	1.587
	2	26.086	1.677	1.536
	3	26.167	1.832	1.634
Mean±SD		26.064±0.116	1.764±0.079	1.586±0.049
<i>C. asiaticum</i> Root part	1	56.792	4.311	4.190
	2	56.911	4.336	4.193
	3	56.759	4.316	4.197
Mean±SD		56.821±0.080	4.321±0.013	4.193±0.003

จากการนำตัวอย่างสารสกัดพลับพลึงส่วนใบ ลำต้นและรากมาวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ศึกษาพบว่า ตัวอย่างสารสกัดแต่ละส่วนได้ปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ดังตาราง Table 4 โดยส่วนที่สกัดจากรากมีปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์มากที่สุด

สรุป

จากศึกษาวิธีการวิเคราะห์การตรวจหาปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึง พบว่า สมภาวะที่ศึกษาที่ภูมิภาคเคลื่อนที่ คือ อะซิโทไนไตรล์ ต่อสารละลายบัฟเฟอร์ 1% (w/v) แอมโมเนียมอะซิเตท ที่ pH 6.6 ปรับด้วยกรดอะตริก ในสัดส่วนและอัตราการใช้ตามดั่งที่ศึกษา มีความเหมาะสมแก่การใช้วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบอัลคาลอยด์ในสารสกัดพลับพลึง เนื่องจากโครมาโตแกรมของสารแต่ละชนิดให้ retention time ที่ห่างกันอย่างชัดเจน และเมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ ผลการตรวจสอบให้ค่าที่ผ่านเกณฑ์ยอมรับทุกด้าน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยปีงบประมาณ 2563 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ สุขสำราญ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในการสนับสนุนสารมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

กรรณก สุวรรณราช, กุลภัสสร กิตติพินิจนนท์, วริษฐา ศิลลาอ่อน, อุษณา พัวเพิ่มพลูศิริ, สาโรช อ่อนละออบ, ชลลัดดา พิษญา จิตติพงษ์. 2561. การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณแวนโคมัยซินในยาเตรียมเฉพาะคราวรูปแบบยาน้ำแขวนตะกอนด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง. วารสารเภสัชศาสตร์อีสาน 14(4): 132–141.

Arai, M. A., Akamine, R., Sadhu, R. K., Ahmed, F., Ishibashi, M. 2015. Hedgehog/GLI-mediated transcriptional activity inhibitors from *Crinum asiaticum*. J. Natural medicines 69(4): 538–542.

Ivanov, I., Berkov, S., Pavlov, A. 2009. Improved HPLC method for the determination of amaryllidaceae alkaloids. J. Biotechnology & Biotechnological Equipment 23: 809–813.

Khumkhong, P., Piboonprai, K., Chaichompoo, W., Pimtong, W., Khongkow, M., Namdee, K., Jantimaporn, A., Japrungr, D., Asawapirom, U., Suksamrarn, A., Iempridee, T. 2019. Crinamine induces apoptosis and inhibits proliferation, migration, and angiogenesis in cervical cancer SiHa cells. J. Biomolecules 9(9): 494.

การสกัดเปลือกมังคุดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับตัวทำละลาย: ปริมาณแอลฟา-แมงโกสตินและฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย

Ultrasound-assisted solvent extraction of mangosteen pericarp: Quantity of α -Mangostin and antibacterial activity

วิมลรัตน์ อินสุวรรณ^a, นันทิยา หาญสุภลักษณ์^b, ทิพย์รัตน์ ซาหอมชื่น^{a,*}

Wimonrut Insuan^a, Nanthiya Hansupalak^b, Thippayarat Chahomchuen^{a,*}

^aภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^aDepartment of Veterinary Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bDepartment of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: cvttyr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เพื่อสกัดสารกลุ่มสารแซนโทนจากเปลือกมังคุดโดยใช้ตัวทำละลายร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดได้แก่ ชนิดของตัวทำละลาย อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อผงเปลือกมังคุดและระยะเวลาในการสกัด โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือการใช้ 95% เอทานอลเป็นตัวทำละลายในการสกัด เป็นเวลา 20 นาที ที่อัตราส่วนของผงเปลือกมังคุดต่อเอทานอลเท่ากับ 1:20 (อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ซึ่งสภาวะนี้ให้ร้อยละผลผลิตของการสกัดเท่ากับ 8.1 ของน้ำหนักแห้ง มีปริมาณแอลฟา-แมงโกสตินเท่ากับ 95.9 มิลลิกรัมต่อกรัมสารสกัด เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรียของสารสกัดหยาบพบว่าสารสกัดมีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งและฆ่าเชื้อ *B. subtilis* และ *S. intermedius* การศึกษานี้จึงแสดงประสิทธิภาพของการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกในการสกัดสารกลุ่มสารแซนโทนจากเปลือกมังคุด

คำสำคัญ: คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับตัวทำละลาย, เปลือกมังคุด, ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย, แอลฟา-แมงโกสติน

Abstract

In this present study, xanthenes were extracted from mangosteen pericarp by using ultrasound-assisted solvent extraction (UAE). The optimal extraction condition was investigated. In the extraction, three parameters: solvent types, solid to solvent ratio and extraction time were used to determine the optimal extraction condition of xanthenes as α -mangostin from the sample. It was found that the extraction of sample with 95% ethanol for 20 minutes with the ratio of sample powder to ethanol was 1:20 (w/v) gave the crude extract yield (8.1% w/w on dry sample powder) and the α -mangostin content (95.9 mg/g crude extract). Crude extract revealed maximum antibacterial potential against *B. subtilis* and *S. intermedius*. Therefore, the results revealed that UAE improved the extraction efficiency of the xanthone compounds from the mangosteen pericarp.

Keywords: α -mangostin, Antibacterial activity, Mangosteen pericarp, Ultrasound-assisted solvent extraction

คำนำ

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) เป็นพืชวงศ์ Clusiaceae ได้ชื่อว่าเป็น “ราชินีผลไม้เขตร้อน” เป็นพืชสมุนไพรที่มีสรรพคุณในการรักษาโรค (Yodhnu, Sirikatitham and Chatchai, 2009) เปลือกมังคุดประกอบไปด้วยสารเมแทบอลิไทท์ทุติยภูมิที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด เช่น ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และแซนโทน (xanthones) เป็นต้น องค์ประกอบที่สำคัญเป็นสารแซนโทน คือ แอลฟา-แมงโกสติน (alpha-Mangostin) (Aizat et al., 2019) มีรายงานว่าสารสกัดมังคุดมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Wipawan, Bussaba, and Wancheng, 2019) และฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียหลายชนิด (Nusavadee and Somjai, 2010; Wanee, Supachai and Luchai, 2017) พบปริมาณรวมของแมงโกสติน (total-mangostin) และแอลฟา-แมงโกสตินแตกต่างกันในแต่ละส่วนของพืชที่นำมาสกัดและแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ปลูก (Aizat et al., 2019; Nitima et al., 2018) วิธีการสกัดที่นิยมใช้ในการสกัดเปลือกมังคุด เช่น วิธีการหมัก (Maceration) การสกัดร่อนแบบต่อเนื่อง (Soxhlet Extraction) เป็นต้น แต่มีข้อเสียคือระยะเวลาในการสกัดนาน ใช้ปริมาณตัวทำละลายปริมาณมาก การสกัดโดยการใช้อัลตราซาวด์ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasound-Assisted Solvent Extraction; UAE) เป็นวิธีการสกัดที่มีการพัฒนาเพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด คุณค่าของสารสกัด ลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการสกัด (Cheok et al., 2013) โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัด เช่น วิธีการสกัด ชนิดของตัวทำละลาย ระยะเวลา เป็นต้น (Jujun et al., 2009; Nguyen, Hoang and Nguyen, 2019; Wipawan et al., 2019) มีรายงานวิธีวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณแมงโกสตินหลายวิธี เช่น ใช้เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) และเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) เป็นต้น (Jujun et al., 2009; Pothitirat and Gritsanapan, 2008)

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อพัฒนาวิธีการสกัดที่ให้ผลผลิตและคุณภาพของสารสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงด้วยตัวทำละลายร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดคือ ชนิดของตัวทำละลาย สัดส่วนของเปลือกแห้งต่อตัวทำละลาย ระยะเวลาที่เหมาะสมในการสกัด โดยต้องการศึกษาสารองค์ประกอบหลักเพื่อหาปริมาณสารแอลฟา-แมงโกสตินด้วยเทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโทกราฟีและฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียของสารสกัดจากเปลือกมังคุดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การนำเปลือกมังคุดมาใช้เป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเป็นการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างเปลือกมังคุด

มังคุดสำหรับการทดลองนี้ซื้อจากตลาดบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) ในเดือนสิงหาคม ปี 2561 นำผลมังคุดมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ แยกเนื้อและเมล็ดออก หั่นเปลือกให้มีขนาดเล็ก อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดเป็นผงด้วยเครื่องบด เก็บในภาชนะปิดสนิทใส่ไว้ในเดสิคเคเตอร์เพื่อกันแสงและความชื้น

การสกัดเปลือกมังคุดด้วย UAE และวิธีเปรียบเทียบ

การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดตัวอย่างเปลือกมังคุดด้วยวิธี UAE โดยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลาย อัตราส่วนระหว่างผงเปลือกมังคุดกับตัวทำละลายอินทรีย์ และระยะเวลาการสกัด จำนวนการทดลอง 3 ซ้ำ ซ้ำตัวอย่างผงแห้งใส่ขวดแก้วสีชาที่มีฝาปิดสนิท แล้วเติมตัวทำละลายอินทรีย์ที่

ศึกษา 5 ชนิด ได้แก่ เฮกเซน อะซิโตน เอทิลแอลกอฮอล์ เอทานอลและเมทานอล ในอัตราส่วนของผงเปลือกมังคุดต่อตัวทำละลาย 1:20 (น้ำหนัก/ปริมาตร) นำไปสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner VGT-1990T, 42 kHz, 240W, China) เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นกรองสารสกัดด้วยกระดาษกรองและระเหยตัวทำละลาย จะได้เป็นสารสกัดหยาบ ซึ่งน้ำหนักของสารสกัดหยาบแล้วคำนวณร้อยละของผลผลิตจาก ร้อยละของผลผลิตโดยน้ำหนัก $\left(\% \frac{w}{w}\right) = \frac{\text{น้ำหนักสารสกัดหยาบเปลือกมังคุด (กรัม)}}{\text{น้ำหนักเปลือกมังคุดแห้ง (กรัม)}} \times 100$ สำหรับการศึกษาความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอลที่เหมาะสมในการสกัดจะเตรียมตัวอย่าง และมีขั้นตอนการสกัดและการวิเคราะห์เช่นเดิมแต่เปลี่ยนอัตราส่วนของผงเปลือกมังคุดต่อตัวทำละลาย 1:10 1:20 และ 1:30 (น้ำหนัก/ปริมาตร) นำไปสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นกรองและระเหยตัวทำละลาย สำหรับการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสกัดตัวอย่างโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกจะสกัดด้วยเอทานอลตามอัตราส่วนของผงเปลือกมังคุดต่อตัวทำละลาย (น้ำหนัก/ปริมาตร) ที่ได้จากการศึกษาแล้วนำไปสกัดเป็นเวลา 10 20 และ 60 นาที จากนั้นกรองและระเหยตัวทำละลาย

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสกัดด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับวิธีการสกัดโดยการแช่ในตัวทำละลาย (Maceration) ซึ่งตัวอย่างแห้งใส่ขวดแก้วสีชาที่มีฝาปิดสนิท แล้วเติมเอทานอล ในอัตราส่วนที่ 1:20 เป็นเวลา 3 วัน กรองสารสกัด ระเหยตัวทำละลาย และวิธีการสกัดโดยการเขย่า (Shaking method) ซึ่งตัวอย่างแห้งใส่ขวดแก้วสีชาที่มีฝาปิดสนิท แล้วเติมแล้วเติมเอทานอล ในอัตราส่วนที่ 1:20 (น้ำหนัก/ปริมาตร) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Eyla, Japan) อัตรา 200 rpm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กรองสารสกัด ระเหยตัวทำละลาย สารสกัดทั้งหมดจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเพื่อนำไปตรวจสอบหาปริมาณสารแอลฟาแมงโกสทินด้วย HPLC ต่อไป

ศึกษาความสามารถในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของสารสกัดจากเปลือกมังคุด

แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ 5 ชนิด เป็นแบคทีเรียแกรมบวก 3 ชนิดคือ *Bacillus subtilis* TISTR 1248 *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 และ *Staphylococcus intermedius* แบคทีเรียแกรมลบ 2 ชนิดคือ *Escherichia coli* ATCC 25922 และ *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 เตรียมเชื้อในการทดสอบโดยนำแบคทีเรียทั้ง 5 ชนิดมาขีดลงบนอาหารวุ้น Luria-Bertani Agar (LB agar) บ่มที่ 37°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำโคโลนีเดี่ยวไปเลี้ยงในอาหารเหลว Luria-Bertani broth (LB broth) บ่มที่ 37°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมงเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

การทดสอบสมบัติการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Disk diffusion method นำเชื้อแบคทีเรียทดสอบที่เลี้ยงไว้ข้างต้น มาทำการเจือจางในอาหารเหลว Muller Hilton broth (MHB) ให้ได้ความขุ่นเท่ากับค่ามาตรฐาน McFarland No. 5 จากนั้นใช้ก้านสำลีปราศจากเชื้อจุ่มเชื้อแล้วนำไป spread บน Muller Hilton agar (MHA) ให้ทั่วเพลท โดยทำการถูแนวทะแยง 3 แนว ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 5 นาทีเพื่อให้เพลทแห้ง นำสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่สกัดได้ด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองที่ปราศจากเชื้อ (paper disc) เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร วางบนเพลทที่เตรียมไว้ จากนั้นนำเพลทไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใสบริเวณรอบ paper disc เพื่อรายงานผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ใช้ยา Genfloxacin ความเข้มข้น 5 µg/disc เป็นชุดควบคุมบวก และชุดควบคุมลบใช้ Dimethyl sulfoxide (DMSO) ปริมาตร 10 µL/disc

การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Minimum Inhibitory Concentration: MIC และ Minimum Bactericidal Concentration: MBC) วิธีการเจือจางในอาหารเหลว (Broth dilution method) ในไมโครเพลทขนาด 96 หลุม ได้ประยุกต์จากการทดสอบของ Dussault และคณะ (Dussault, Vu, and Lacroix, 2014) นำเชื้อแบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงไว้มาปั่นล้างด้วย 0.85% NaCl ที่อุณหภูมิ 4°C ด้วยความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

จำนวน 3 รอบ จากนั้นปรับความขุ่นของเซลล์ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร เท่ากับ 0.01 โดยใช้ Muller Hilton broth (MHB) ในการเจือจาง ทดสอบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด 250 $\mu\text{g}/\text{mL}$ และเจือจางด้วยวิธี two-fold dilution ชุดทดลองประกอบด้วย สารละลายเชื้อแบคทีเรีย 190 ไมโครลิตร สารสกัดจากเปลือกมังคุด 10 ไมโครลิตร จากนั้นทำการเจือจางแบบ two-fold dilution ด้วยสารละลายเชื้อแบคทีเรีย 100 ไมโครลิตร และชุดควบคุมลบ ประกอบด้วยสารละลายเชื้อแบคทีเรีย 100 ไมโครลิตร จากนั้นนำเพลทไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงที่ 595 นาโนเมตรด้วยเครื่องอ่านไมโครเพลท (Microplate reader, BioRad) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้ววิเคราะห์หาค่า MIC จากผลการอ่านค่าดูดกลืนคลีนแสง โดยแถวที่มีความเข้มข้นของสารสกัดน้อยที่สุดที่ไม่มีการเจริญของแบคทีเรียคือค่า MIC ทำการยืนยันการเจริญของเชื้อแบคทีเรียในแต่ละหลุมโดยปิเปตสารบ่งชี้การเจริญของเชื้อแบคทีเรีย (Resazurin) ลงในหลุมทดสอบเพื่อยืนยันค่า MIC โดยหากมีการเจริญของแบคทีเรีย สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู หากไม่มีการเจริญของแบคทีเรียสารจะไม่เปลี่ยนสี ทำการแปลผลและบันทึกผลการทดลองค่า MIC จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาค่า MBC โดยนำสารละลายปริมาตร 5 ไมโครลิตร จากหลุมที่มีความเข้มข้นที่เป็น MIC และหลุมที่มีความเข้มข้นมากกว่าอีก 2 หลุม มาหยดลงบน MHA จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่เชื้อแบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้คือค่า MBC

วิเคราะห์หาปริมาณแอลฟา-แมงโกสตินในสารสกัดด้วย HPLC

การหาปริมาณของแอลฟา-แมงโกสติน ด้วย HPLC (2487 UV/Vis Detector & 717 Plus Autosampler, Waters, Massachusetts, USA) สภาวะสำหรับการวิเคราะห์ จะใช้วัฏภาคคงที่เป็นคอลัมน์ชนิด C18 (4.6 mm \times 15 cm, Agela Technologies, China) และใช้การชะแบบ isocratic elution โดยวัฏภาคเคลื่อนที่เป็นสารละลายผสมระหว่างอะซิโตนในไตรล : 1% กรดฟอสฟอริกในอัตราส่วน 95:5 อัตราการไหล 1.0 มล./นาที ปริมาตรฉีด 20 ไมโครลิตร การตรวจสอบความใช้ได้ (Method validation) ได้แก่ ค่าความเป็นเส้นตรง (linearity) ค่าความแม่นยำ (precision) ของเครื่องมือวิเคราะห์ (repeatability) การหาขีดจำกัดการตรวจวัดในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (limit of detection and quantification; LOD และ LOQ) การหาปริมาณแอลฟา-แมงโกสตินในตัวอย่างสารสกัดหยาบ ซึ่งนำหน้าสารสกัดหยาบแล้วนำมาเตรียมเป็นสารละลายด้วยเมทานอลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซิลิควิดโครมาโทกราฟีด้วยวิธีที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้ โดยการหาปริมาณจะคำนวณพื้นที่ใต้พีคเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานแอลฟา-แมงโกสติน (α -Mangostin, TCI, Tokyo, Japan) ในตัวทำละลายเมทานอล

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลจากการทดลอง 3 ซ้ำนำมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล แล้วนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสกัดเปลือกมังคุดด้วยวิธี UAE

การสกัดเปลือกมังคุดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิคมีประสิทธิภาพการสกัดแสดงผลดังตารางที่ 1 เปรียบเทียบร้อยละผลผลิตของสารสกัดด้วยเอทิลอะซิเตต>เมทานอล>เอทานอล>อะซิโตน>เฮกเซน โดยสารสกัดเฮกเซนมีปริมาณร้อยละผลผลิตน้อยที่สุดและมีความแตกต่างมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญแอลฟา-แมงโกสตินในสารสกัดหยาบด้วย HPLC พบว่าปริมาณ แอลฟา-แมงโกสตินสูงที่สุดเมื่อสกัดด้วยเมทานอล (44.3 mg/g extract) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ แอลฟา-แมงโกสตินกับสารสกัดเอทานอลและสารสกัดเอทิลอะซิเตตไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) มีรายงานว่าการใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันในการสกัดส่งผลถึงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดเปลือกมังคุด ดังรายงานของ Ghasemzadeh และคณะ พบว่าการสกัดแอลฟา-แมงโกสตินด้วยเอทิลอะซิเตตมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเอทานอลและน้ำ (Ghasemzadeh et al., 2018) และรายงานของ Cheok และคณะ พบว่าการสกัดโดยใช้เมทานอลให้ผลผลิตที่สูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอล (Cheok et al., 2013) เนื่องจากเอทานอลเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดสารจากพืชสมุนไพรและสามารถแยกออกจากสารสกัดได้ง่าย มีความเป็นพิษต่ำกว่าตัวทำละลายชนิดอื่นๆ สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในสารสกัดทำให้เก็บสารสกัดได้นานขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวทำละลายเอทานอลในการศึกษาอื่นๆ ต่อไป

Table 1 Comparison of %yield and α -mangostin content results obtained using UAE by different organic solvent

Extraction solvent	Extraction yield (%)	α -mangostin content (mg/g extract)
Hexane	3.9±0.16 ^c	6.5±0.89 ^c
Acetone	5.5±0.32 ^b	28.6±2.71 ^b
Ethyl acetate	7.6±0.19 ^a	40.1±1.48 ^a
Ethanol	5.6±0.32 ^b	40.2±2.25 ^a
Methanol	7.2±0.83 ^a	44.3±5.77 ^a

Note: ^{a-c} Different letters indicate significant ($p < 0.05$) differences between organic solvent on the same column

Note: Data are reported to mean ($n = 3$) ±SD

ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างผงสมุนไพรต่อปริมาณเอทานอลที่สัดส่วน 1:20 > 1:15 > 1:10 (Fig. 1A) พบว่าปริมาณร้อยละของผลผลิตที่สัดส่วน 1:10 และ 1:20 ให้ร้อยละผลผลิตที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สัดส่วน 1:20 ให้ร้อยละของผลผลิตสูงที่สุดเท่ากับ 8.13 ดังนั้นจึงเลือกสัดส่วน 1:20 เป็นสัดส่วนสำหรับใช้ในการสกัด ปัจจัยของระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (Fig. 1B) พบว่าร้อยละผลผลิตที่สกัดได้จากทั้ง 3 ช่วงเวลาที่ใช้ศึกษาไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกเวลา 20 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการสกัดเนื่องจากระยะเวลาในการที่นานขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนในตัวอย่างสูงขึ้นซึ่งอาจทำให้สารสำคัญเกิดความเสียหายได้

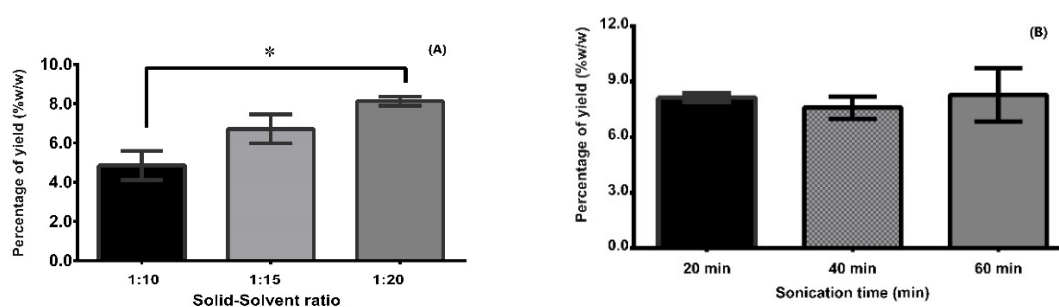


Fig. 1 Effect of organic solvent (A), solid-liquid ratio (B) on extraction yield (%) using UAE

Note: (*) indicate significant ($p < 0.05$) differences within each group of results and data are reported to mean ($n = 3$) ±SD.

การศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัด

จากการทดสอบความสามารถเบื้องต้นของสารสกัดหยาบเปลือกมังคุดที่สกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ 5 ชนิด ได้แก่ *B. subtilis* *S. aureus* *S. intermedius* *E. coli* และ *P. aeruginosa* ด้วยวิธี Disc diffusion method เปรียบเทียบขนาดของโซนใสของสารสกัดกับยา Genfloxacin เป็นชุดควบคุมบวกและ Dimethyl sulfoxide (DMSO) เป็นชุดควบคุมลบ พบว่าสารสกัดหยาบเปลือกมังคุดที่สกัดด้วยตัวทำละลายทั้ง 5 ชนิด สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เรียทดสอบได้ทุกสายพันธุ์โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับยามาตรฐานและ DMSO ($p < 0.05$) ดัง Fig. 2

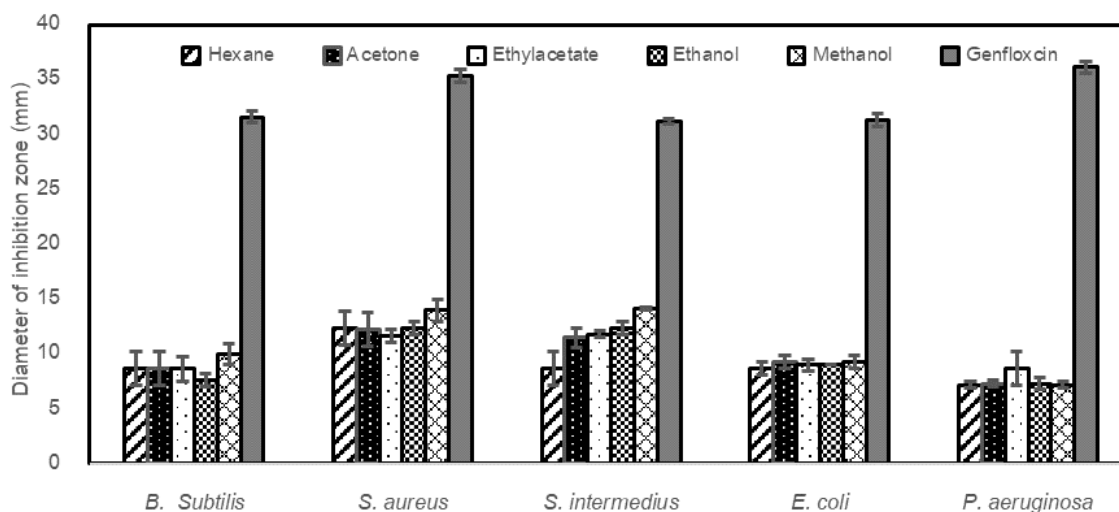


Fig. 2 Antibacterial activities of mangosteen extract obtained from UAE compared to genfloxacin (positive control)

Note: Data are reported to mean ($n = 3$) \pm SD.

ผลการทดสอบค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Minimum Inhibitory Concentration: MIC และ Minimum Bactericidal Concentration: MBC) ต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด พบว่าสารสกัดจากตัวทำละลายทั้ง 5 ชนิด มีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งและฆ่าเชื้อ *B. subtilis* และ *S. intermedius* โดยมีค่า MIC และ MBC อยู่ระหว่าง 1.95–3.91 μ g/mL แต่สารสกัดจากตัวทำละลายทั้ง 5 ชนิดไม่สามารถยับยั้งและฆ่าเชื้อ *S. aureus*, *E. coli* และ *P. aeruginosa* ได้ สอดคล้องกับผลการทดลองของสุคนธ์และคณะ ที่รายงานว่าสารสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถยับยั้งเชื้อ *B. subtilis* ได้ดีที่สุดโดยมีค่า MIC น้อยกว่า 197.5 mg/mL และสารสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (Sukon et al., 2012)

การตรวจสอบหาปริมาณแอลฟา-แมงโกสทินด้วย HPLC

การทดสอบเชิงคุณภาพโดยเปรียบเทียบผลของ retention time ของสารมาตรฐานเท่ากับเวลาของสารสกัด มี retention time 4.127 นาที (Fig. 3) พบว่าสารสกัดหยาบทั้งหมดมีแอลฟา-แมงโกสทินเป็นองค์ประกอบหลัก ผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการทดสอบสารแอลฟา-แมงโกสทินด้วย HPLC พบว่ามี Linearity อยู่ในช่วง 0.25–150.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีความสัมพันธ์เชิงเส้นมีค่า $R^2 = 0.9991$ การทดสอบ Accuracy ของวิธีการของการสกัดเปลือกมังคุดโดยฉีดสารสกัดตัวอย่างที่ทราบความเข้มข้น และ spike สารมาตรฐานแอลฟา-แมงโกสทินความเข้มข้น 25 μ g/ml มี

ค่าเปอร์เซ็นต์ของสารที่วิเคราะห์กลับคืนได้เท่ากับร้อยละ 108.5 การศึกษา % RSD ของ retention time และ peak area ของสารมาตรฐานแอลฟา-แมงโกสตินแสดงค่าความแม่นยำ (precision) ของเครื่องมือวิเคราะห์โดยฉีดสารมาตรฐาน ความเข้มข้น 25 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร มีค่าเท่ากับ 1.08%, 0.127% สำหรับ Inter-day และ 2.61, 2.89 สำหรับ between day ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดคำนวณจากกราฟมาตรฐานโดย limit of detection (LOD) อัตราส่วนของ signal ที่เป็น 3 เท่าของสัญญาณ noise และ limit of quantification (LOQ) อัตราส่วนของ signal ที่เป็น 10 เท่าของสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 1.27 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร และ 3.83 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ

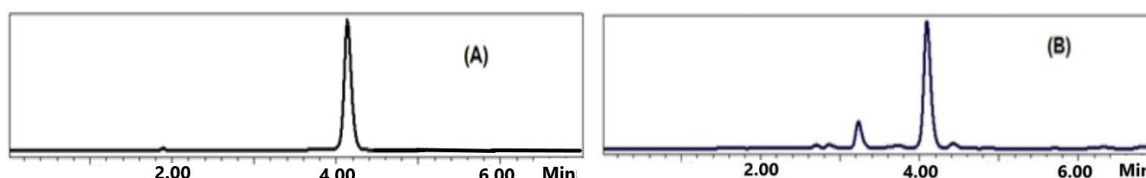


Fig. 3 HPLC elution profiles of α -mangostin standard (A) and sample (B)

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสกัดด้วย UAE ร่วมกับเอทานอล (20 นาที) กับการสกัดโดยการแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 3 วัน (Maceration) และการสกัดโดยการเขย่าในเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Shaking) โดยร้อยละผลผลิต การสกัดด้วยวิธีการแช่ในตัวทำละลาย > UAE > การเขย่า ร้อยละผลผลิตสูงที่สุดจากการสกัดโดยการแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 3 วันเท่ากับ 13.7 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับวิธี UAE และการเขย่า ($p < 0.05$) ปริมาณแอลฟา-แมงโกสตินในสารสกัดทั้ง 3 วิธีแสดงเป็นปริมาณสารแอลฟา-แมงโกสตินในน้ำหนักรสสกัดแห้งดัง Table 2 มีปริมาณระหว่าง 82.18–99.8 mg/g extract พบว่าวิธี UAE และการแช่มีปริมาณแอลฟา-แมงโกสตินไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังนั้นการสกัดด้วยวิธี UAE มีประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ได้เทียบเท่ากับวิธีการแช่ (3 วัน) และดีกว่าวิธีการสกัดโดยการเขย่า (3 ชั่วโมง) ดังที่กล่าวไว้ในงานวิจัยของนนทน์ภู่ และคณะว่าการสกัดโดยใช้ UAE ให้ประสิทธิภาพในการสกัดที่ดีเพราะเมื่อผ่านคลื่นเหนือเสียงไปที่ตัวทำละลายจะเกิดฟองและแตกออกและปลดปล่อยพลังงานทำให้ผนังเซลล์เป็นรูโหว่จึงช่วยเพิ่มให้สารในพืชออกมาอยู่ในตัวทำละลายได้มากขึ้น (Soisangwan et al., 2014) โดยการสกัดด้วยวิธี UAE สามารถสกัดได้อย่างรวดเร็ว ควบคุมปัจจัยการสกัดได้ อัตราการสกัดเร็วขึ้นและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพไม่เสียหาย

Table 2 Comparison of analytical results obtained using UAE and comparison methods.

Extraction method	Extraction yield (%)	α -mangostin content (mg/g extract)
UAE	8.1±0.24 ^a	95.9±9.40 ^a
Maceration	13.7±0.69 ^b	99.8±5.39 ^a
Shaking	7.3±0.43 ^c	82.1±5.69 ^b

Note: ^{a,b} Different letters indicate significant ($p < 0.05$) differences between UAE and maceration on the same column. Data are reported to mean ($n = 3$) ±SD.

สรุป

การใช้คลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการสกัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถสกัดสารกลุ่มสารแซนโทนจากเปลือกมังคุด โดยให้ผลผลิตที่สูง อัตราการสกัดเร็ว สามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดเพื่อให้สามารถสกัดได้อย่างรวดเร็ว

และผลผลิตของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพไม่เสียหาย วิธี UAE ให้ผลการสกัดสารออกฤทธิ์ได้เทียบเท่ากับวิธีการแช่และดีกว่าวิธีการเขย่า สารสกัดสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและมีประสิทธิภาพในการยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรียแบคทีเรียทดสอบ โดยสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-แมงโกสทินด้วย HPLC แสดงค่าความจำเพาะ ความเป็นเส้นตรง ความเที่ยงและความแม่นยำที่แสดงถึง HPLC เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-แมงโกสทินในสารสกัดเปลือกมังคุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aizat, W.M., Jamil, I.N., Ahmad-Hashim, F.H., Noor, N.M. 2019. Recent updates on metabolite composition and medicinal benefits of mangosteen plant. *PeerJ. Life Environ.* 7: 1–25. doi.org/10.7717/peerj.6324
- Cheok, C.Y., Chin, N.L., Yusof, Y.A., Talib, R.A., Law, C.L. 2013. Optimization of total monomeric anthocyanin (TMA) and total phenolic content (TPC) extractions from mangosteen (*Garcinia mangostana* Linn.) hull using ultrasonic treatments. *Ind. Crops. Prod.* 50: 1–7. doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.024
- Dussault, D., Vu, K.D., Lacroix, M. 2014. In vitro evaluation of antimicrobial activities of various commercial essential oils, oleoresin and pure compounds against food pathogens and application in ham. *Meat Sci.* 96: 514–520.
- Ghasemzadeh, A., Jaafar, H.Z.E., Baghdadi, A., Tayebi-Meigooni, A. 2018. Alpha-mangostin-rich extracts from mangosteen pericarp: Optimization of green extraction protocol and evaluation of biological activity. *Molecules.* 23: 1–16. doi.org/10.3390/molecules23081852
- Jujun, P., Pootakham, K., Pongpaibul, Y., Tharavichitkul, P., Ampasavate, C. 2009. HPLC Determination of mangostin and its application to storage stability study. *CMU J. Nat. Sci.* 8: 43–53.
- Nguyen, T.H., Hoang, D.H., Nguyen, T.M.T. 2019. Study of ultrasound and enzyme assisted extraction of tannins from mangosteen peel in Vietnam. *Food Sci. Appl. Biotechnol.* 2: 1–10. doi.org/10.30721/fsab2019.v2.i2.72
- Nitima, T.-a., Chenporn, N., Waranya, C., Kanokwan, J. 2018. Determination of α -mangostin in *Garcinia mangostana* Linn. pericarp extract and its in vitro antioxidant capacity. *Isan J. Pharm. Sci.* 14: 83–93.
- Nusavadee, P., Somjai, K. 2010. Comparison of antimicrobial activity of Mangosteen crude, Turmeric and Gotu Kola extract. *Naresuan University J.* 18: 1–9.
- Pothitirat, W., Gritsanapan, W. 2008. Quantitative analysis of total mangostins in *Garcinia mangostana* fruit rind. *J. Health Res.* 22: 161–166.

- Soisangwan, N., Rodklongtan, A., Chitprasert, P. 2014. Optimization of ultrasonic assisted extraction of phenolic compounds from mangosteen (*Garcinia mangostana Linn.*) hulls using response surface methodology. In: The Proceedings of the 52nd Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry. Bangkok. Thailand. February 4–7, 2014. pp. 467–474.
- Sukon, T., Thianchai, N., Petlada, D. 2012. Antibacterial activity of some fruit-peel extracts. *KKU Res. J.* 17: 880–894.
- Wanee, S., Supachai, S., Luchai, B. 2017. Antibacterial activity of peel extracted from mangosteen (*Garcinia Mangostana Linn.*) and phlai (*Zingiber Montanum Koenig*) root extracted and phlai oil. *J. Sci. Technol. Mahasarakham U.* 36: 53–60.
- Wipawan, N., Bussaba, P., Wancheng, S. 2019. Extraction of active compounds from Thai herbs: Powder and extract. *J. KMUT.* 29: 157–166.
- Yodhnu, S., Sirikatitham, A., Chatchai, W. 2009. Validation of LC for the determination of α -mangostin in mangosteen peel extract: A tool for quality assessment of *Garcinia mangostana L.* *J. Chromatogr. Sci.* 47: 185–189. doi.org/10.1093/chromsci/47.3.185

การศึกษาการต้านออกซิเดชันของนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลาที่เตรียมด้วยเทคนิค ultrasonication

Investigation of antioxidant activities of vanilla essential oil nanoemulsion fabricated using ultrasonication techniques

ชนิกันต์ ชูสิทธิ์^a, อุบลรัตน์ สิริภัทรารวรรณ^{a,b,*}

Chanikarn choosit^a, Ubonrat Siripatrawan^{a,b,*}

^aภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^bเทคโนโลยีใหม่สำหรับบรรจุภัณฑ์และการควบคุมอายุการเก็บอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ 10330

^aDepartment of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

^bThe Novel Technology for Food Packaging & Control of Shelf Life Research Group, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ubonrat3@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติการต้านการเกิดออกซิเดชันของนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลา ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิค ultrasonication โดยแปรอัตราส่วนของของน้ำมันหอมระเหยวานิลลาต่อสารลดแรงตึงผิว Tween80 เป็น 1:1 (NE1:1), 4:1 (NE4:1) และ 5:1 (NE5:1) วัดขนาดอนุภาค (particle size) และการกระจายตัวของอนุภาค (polydispersity index, PDI) เพื่อติดตามความเสถียรของนาโนอิมัลชันเป็นระยะเวลา 30 วัน ที่ 30°C รวมทั้งศึกษาสมบัติการต้านออกซิเดชัน 2 วิธี คือ FRAP assay และ DPPH assay จากผลการทดลองพบว่า NE1:1 มีขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคดีที่สุด และมีสมบัติการต้านออกซิเดชันเมื่อวัดด้วย FRAP activity สูงสุด อย่างไรก็ตามพบว่า NE1:1 มีค่า DPPH activity ต่ำกว่า NE4:1 และ NE5:1 อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างอนุมูล DPPH กับสารฟีนอลิกบางตัวที่มีในน้ำมันหอมระเหยวานิลลา จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า NE1:1 ให้นาโนอิมัลชันที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบต้านออกซิเดชันในอาหารมากที่สุด

คำสำคัญ: การต้านออกซิเดชัน, นาโนอิมัลชัน, น้ำมันหอมระเหยวานิลลา, DPPH, FRAP

Abstract

This research aimed to investigate antioxidant activities of vanilla essential oil (VEO) and its nanoemulsion fabricated using ultrasonication technique. The VEO nanoemulsion was fabricated by using different ratios of VEO to Tween80 i.e. 1:1 (NE1:1), 4:1 (NE4:1) and 5:1 (NE5:1). The VEO nanoemulsions were characterized for particle size, polydispersity index (PDI) and stability for 30 days at 30°C. The antioxidant activities of the nanoemulsion were evaluated using two antioxidation systems i.e. FRAP and DPPH assays. The results showed NE1:1 had the best particle size and PDI, whereas exhibited the highest FRAP activity. However, NE1:1 showed lowest DPPH activity probably due to the interaction between DPPH free radical and certain phenolic compounds in VEO. The results suggested that NE1:1 was the optimal formula.

Keywords: Antioxidant activity, DPPH, FRAP, Nanoemulsion, Vanilla essential oil

คำนำ

นาโนอิมัลชัน (nanoemulsion) คือ ระบบคอลลอยด์ที่ประกอบด้วย น้ำ น้ำมัน และสารลดแรงตึงผิว โดยเป็นระบบคอลลอยด์ที่มีความคงตัวสูง และมีความเสถียรมากกว่าอิมัลชัน (Kale and Deore, 2017) เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่าระดับนาโนเมตร ทำให้กระจายตัวในน้ำได้ดี และไม่เกิดการกระเจิงของแสง ดังนั้นสีของนาโนอิมัลชันจึงไม่ขุ่นเหมือนกับอิมัลชัน เมื่อนำมาใช้กับอาหาร จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสีของอาหาร และเนื่องจากมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีจึงเกิดการเกาะกลุ่ม (flocculation), การรวมหยด (coalescence) และการแยกชั้น (creaming) ต่ำกว่าระบบอิมัลชันที่มีอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่กว่า (Tadros et al., 2004) นาโนอิมัลชันเตรียมได้จาก 2 วิธี คือ High energy methods และ Low energy methods โดย High energy methods มีหลายวิธี เช่น High-pressure homogenization, Microfluidization และ Ultrasonication โดยการเตรียมนาโนอิมัลชันแบบ High energy methods สามารถควบคุมขนาดหยดไขมันได้ดี ด้วยการเลือกองค์ประกอบของสูตรที่เหมาะสม (Kumar et al., 2019) มีการศึกษาพบว่า การเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวอย่าง Tween80 จะทำให้ลดขนาดของหยดไขมันในนาโนอิมัลชันได้ดีว่าการใช้ Tween20 และพบว่าการใช้ไขมันงามผสมกับยูจีนอล จะให้ขนาดหยดไขมันที่ต่ำกว่าและมีความเสถียรสูงกว่านาโนอิมัลชันยูจีนอลที่ไม่มีน้ำมันงา (Ghosh et al., 2014) ส่วนการเตรียมนาโนอิมัลชันแบบ Low energy methods เช่น Phase inversion emulsification method และ Self-nanoemulsification method โดยทั่วไปวิธีนี้จะไม่ใช่ในการทำนาโนอิมัลชันที่ใช้กับอาหารเนื่องจากต้องใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อรสชาติและความปลอดภัยของอาหาร (Kumar et al., 2019) และการที่นาโนอิมัลชันมีขนาดเล็กและมีความเสถียร ทำให้มีการนำนาโนอิมัลชันมาใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย เช่น ใช้ในการกักเก็บสารสำคัญที่มีประโยชน์ในน้ำมัน (Durmus et al., 2019)

การนำน้ำมันหอมระเหยมาใช้ในรูปแบบของนาโนอิมัลชันมีหลากหลายในปัจจุบัน เช่น กานพลู อบเชย และ โหระพา (Pathania et al., 2018) อย่างไรก็ตามน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพรมีข้อจำกัดในเรื่องของกลิ่น ซึ่งอาจไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ในขณะที่น้ำมันหอมระเหยวานิลลาที่มีกลิ่นที่เป็นที่ยอมรับได้มากกว่า (Marin et al., 2010) นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยวานิลลา ยังมีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันได้ดี พบว่าจากการวัด reducing power ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระของ 4-hydroxy-3-methoxybenzyl alcohol > vanillic acid > 4-hydroxybenzyl alcohol > 4-hydroxybenzaldehyde และ vanillin สูงกว่า BHA (Shyamala et al., 2007) ดังนั้นกลไกในการต้านอนุมูลอิสระของวานิลลา อาจเกิดจากสารสำคัญที่เป็นองค์ประกอบในวานิลลาที่ทำหน้าที่ในการต้านออกซิเดชัน จากข้อดีของวานิลลาในเรื่องของกลิ่นและสมบัติการต้านออกซิเดชัน ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ศึกษาผลของการต้านออกซิเดชันของนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลา

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลา

น้ำมันหอมระเหยวานิลลา (บริษัท กรุงเทพเคมี, ประเทศไทย) และสารลดแรงตึงผิว Tween80[®] (บริษัท กรุงเทพเคมี, ประเทศไทย) โดยใช้สัดส่วนน้ำมันหอมระเหยวานิลลา ต่อสารลดแรงตึงผิว เท่ากับ 1:1, 4:1 และ 5:1 หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่น 98%, 95% และ 94% ตามลำดับ และผสมกันด้วยเครื่อง Homogenizer (Ystral GmbH, Ballrechten-Dottingen) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายเข้าเครื่อง Sonicator (Elmasonic E 70 H, Elma) เป็นเวลา 5 min (Campolo et al., 2020) ในระหว่างการดำเนินการควบคุมอุณหภูมิที่ $6 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยใช้น้ำแข็ง และนำไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (particle

size), การกระจายตัวของอนุภาค (polydispersity index, PDI) และสมบัติการต้านออกซิเดชัน 2 วิธี คือ FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) assay และ DPPH (1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl) free radical scavenging assay

การวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

การวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค โดยใช้เครื่อง Zetasizer (MALVERN Zetasizer Nano ZSP) และสังเกตการแยกชั้นและการตกตะกอนของสารละลายนาโนอิมัลชันอิมัลชัน ทุก 10 วันจนถึงวันที่ 30 โดยทำการเก็บรักษาตัวอย่างในระหว่างการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 30°C

วัดการต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH

นำนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลาแต่ละสูตรมาวัดสมบัติการต้านออกซิเดชัน โดยใช้วิธี DPPH assay และวิธี FRAP assay ดัดแปลงตามวิธีของ Ruengdech และ Siripatrawan. (2021) โดยนำตัวอย่างนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลาและน้ำมันหอมระเหยวานิลลามาเจือจาง 500 เท่า โดยใช้ น้ำกลั่นและเมทานอล ตามลำดับเป็นตัวทำละลาย การทดสอบ DPPH assay ทำโดยนำตัวอย่างปริมาตร 0.1 ml มาเติมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.01 mmol/L ปริมาตร 0.9 ml โดยใช้ methanol เป็นตัวทำละลาย ใส่ในหลอดทดลองและเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที หลังจากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance, ABS) ด้วย spectrophotometer (Evolution 260 Bio Uv-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 517 nm โดยใช้เมทานอลเป็น blank และคำนวณ %inhibition ตาม Equation 1

$$\% \text{ inhibition} = \left(\frac{\text{ABS}_{\text{blank}} - \text{ABS}_{\text{sample}}}{\text{ABS}_{\text{blank}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

วัดการต้านออกซิเดชันโดยวิธี FRAP

สำหรับวิธี FRAP assay ทำโดยนำตัวอย่างนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลาและน้ำมันหอมระเหยวานิลลามาเจือจาง 500 เท่า โดยใช้ น้ำกลั่นและเมทานอล ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างที่เจือจางแล้วมา 0.15 ml จากนั้นเติมสาร FRAP reagent ไป 2.58 ml ซึ่งสาร FRAP reagent เตรียมได้จากการผสม acetate buffer (pH = 3.6) ความเข้มข้น 0.3 mol/L ต่อสาร 2,4,6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ) ความเข้มข้น 10 mmol/L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 40 mmol/L และสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตความเข้มข้น 20 mmol/L ในอัตราส่วน 10:1:1 ตามลำดับ หลังจากนั้น ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance, ABS) ด้วย spectrophotometer (Evolution 260 Bio Uv-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 593 nm โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของโทรลอคซ์ (trolox equivalent) ในช่วงความเข้มข้น 50–300 $\mu\text{mol/L}$ และรายงานค่าการต้านออกซิเดชันเป็น มิลลิโมลาร์ของสารมาตรฐานโทรลอคซ์ต่อกรัมของตัวอย่าง

การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Fisher's Least-Significant Difference (LSD) ระบุความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลา 3 สูตร (1:1, 1:4, และ 1:5) โดยการวัดขนาดของอนุภาค, การกระจายตัวของอนุภาค พบว่า แต่ละสูตรมีขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคแตกต่างกัน (Fig. 1 และ Fig. 2) คือ NE1:1 มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 152.5 ± 1.47 nm เมื่อเวลาผ่านไป 20 วัน มีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นเท่ากับ 188.6 ± 2.10 nm และวันที่ 30 มีขนาดเท่ากับ 152.9 ± 2.21 nm อาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ออกซิเจนสามารถเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมัน หรือเปลี่ยนโมเลกุลที่ละลายในน้ำมันเป็นโมเลกุลที่ละลายน้ำได้ (Anwar, 2015) จึงอาจทำให้ขนาดของอนุภาคลดลง แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคยังคงอยู่ในช่วง 500 nm ตามกำหนดของขนาดนาโนอิมัลชัน (Gupta et al., 2016) และพบว่าไม่เกิดการแยกชั้นของนาโนอิมัลชันในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิ 30°C ในขณะที่ NE1:4 และ NE1:5 มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 181.3 ± 2.22 nm และ 223.1 ± 5.92 nm ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน มีขนาดเพิ่มขึ้น เป็น 398.4 ± 11.48 nm และ 563.1 ± 14.93 nm ตามลำดับ โดยสูตร 1:5 มีแยกชั้นของนาโนอิมัลชัน ตั้งแต่วันที่ 0 ของการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับค่า PDI เท่ากับ 0.450 ± 0.07 เนื่องจากการที่มีค่า PDI ที่สูง แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในนาโนอิมัลชันไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดการดึงดูดของอนุภาคขนาดเล็กไปสู่อนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจาก หยดไขมันขนาดเล็กมีความสามารถในการละลายน้ำสูงกว่า จึงเคลื่อนที่โดยมีน้ำเป็นตัวกลางไปยังหยดไขมันขนาดใหญ่ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Ostwald ripening (Tadros et al., 2004) โดยเมื่อเป็นหยดไขมันที่ใหญ่ขึ้น จึงทำให้อัตราการแยกชั้นของน้ำมันเร็วขึ้น

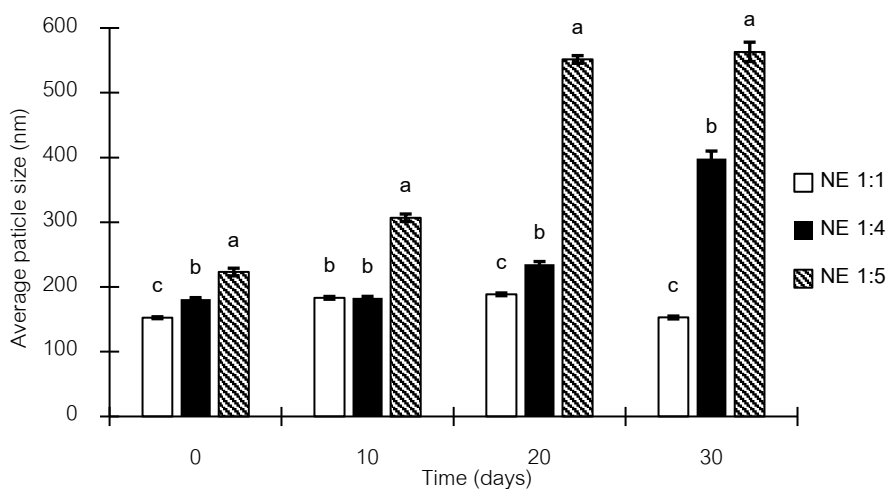


Fig. 1 The particle size of vanilla essential oil nanoemulsion during storage at 30°C for 30 days

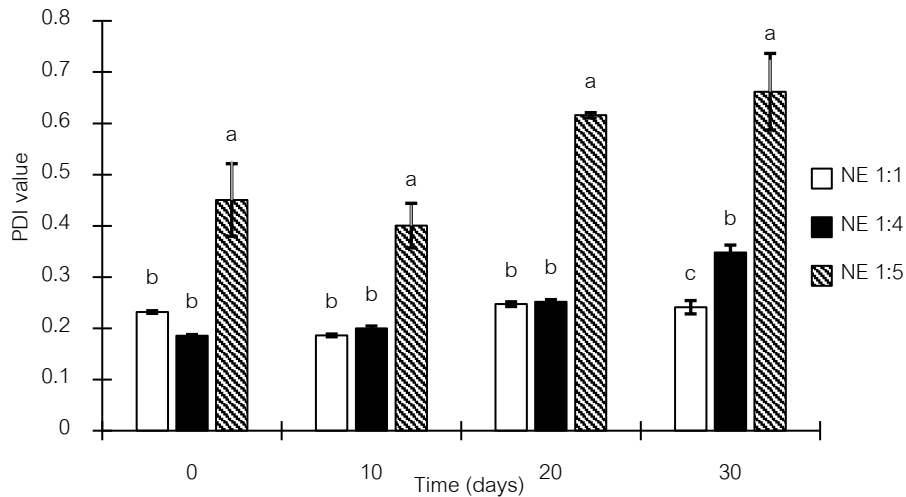


Fig. 2 The PDI value of vanilla essential oil nanoemulsion during storage at 30°C for 30 days

ในการศึกษาการต้านออกซิเดชันของนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลา จากการรายงานของ Shyamala (2007) พบว่า วานิลลา มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมาจากสารสำคัญที่เป็นองค์ประกอบในวานิลลาอย่าง 4-hydroxy-3-methoxybenzyl alcohol, vanillic acid, 4-hydroxybenzyl alcohol, 4-hydroxybenzaldehyde และ vanillin ที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้ ผ่านกลไกการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ ดังนั้น วานิลลา จึงสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่จากการเกิดออกซิเดชันได้ และการวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลา ด้วยวิธี FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) assay เป็นการศึกษากลไกการต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ พบว่าค่า FRAP value ของน้ำมันหอมระเหยวานิลลามีค่าที่สูงคือ 868.48 ± 0.72 mM/g จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้งานวิจัยนี้ เลือกว่าจะนำน้ำมันหอมระเหยวานิลลามาศึกษา

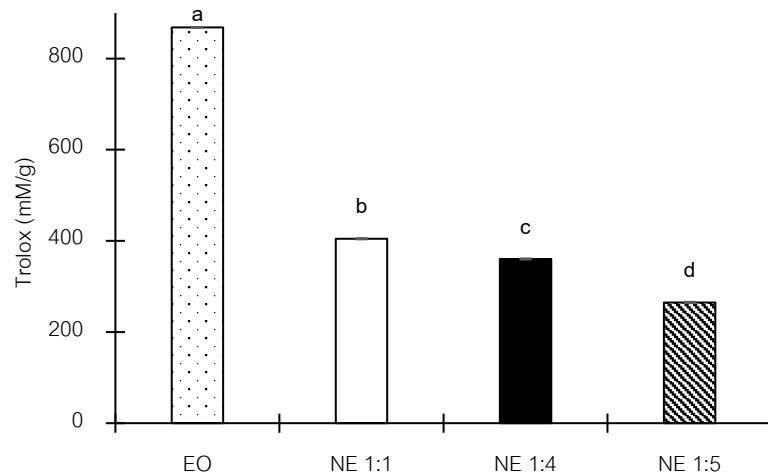


Fig.3 Antioxidant activity by using FRAP assay of vanilla essential oil nanoemulsion

จากผลการวัดการต้านออกซิเดชันของนาโนอิมัลชันโดยวิธี FRAP assay พบว่า NE1:1, NE1:4 และ NE1:5 มีค่า FRAP value เท่ากับ 404.69 ± 1.24 mM/g, 360.25 ± 1.24 mM/g และ 264.77 ± 1.43 mM/g ตามลำดับ ดัง Fig. 3 โดยแต่ละสูตรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และพบว่า NE1:1 มีค่าสูงกว่า NE1:4 และ NE1:5 เนื่องจากขนาดของนาโนอิมัลชัน NE1:1 มีขนาดเล็กที่สุด ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระดีที่สุด เนื่องจาก ระบบนาโนอิมัลชันมีขนาดเล็ก ทำให้พื้นที่ผิวของหยดไขมันสูงขึ้น ทำให้การนำส่งสารสำคัญในน้ำมันหอมระเหยวานิลลาที่มีฤทธิ์ใน

การต้านอนุมูลอิสระดีขึ้น (Zorzi, 2016) แต่เมื่อพิจารณาการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH (1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl) free radical scavenging assay ซึ่งเป็นพบว่า NE1:1, NE1:4 และ NE1:5 มีค่า DPPH free radical scavenging activity เท่ากับ $20.72 \pm 0.9\%$, $30.33 \pm 0.67\%$ และ $33.63 \pm 0.52\%$ ตามลำดับ ดัง Fig. 4 ซึ่งมีแนวโน้มที่แตกต่างจากการวัดโดยวิธี FRAP อาจเกิดจากการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH เป็นการวัดอนุมูลอิสระ DPPH ที่สามารถลดลงจากการให้ไฮโดรเจนอะตอมของสารต้านออกซิเดชัน ซึ่งอนุมูลอิสระนี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลบางชนิดได้ เช่น ยูจีนอล และอนุพันธ์ของยูจีนอลอย่างสารวานิลลินในวานิลลา (Almeida, 2011) โดยจากการรายงานของ Bondet, Brand-William and Berset (1997) พบว่าสารยูจีนอลและอนุพันธ์ของยูจีนอล จะเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอมและเกิดการสร้างอนุมูลอิสระขึ้นใหม่ ส่งผลให้การวัดฤทธิ์การต้านออกซิเดชันไม่แสดงในการวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tai et al. (2011) ที่ทำการประเมินสมบัติการต้านออกซิเดชันของวานิลลิน พบว่าวานิลลินแสดงฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันด้วยกลไกการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ โดยพบว่า วานิลลิน แสดงฤทธิ์ที่แรงกว่าแอสคอร์บิกแอซิด (ascorbic acid) และโทรลออกซ์ (Trolox) ในการทดสอบ ABTS•+-scavenging assay ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระของสารต้านออกซิเดชัน แต่ไม่แสดงฤทธิ์การต้านออกซิเดชันในการทดสอบวิเคราะห์การขจัดอนุมูลอิสระจาก DPPH assay

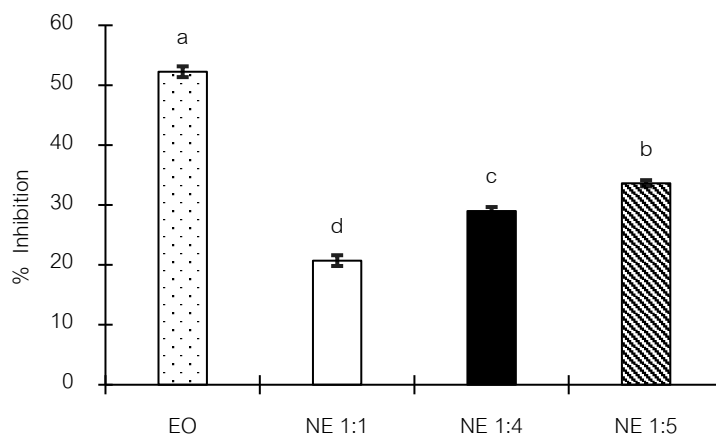


Fig. 4 Antioxidant activity by using FRAP assay of vanilla essential oil nanoemulsion

สรุป

การศึกษาการต้านออกซิเดชันนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลา พบว่าสูตรนาโนอิมัลชันที่ดีที่สุดคือ NE1:1 เนื่องจากมีขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคที่เล็กกว่าสูตรอื่นในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°C และด้วยขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคที่เล็กกว่า ทำให้ NE1:1 มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP ได้ดีที่สุด เนื่องจากเกิดกลไกการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระได้ดี ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า NE1:1 เป็นสูตรนาโนอิมัลชันของน้ำมันหอมระเหยวานิลลาที่เหมาะสม ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการต้านออกซิเดชันต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- Almeida, M.M.B., Sousa, P.H.M, Arriaga, A.M.C., Prado, G.M., Magalhaes, C.E.C., Maia, G.A., Lemos, T.L.G. 2015. Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh exotic fruits from northeastern Brazil. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 32: 127–135.
- Almeida, F.D.L., Cavalcante, R.S., Cullen, P.J., Frias, J.M., Bourke, P., Fernandes, F.A., Rodrigues, S. 2015. Effects of atmospheric cold plasma and ozone on prebiotic orange juice. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 32: 127–135.
- Anwar, S.H. 2015. Lipid oxidation in oil-in-water emulsion: A mini review. *Jurnal Teknologi dan Industri Pertanian Indonesia* 7(2): 70–73.
- Bondet, V.; Brand-Williams, W. Berset, C. 1997. Kinetics and mechanisms of antioxidant activity using the DPPH free radicle method. *Lebensm. Wiss. Technol.* 30(6): 609–615.
- Campolo, O., Giunti, G., Laigle, M., Michel, T., and Palmeri, V. 2020. Essential oil-based nano-emulsions: Effect of different surfactants, sonication and plant species on physicochemical characteristics. *Ind. Crops Prod.* 157: 112–935.
- Durmus, M. 2018. The effect of nanoemulsions based on cituu essential oils (orange, mandarin, grapefruit, and lemon) on the shelf life of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets at $4\pm 2^{\circ}\text{C}$. *J. Food Saf.* 40(1): 1–10.
- Ghosh, V., Mukherjee, A., Chandrasekaran, N. 2014. Eugenol-loaded antimicrobial nanoemulsion preserves fruit juice against, microbial spoilage. *Colloids Surf. B. Biointerfaces* 114: 392–397.
- Gupta, A., Eral, H.B., Hatton, T.A., Doyle, P.S. 2016. Nanoemulsions: Formation, properties and applications. *Soft Matter* 12: 2826–2841.
- Kale, S.N., and Deore, S.L. 2017. Emulsion micro emulsion and nano emulsion: A review. *The Field of Pharmacy* 8: 39–47.
- Kumar, M., Bishnoi, R.S., Shukla, A.K., Jain, C.P. 2019. Techniques for formulation of nanoemulsion drug delivery system: A review. *Prev. Nutr. Food Sci.* 24(3): 225–234.
- Ruengdech, A., Siripatrawan, U. 2021. Application of catechin nanoencapsulation with enhanced antioxidant activity in high pressure processed catechin-fortified coconut milk. *LWT-Food Sci. Technol.* 140: 110–594.
- Shyamala, B. N., Naidu, M. M., Sulochanamma, G., Srinivas, P. 2007. Studies on the antioxidant activities of natural vanilla extract and its constituent compounds through in vitro models. *J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci.* 55: 7738–7743.
- Pathania, R., KHAN, H., Kaushik, R., Khan, M.A. 2018. Essential Oil Nanoemulsions and their Antimicrobial and Food Applications. *Nutr. Food Sci.* 6(3): 626–643.
- Tadros, T., Izquierdo, P., Esquena, J., Solans, C. 2004. Formation and stability of nanoemulsions. *Adv. Colloid Interface Sci.* 108–109: 303–318.

Tai, A., Sawano, T., Yazama, F., Ito, H. 2011. Evaluation of antioxidant activity of vanillin by using multiple antioxidant assays. *Biochim. Biophys. Acta* 1810: 170–177.

Zorzi, G.K., Caregnato, F., Moreira, J.C.F., Teixeira, H.F., Carvalho, E.L.S. 2016. Antioxidant effect of nanoemulsions containing extract of *Achyrocline satureioides* (Lam) D.C.—Asteraceae. *American Association of Pharmaceutical Scientists* 17(4): 844–849.

ผลของการเสริมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติกในอาหาร ต่อการเจริญเติบโตและระบบภูมิคุ้มกันของปลากัดไทย

Effect of dietary supplementation of probiotic lactic acid bacteria and prebiotics on growth performance and immune response of Siamese fighting fish *Betta splendens*

วัลัยพร เจริญทรัพย์ศรี^{a,b}, จันท์ประภา อิมจงใจรัก^c, ปิติ อัมพารยัพ^{a,b,*}

Walaiporn Charoensapsri^{a,b}, Chanprapa Imjongjirak^c, Piti Amparyup^{a,b,*}

^aศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

^bศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^cภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^aNational Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Pathum Thani 12120, Thailand

^bCenter of Excellence for Marine Biotechnology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

^cDepartment of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: piti.amp@biotec.or.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย (*Lactobacillus plantarum* SGLAB01 และ *Lactococcus lactis* SGLAB02) และพรีไบโอติก (fructooligosaccharide และ maltodextrin) ในอาหารต่อการเจริญเติบโตและระบบภูมิคุ้มกันของปลากัดไทย ผลการวิจัยพบว่าปลากัดที่เลี้ยงด้วยโปรไบโอติก พรีไบโอติก และโปรไบโอติกควบคู่กับพรีไบโอติกเป็นเวลา 15 วัน มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และมีการแสดงออกของยีนในระบบภูมิคุ้มกัน ได้แก่ ฮีทช็อคโปรตีน และเพปไทด์ต้านจุลชีพ เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่เลี้ยงด้วยอาหารปกติ แสดงให้เห็นว่าการเสริมด้วยโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและ พรีไบโอติกในอาหารอาจเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและกระตุ้นภูมิคุ้มกันของปลากัดไทย

คำสำคัญ: ปลากัดไทย, โปรไบโอติก, พรีไบโอติก, แลคติกแอซิดแบคทีเรีย

Abstract

This study aimed to investigate the effect of dietary supplementation of two probiotic lactic acid bacteria (LAB), *Lactobacillus plantarum* SGLAB01 and *Lactococcus lactis* SGLAB02, two prebiotics, fructooligosaccharide and maltodextrin, and their combination on the growth performance and immune response of Siamese fighting fish *Betta splendens*. The results showed that betta fish fed probiotics, prebiotics, and the combination of both probiotics and prebiotics for 15 days had significantly higher specific growth rate (SGR) and the relative mRNA expression of the immune-related genes, including heat shock protein and antimicrobial peptides (AMPs), compared to the control group fed basal diet. These findings suggest that dietary supplementation of probiotic lactic acid bacteria and prebiotics might be an effective strategy to improve the growth performance and immune response of the betta fish.

Keywords: Lactic acid bacteria, Prebiotic, Probiotic, Siamese fighting fish

คำนำ

ปลากัดไทย (Siamese fighting fish) เป็นปลาน้ำจืดสายพันธุ์พื้นเมืองในสกุล *Betta* ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่โดดเด่น มีสีสันสวยงามสะดุดตา เพาะเลี้ยงได้ง่าย ใช้พื้นที่น้อย ทำให้ได้รับความนิยมเลี้ยงอย่างแพร่หลายในประเทศต่างๆ ทั่วโลก โดยสายพันธุ์ที่นิยมเพาะเลี้ยงเพื่อเป็นปลากัดสวยงาม คือ *Betta splendens* Regan, 1910 (Faria et al., 2006; Monvises et al., 2009) ธุรกิจการเพาะเลี้ยงและส่งออกปลากัดสวยงามสร้างรายได้มหาศาลเข้าสู่ประเทศ และจากความต้องการปลากัดในตลาดโลกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกษตรกรเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้ได้ผลผลิตเพียงพอต่อความต้องการของตลาด อย่างไรก็ตาม พบว่าการจัดการฟาร์มและสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ส่งผลทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตลดลง มีสุขภาพอ่อนแอ ภูมิคุ้มกันต่อโรคต่ำ และติดเชื้อก่อโรคได้ง่าย ถึงแม้ว่าจะมีการนำยาปฏิชีวนะหรือสารเคมีมาใช้ในการรักษาโรค แต่พบว่าการรักษาให้ผลไม่ดีขึ้นเนื่องจากเป็นการรักษาหลังจากพบอาการของโรคแล้ว ทำให้ต้องใช้ยาปฏิชีวนะหรือสารเคมีในปริมาณมาก ทำให้เกิดการตกค้างของยาปฏิชีวนะหรือสารเคมี และนำไปสู่การดื้อยาของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค (Moriarty, 1997)

การเสริมด้วยจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ เช่น โปรไบโอติก หรือสารพรีไบโอติก เป็นแนวทางเชิงชีวภาพที่ได้รับความนิยมและได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อนำมาใช้เป็นทางเลือกในการควบคุมโรคและส่งเสริมสุขภาพทดแทนการใช้ยาปฏิชีวนะและสารเคมีในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โปรไบโอติก คือ จุลินทรีย์มีชีวิตที่เมื่อได้รับในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อสุขภาพ (FAO/WHO Report, 2001) การเสริมด้วยโปรไบโอติกช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต ส่งเสริมสุขภาพ เพิ่มภูมิคุ้มกัน และเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อโรค (Akhter et al., 2015; Merrifield et al., 2010) พรีไบโอติก เป็นอาหารในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ถูกย่อยในทางเดินอาหารแต่มีบทบาทช่วยในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบหรือกิจกรรมของกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารซึ่งพบว่าส่งผลดีต่อการใช้อาหารและสุขภาพของสัตว์น้ำ (Akhter et al., 2015; Ringø et al., 2014) ถึงแม้จะมีผลการศึกษาโปรไบโอติกและพรีไบโอติกในการเพาะเลี้ยงปลาหลายชนิด (Hoseinifar et al., 2016; Ringø et al., 2014) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลทางวิชาการเกี่ยวกับโปรไบโอติกและพรีไบโอติกในการเพาะเลี้ยงปลาสวยงามยังคงมีอยู่อย่างจำกัด

แลคติกแอซิดแบคทีเรีย เป็นกลุ่มของแบคทีเรียชนิดแกรมบวกที่มีความสามารถในการผลิตกรดแลคติกและสารต้านจุลชีพ เช่น bacteriocins (Ouweland and Vesterlund, 2004) และมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นโปรไบโอติกในสัตว์น้ำ (Merrifield et al., 2014; Ringø et al., 2018) *Lactobacillus plantarum* SGLAB01 และ *Lactococcus lactis* SGLAB02 เป็นแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้กุ้งสุขภาพดี และมีประสิทธิภาพในกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันและเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อก่อโรคในกุ้ง (Chomwong et al., 2018) งานวิจัยนี้ จึงสนใจศึกษาผลของการเสริมด้วยโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย *L. plantarum* SGLAB01 และ *L. lactis* SGLAB02 และพรีไบโอติก fructooligosaccharide (FOS) และ maltodextrin (MD) ต่อการเจริญเติบโตและการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของปลากัดสวยงาม

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

คัดเลือกปลากัดไทยสายพันธุ์ *Betta splendens* ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (ขนาดประมาณ 2.8–3.1 เซนติเมตร) เลี้ยงแยกในโหลพลาสติกที่มีน้ำสะอาด ปริมาตร 800 มิลลิลิตร เลี้ยงปลาด้วยอาหารสำเร็จรูป โดยพักปลาเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน ก่อนนำไปทำการทดลอง

การเตรียมอาหาร

เตรียมอาหารปลากัด จำนวน 4 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 อาหารปลากัดผสมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย (LP+LL) เตรียมโดยผสมเชื้อ *L. plantarum* SGLAB01 (LP) และ *L. lactis* SGLAB02 (LL) (อัตราส่วนระหว่าง LP ต่อ LL เท่ากับ 1 ต่อ 1) กับอาหารปลากัดสำเร็จรูปให้มีความเข้มข้นสุดท้ายของเชื้อเท่ากับ 5×10^8 cfu ต่ออาหารหนัก 1 กรัม สูตรที่ 2 อาหารปลากัดผสมพรีไบโอติก (FOS+MD) เตรียมโดยผสมพรีไบโอติก fructooligosaccharide (FOS) และ maltodextrin (MD) กับอาหารปลากัดสำเร็จรูปให้มีความเข้มข้นสุดท้ายของพรีไบโอติกแต่ละชนิดเท่ากับ 5% (w/w) สูตรที่ 3 อาหารปลากัดผสมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) เตรียมโดยผสมเชื้อ *L. plantarum* SGLAB01 (LP) และ *L. lactis* SGLAB02 (LL) และพรีไบโอติก FOS และ MD กับอาหารปลากัดสำเร็จรูปให้มีความเข้มข้นสุดท้ายของเชื้อเท่ากับ 5×10^8 cfu ต่ออาหารหนัก 1 กรัม และความเข้มข้นสุดท้ายของพรีไบโอติกแต่ละชนิดเท่ากับ 5% (w/w) และสูตรที่ 4 อาหารชุดควบคุม (Control) เตรียมโดยผสมอาหารปลากัดกับสารละลาย 0.85% (w/v) NaCl จากนั้น เคลือบเม็ดอาหารทุกสูตรด้วย 1% (v/v) fish oil ตากอาหารที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C และนำไปใช้เลี้ยงปลาภายในเวลา 3 วัน

การให้กินอาหารผสมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติก

สุ่มคัดเลือกปลากัดที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (น้ำหนักเฉลี่ย 0.59 ± 0.10 กรัม; ความยาวเฉลี่ย 2.98 ± 0.18 เซนติเมตร) จำนวน 120 ตัว ซึ่งน้ำหนัก วัดความยาว และบันทึกเป็นข้อมูลความยาวและน้ำหนักตัวของปลากัดก่อนเริ่มการทดลอง จากนั้นแยกเลี้ยงปลากัดในโหลพลาสติกที่มีน้ำสะอาด ปริมาตร 800 มิลลิลิตร โดยแบ่งปลากัดออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ประกอบด้วย ชุดการทดลองที่ 1 ให้ปลากัดกินอาหารสูตรที่ 1 (LP+LL) เป็นเวลา 15 วัน ชุดการทดลองที่ 2 ให้ปลากัดกินอาหารสูตรที่ 2 (FOS+MD) เป็นเวลา 15 วัน ชุดการทดลองที่ 3 ให้ปลากัดกินอาหาร สูตรที่ 3 (LP+LL+FOS+MD) เป็นเวลา 15 วัน และชุดที่ 4 ซึ่งเป็นชุดการทดลองควบคุม ให้ปลากัดกินอาหารควบคุม สูตรที่ 4 (Control) เป็นเวลา 15 วัน ให้อาหารวันละ 2 ครั้ง และเปลี่ยนถ่ายน้ำทุกๆ 3 วัน ตลอดการทดลอง

การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของปลากัด

ซึ่งน้ำหนัก วัดความยาวของปลากัดหลังจากให้กินอาหารผสมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติกเป็นเวลา 15 วัน และบันทึกเป็นข้อมูลความยาวและน้ำหนักตัวของปลากัดหลังสิ้นสุดการทดลอง คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Percent weight gain; PWG) ตาม Equation 1 คำนวณหาค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; SGR) ตาม Equation 2 และนับจำนวนปลาที่รอดชีวิตหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการรอด (Survival rate) ตาม Equation 3

$$\text{Percent weight gain (PWG; \%)} = \frac{\text{Final weight} - \text{Initial weight}}{\text{Initial weight}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Specific growth rate (SGR; \%/\text{day})} = \frac{\ln(\text{Final weight}) - \ln(\text{Initial weight})}{\text{Experimental days}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Survival rate (\%)} = \frac{\text{Final fish number}}{\text{Initial fish number}} \times 100 \quad (3)$$

การสกัด RNA และการสังเคราะห์ cDNA

เก็บตัวอย่างลำไส้จากปลากัดหลังจากให้กินอาหารผสมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติกเป็นเวลา 15 วัน สกัด RNA ด้วย Tri Reagent® (Molecular Research Center) กำจัด DNA ที่เจือปนโดยย่อยด้วยเอนไซม์

DNase I (Promega) ตรวจสอบปริมาณและคุณภาพของ RNA ด้วยเครื่อง NanoDrop (Thermo Scientific) จากนั้นสังเคราะห์ cDNA ด้วยชุด RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit (Thermo Fisher Scientific) ทำการเก็บตัวอย่าง cDNA ที่อุณหภูมิ -80°C ก่อนนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

การตรวจสอบการแสดงออกของยีนในระบบภูมิคุ้มกันด้วยเทคนิค Semi-quantitative RT-PCR

ตรวจสอบการแสดงออกของยีนในระบบภูมิคุ้มกัน ประกอบด้วย ยีนในกลุ่ม Heat shock protein ได้แก่ Heat shock protein 70 (*BsHSP70*) และยีนเพปไทด์ต้านจุลชีพ ได้แก่ Liver-expressed antimicrobial peptide (*BsLEAP* และ *BsLEAP2C*) ด้วยเทคนิค Semi-quantitative RT-PCR โดยใช้ cDNA ที่เตรียมได้จากตัวอย่างลำไส้ของปลากัดจากทั้ง 4 ชุดการทดลอง (Control, LP+LL, FOS+MD และ LP+LL+FOS+MD) เป็น DNA ต้นแบบ และใช้ไพรเมอร์ที่จำเพาะต่อแต่ละยีน วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ PCR ด้วยอะกาโรสเจลอิเล็กโตรโฟรีซิส และรายงานผลเป็นค่า relative mRNA expression โดยใช้ Beta-actin เป็นยีนควบคุม ลำดับนิวคลีโอไทด์ของไพรเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงใน Table 1

Table 1 Nucleotide sequence of the primers used

Primer	Sequence (5'-3')
<i>BsHSP70</i> rt-F	GTCTTTGGTGGCCTGTCTCTGA
<i>BsHSP70</i> rt-R	GGTAGAGGCCCATGGAAGATG
<i>BsLEAP</i> rt-F	GGAGAGCGGCTCGGATGAC
<i>BsLEAP</i> rt-R	TTCCGTCCCAATCATCCACA
<i>BsLEAP2C</i> rt-F	GTCTAAGGACTGGAGTGGCTTG
<i>BsLEAP2C</i> rt-R	TCAAGCCTCTGTATCAGAGCAG
<i>BsActin</i> F	AGGCTGTGCTGTCCCTGTAT
<i>BsActin</i> R	GAAGGAGTAGCCACGCTCTG

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการเสริมด้วยโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย *L. plantarum* SGLAB01 และ *L. lactis* SGLAB02 ควบคู่กับพรีไบโอติก FOS และ MD ในอาหารต่อการเจริญเติบโตของปลากัด โดยการเก็บบันทึกข้อมูลน้ำหนักและความยาวของปลากัดก่อนและหลังจากสิ้นสุดการทดลอง และนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Percent weight gain; PWG) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; SGR) ได้ผลดังแสดงใน Table 2 โดยผลจากการทดลองพบว่าปลากัดในกลุ่มทดลองที่ให้กินอาหารที่เสริมด้วยโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียควบคู่กับพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) เป็นเวลา 15 วัน มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ให้กินอาหารที่ไม่ได้เสริมด้วยโปรไบโอติกและพรีไบโอติก (Control) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่า PWG และ SGR เท่ากับ $129.57 \pm 6.54\%$ และ $5.54 \pm 0.19\%/day$ ตามลำดับ ในขณะที่ปลากัดกลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมกับโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย (LP+LL) และกลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมกับพรีไบโอติก (FOS+MD) พบว่ามีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่ากลุ่มที่ให้กินอาหารที่เสริมด้วยโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียควบคู่กับพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม พบว่ายังมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่ากลุ่มควบคุม (Control) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่า PWG และ SGR เท่ากับ $121.89 \pm 10.63\%$ และ $5.31 \pm 0.32\%/day$ และ $119.57 \pm 10.29\%$ และ $5.23 \pm 0.32\%/day$ ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาวิจัยในปลาเรนโบว์เทราต์ (*Oncorhynchus mykiss*) ปลาดุกแอฟริกา (*Clarias gariepinus*) และปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ซึ่งพบว่าปลาที่เสริมด้วยโปรไบโอติก พรีไบโอติก

หรือโปรไบโอติกควบคู่กับพรีไบโอติก (ซินไบโอติก) มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าปลาในกลุ่มควบคุม (Al-Dohail et al., 2009; Mehrabi et al., 2012; Staykov et al., 2007; Wang et al., 2008) นอกจากนี้ เมื่อทำการศึกษาด้านการรอดชีวิต โดยทำการนับจำนวนปลาที่ตายในแต่ละกลุ่มก่อนและหลังสิ้นสุดการทดลอง และคำนวณเป็นค่าอัตราการรอด (Survival rate) ผลจากการทดลองพบว่าปลาที่ตายทุกกลุ่ม มีอัตราการรอดชีวิตเท่ากับ 100% แสดงให้เห็นว่า ชนิดและปริมาณของโปรไบโอติกและพรีไบโอติกที่ใช้ในการผสมอาหารในการทดสอบนี้ไม่มีความเป็นพิษต่อปลากัด

Table 2 Growth performance and Survival rate of *Betta splendens* fed probiotics (LP+LL), prebiotics (FOS+MD), and the combination of probiotics and prebiotics (LP+LL+FOS+MD) for 15 days

Parameters	Experimental diets			
	Control	LP+LL	FOS+MD	LP+LL+FOS+MD
Initial length (cm)	3.11±0.12	2.94±0.16	2.86±0.13	3.00±0.18
Final length (cm)	3.80±0.30 ^a	3.96±0.32 ^{a,b}	3.96±0.32 ^{a,b}	4.16±0.27 ^b
Initial weight (g)	0.66±0.11	0.56±0.07	0.56±0.09	0.59±0.08
Final weight (g)	1.12±0.19 ^a	1.24±0.24 ^{a,b}	1.23±0.30 ^{a,b}	1.35±0.22 ^b
PWG (%)	69.70±11.27 ^a	121.89±10.63 ^b	119.57±10.29 ^b	129.57±6.54 ^b
SGR (%/day)	3.52±0.45 ^a	5.31±0.32 ^b	5.23±0.32 ^b	5.54±0.19 ^b
Survival rate (%)	100	100	100	100

Note: Values with different superscripts in each row denote significant difference ($p < 0.05$). Values are presented as the mean±SD. PWG Percent weight gain, SGR Specific growth rate. LP *Lactobacillus plantarum* SGLAB01, LL *Lactococcus lactis* SGLAB02, FOS Fructooligosaccharide, MD Maltodextrin.

จากตรวจสอบประสิทธิภาพของการเสริมอาหารด้วยโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติกต่อการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของปลากัดโดยให้ปลากัดกินอาหารที่เสริมด้วยโปรไบโอติก (LP+LL) พรีไบโอติก (FOS+MD) และโปรไบโอติกควบคู่กับพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) เป็นเวลา 15 วัน และเก็บตัวอย่างลำไส้ของปลากัดมาตรวจสอบการแสดงออกของยีนในระบบภูมิคุ้มกัน ประกอบด้วย ยีนในกลุ่ม heat shock protein ได้แก่ Heat shock protein 70 (*BsHSP70*) และยีนเพปไทด์ต้านจุลชีพ ได้แก่ liver-expressed antimicrobial peptide *BsLEAP* และ *BsLEAP2C* ด้วยเทคนิค Semi-quantitative RT-PCR โดยใช้ยีน Beta-actin เป็นยีนควบคุม และเปรียบเทียบผลกับกลุ่มควบคุมที่ให้กินอาหารปกติ (Control) พบว่าได้ผลดังแสดงใน Fig. 1

ผลจากการตรวจสอบการแสดงออกของยีน Heat shock protein 70 (*BsHSP70*) พบว่า ปลากัดกลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมเฉพาะโปรไบโอติก (LP+LL) กลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมเฉพาะพรีไบโอติก (FOS+MD) และกลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมทั้งโปรไบโอติกและพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) มีการแสดงออกของยีน *BsHSP70* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าปลากัดกลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมทั้งโปรไบโอติกและพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) มีระดับการแสดงออกของยีน *BsHSP70* เพิ่มขึ้นสูงสุด เท่ากับ 1.39 เท่า รองลงมาคือปลากัดกลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมเฉพาะโปรไบโอติก (LP+LL) (1.27 เท่า) และปลากัดกลุ่มที่ให้กินอาหารที่ผสมเฉพาะพรีไบโอติก (FOS+MD) (1.25 เท่า) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปลากัดในกลุ่มควบคุมที่ให้กินอาหารปกติ (Control) (Fig. 1)

ผลจากการตรวจสอบการแสดงออกของยีน Liver-expressed antimicrobial peptide (*BsLEAP*) พบว่าปลากัดกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ผสมเฉพาะพรีไบโอติก (FOS+MD) และกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ผสมทั้งโปรไบโอติกและพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) มีการแสดงออกของยีน *BsLEAP* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เท่ากับ 1.16 เท่า

และ 1.43 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรีย (Control) (Fig. 1) อย่างไรก็ตามพบว่าปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับโปรไบโอติก (LP+LL) มีการแสดงออกของยีน *BsLEAP* ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรีย (Control)

ผลจากการวิเคราะห์การแสดงออกของยีน Liver-expressed antimicrobial peptide 2C (*BsLEAP2C*) พบว่าปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับโปรไบโอติก (LP+LL) กลุ่มที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับพรีไบโอติก (FOS+MD) และกลุ่มที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับทั้งโปรไบโอติกและพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) มีการแสดงออกของยีน *BsLEAP2C* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับพรีไบโอติก (FOS+MD) มีการแสดงออกของยีน *BsLEAP2C* เพิ่มขึ้นสูงที่สุด เท่ากับ 1.70 เท่า รองลงมาคือปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับโปรไบโอติก (LP+LL) (1.56 เท่า) และกลุ่มที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับทั้งโปรไบโอติกและพรีไบโอติก (LP+LL+FOS+MD) (1.39 เท่า) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรีย (Control) (Fig. 1)

ผลจากการทดลองพบว่าการเสริมด้วยโปรไบโอติก พรีไบโอติก และโปรไบโอติกควบคู่กับพรีไบโอติกส่งผลกระตุ้นการแสดงออกของยีน *BsHSP70* *BsLEAP* และ *BsLEAP2C* ของปลาที่เลี้ยง นอกจากนี้ ผลจากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้าซึ่งพบว่าการเสริมด้วยโปรไบโอติกและพรีไบโอติกมีประสิทธิภาพช่วยกระตุ้นการแสดงออกของยีนในระบบภูมิคุ้มกันในปลาหลายชนิด เช่น ปลาแคโรป (*Cyprinus carpio*) ปลาทอง (*Carassius auratus gibelio*) และปลาเรนโบว์เทราต์ (*Oncorhynchus mykiss*) (Khodadadian Zou et al., 2016; Miandare et al., 2016; Yar Ahmadi et al., 2014)

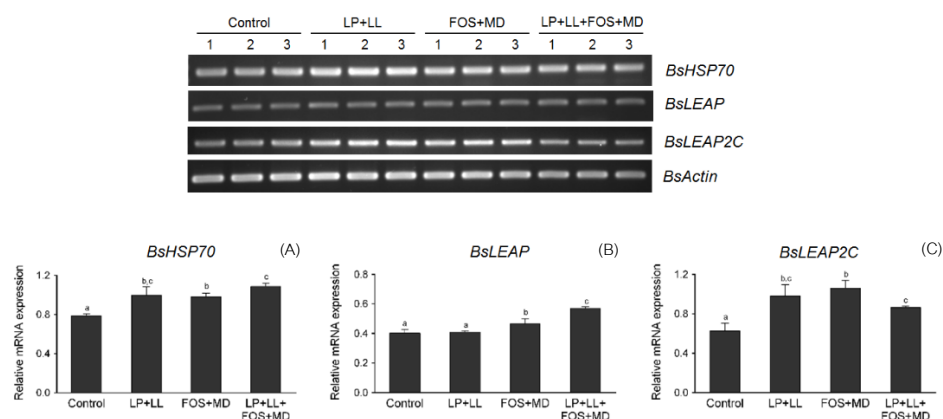


Fig. 1 Effect of dietary administration of two probiotic lactic acid bacteria (LP+LL), two prebiotics (FOS+MD), and their combination (LP+LL+FOS+MD) on modulation of the expression of (A) *BsHSP70*, (B) *BsLEAP*, and (C) *BsLEAP2C* transcripts

Note: Beta-actin was served as internal reference gene. The experiment was performed triplicates. Data are shown as the mean \pm SD (error bars). Different letters (above each bar) indicate a significant difference between mean of each samples ($p < 0.05$).

สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของการเสริมโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย (*L. plantarum* SGLAB01 และ *L. lactis* SGLAB02) และพรีไบโอติก (FOS และ MD) ในอาหารต่อการเจริญเติบโตและระบบภูมิคุ้มกันของปลากัดไทย โดยผลการศึกษาก่อนหน้าพบว่าปลาที่เลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและได้รับโปรไบโอติก พรีไบโอติก และโปรไบโอติกควบคู่กับพรีไบโอติก

โอดิก มีอัตราการเจริญเติบโตและการแสดงออกของยีนในระบบภูมิคุ้มกัน (*BsHSP70*, *BsLEAP* และ *BsLEAP2C*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่เลี้ยงด้วยอาหารปกติ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเสริมด้วยโปรไบโอติกแลคติกแอซิดแบคทีเรียและพรีไบโอติกอาจเป็นหนึ่งในแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตและกระตุ้นภูมิคุ้มกันของปลากัดไทย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (P2050332) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (สัญญาเลขที่ วช.อว.(อ)(ภส)/49/2564) และกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สัญญาเลขที่ RCU_F_64_004_23)

เอกสารอ้างอิง

- Akhter, N., Wu, B., Memon, A.M., Mohsin, M. 2015. Probiotics and prebiotics associated with aquaculture: A review. *Fish Shellfish Immunol.* 45: 733–741.
- Al-Dohail, M.A., Hashim, R., Aliyu-Paiko, M. 2009: Effects of the probiotics, *Lactobacillus acidophilus*, on the growth performance, hematology parameters and immunoglobulin concentration in African catfish (*Claris gariepius*, Burchell 1822) fingerling. *Aquac. Res.* 40: 1642–1652.
- Chomwong, S., Charoensapsri, W., Amparyup, P., Tassanakajon, A. 2018. Two host gut-derived lactic acid bacteria activate the proPO system and increase resistance to an AHPND-causing strain of *Vibrio parahaemolyticus* in the shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Dev. Comp. Immunol.* 89: 54–65.
- Food and Agriculture Organization and World Health Organization (FAO/WHO). 2001. Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with liver lactic acid bacteria. Food and Agriculture Organization and World Health Organization Joint report. 34 pp.
- Faria, P.M.C., Crepaldi, D.V., Teixeira, E.A., Ribeiro, L.P., Souza, A.B., Carvalho, D.C., Melo, D.C., Saliba, E.O.S. 2006. Breeding, handling and reproduction of the *Betta splendens*-Regan 1910. *Rev. Bras. Reprod. Anim.* 30: 134–149.
- Hoseinifar, S.H., Ringø, E., Shenavar Masouleh, A., Esteban, M.Á. 2016. Probiotic, prebiotic and synbiotic supplements in sturgeon aquaculture: A review. *Rev. Aquac.* 8: 89–102.
- Khodadadian Zou, H., Hoseinifar, S.H., Kolangi Miandare, H., Hajimoradloo, A. 2016. *Agaricus bisporus* powder improved cutaneous mucosal and serum immune parameters and up-regulated intestinal cytokines gene expression in common carp (*Cyprinus carpio*) fingerlings. *Fish Shellfish Immunol.* 58: 380–386.
- Mehrabi, Z., Firouzbakhsh, F., Jafarpour, A. 2012. Effects of dietary supplementation of synbiotic on growth performance, serum biochemical parameters and carcass composition in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fingerlings. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl).* 96: 474–481.

- Merrifield, D.L., Dimitroglou, A., Foey, A., Davies, S.J., Baker, R.T., Børgwald, J., Castex, M., Ringø, E. 2010. The current status and future focus of probiotic and prebiotic applications for salmonids. *Aquaculture*. 302: 1–18.
- Merrifield, D.L., Balcázar, J.L., Daniels, C., Zhou, Z., Carnevali, O., Sun, Y.Z., Hoseinifar, H.S., Ringø, E. 2014. Indigenous lactic acid bacteria in fish and Crustaceans. In: Ringø, E., Merrifield, D.L. (Eds.), *Aquaculture Nutrition: Gut Health, Probiotics and Prebiotics*. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 128–168.
- Miandare, H.K., Farvardin, S., Shabani, A., Hoseinifar, S.H., Ramezanzpour, S.S. 2016. The effects of galactooligosaccharide on systemic and mucosal immune response, growth performance and appetite related gene transcript in goldfish (*Carassius auratus gibelio*). *Fish Shellfish Immunol.* 55: 479–483.
- Monvises, A., Nuangsaeng, B., Sriwattanarothai, N., Panijpan, B. 2009. The Siamese fighting fish: Well-known generally but little-known scientifically. *ScienceAsia*. 35: 8–16.
- Moriarty, D.J.W. 1997. The role of microorganisms in aquaculture ponds. *Aquaculture*. 151: 333–349.
- Ouwehand, A.C., Vesterlund, S. 2004. Antimicrobial components from lactic acid bacteria. In: Salminen, S., von Wright, A., Ouwehand, A.C. (Eds.). *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and Functional Aspects*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 375–395.
- Ringø, E., Dimitroglou, A., Hoseinifar, S.H., Davies, S.J. 2014. Prebiotics in finfish: An update. In: Merrifield, D.L., Ringø, E. (Eds.). *Aquaculture nutrition: Gut health, probiotics and prebiotics*. Wiley-Blackwell Publishing. Oxford, UK. pp. 360–400.
- Ringø, E., Hoseinifar, S.H., Ghosh, K., Doan, H.V., Beck, B.R., Song, S.K. 2018. Lactic acid bacteria in finfish—an update. *Front. Microbiol.* 9: 1818.
- Staykov, Y., Spring, P., Denev, S., Sweetman, J. 2007. Effect of a mannan oligosaccharide on the growth performance and immune status of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture International* 15: 153–161.
- Wang, Y.B., Tian, Z.Q., Yao, J.T., Li, W.F. 2008. Effect of probiotics, *Enterococcus faecium*, on tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth performance and immune response. *Aquaculture*. 277: 203–207.
- Yar Ahmadi, P., Farahmand, H., Kolangi Miandare, H., Mirvaghefi, A., Hoseinifar, S.H. 2014. The effects of dietary immunogen® on innate immune response, immune related genes expression and disease resistance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Fish Shellfish Immunol.* 37: 209–214.

องค์ประกอบของกรดไขมันและการแสดงออกของยีน methyl-end desaturases ในโคพีพอด***Apocyclops royi***

Fatty acid composition and gene expression of methyl-end desaturases in copepod

Apocyclops royi**ศุภกานต์ สังข์แก้ว^a, วลัยพร เจริญทรัพย์ศรี^{b,c}, ปิติ อัมพารยัพ^{b,c}, จันทร์ประภา อิมจงใจรัก^{a,*}****Supakam Sungkaew^a, Walaiporn Charoensapsri^{b,c}, Piti Amparyup^{b,c}, Chanprapa Imjongjirak^{a,*}**^aภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330^bศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ปทุมธานี 12120^cศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330^aDepartment of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand^bNational Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), Pathumthani 12120, Thailand^cCenter of Excellence for Marine Biotechnology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,

Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chanprapa.i@chula.ac.th

บทคัดย่อ

โคพีพอด *Apocyclops royi* จัดอยู่ในกลุ่มของครัสเตเชียนขนาดเล็ก มีบทบาทสำคัญในการใช้เป็นอาหารมีชีวิตในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์กรดไขมันโดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรสโกปี ค้นพบว่าทุกระยะของ *A. royi* ได้แก่ นอเพลียส โคพีโพดิด และตัวเต็มวัย ที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis* sp. มี LC-PUFA ในปริมาณสูงรวมถึง DHA และ EPA นอกจากนี้ได้ค้นพบลำดับนิวคลีโอไทด์ที่สมบูรณ์ของยีน methyl-end desaturases ใหม่ 2 ยีน ได้แก่ ArO3D-1 และ ArO3D-2 จากฐานข้อมูลทรานสคริปโตม เมื่อวิเคราะห์โปรตีน ArO3D-1 และ ArO3D-2 พบว่ามีความเหมือนกับยีน O3D-1 และ O3D-2 ของโคพีพอด *Tigriopus californicus* เท่ากับ 72% และ 73% ตามลำดับ การวิเคราะห์การแสดงออกของยีนพบว่ายีนมีการแสดงออกในทุกระยะพัฒนาการ และแสดงออกเพิ่มสูงขึ้นในระยะตัวเต็มวัย แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 ยีนอาจทำหน้าที่ในวิถีการสังเคราะห์กรดไขมัน PUFA ของโคพีพอด *A. royi*

คำสำคัญ: กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน, โคพีพอด, ดีแซตทูเรส**Abstract**

Copepod *Apocyclops royi* is a group of small crustaceans, which plays an important role as major live feed in the aquaculture industry. In this study, analysis of the fatty acid contents using gas chromatography/mass spectroscopy analysis indicated that all copepod stages (nauplius, copepodid and adult stages) of a Thai culture of *A. royi* fed *Tetraselmis* sp. contained high levels of LC-PUFAs, including docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA). Moreover, two novel full-length cDNA of methyl-end desaturases (ArO3D-1 and ArO3D-2) of *A. royi* were identified through transcriptome database. ArO3D-1 and ArO3D-2 proteins exhibited 72% and 73% similarity to O3D-1 and O3D-2 of the copepod *Tigriopus californicus*, respectively. Gene expression analysis showed that ArO3D-1 and ArO3D-2 were universally expressed in all different stages and also upregulated in the adult stages, suggesting the possible function of these genes in LC-PUFA biosynthesis pathway of copepod *A. royi*.

Keywords: Copepod, Desaturase, Polyunsaturated fatty acids (PUFA)

คำนำ

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของไทยมีความสำคัญอย่างมากทั้งแง่การส่งออกและการบริโภค เนื่องจากปัจจุบันมีการบริโภคอาหารทะเลเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความต้องการอาหารทะเลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ต้องมีการพัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่การอนุบาลลูกสัตว์น้ำวัยอ่อนเป็นปัญหาคอขวดที่สำคัญต่อการเพิ่มผลผลิต เนื่องจากอาหารอนุบาลลูกสัตว์น้ำวัยอ่อนที่ใช้อยู่ปัจจุบัน เช่น โรติเฟออร์ และอาร์ทีเมีย มีคุณค่าทางโภชนาการกรดไขมันโอเมกา-3 ที่ต่ำมาก และยังส่งผลให้ลูกสัตว์น้ำวัยอ่อนมีอัตราการรอดชีวิตต่ำ

โคพีพอดเป็นหนึ่งในอาหารธรรมชาติที่มีความสำคัญได้แก่การอนุบาลลูกพันธุ์สัตว์น้ำ โคพีพอดจัดเป็นแพลงก์ตอนสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน มีวงจรชีวิตสั้น ประกอบด้วย 3 ระยะ ตัวอ่อนระยะนอพลีซิส ระยะวัยรุ่นโคพีพอดิต และระยะตัวเต็มวัย โคพีพอดไซโคลพอยด์ *Apocyclops royi* เป็นชนิดที่พบในประเทศไทย สามารถเพาะเลี้ยงได้ มีขนาดเล็ก และมีวงจรชีวิตสั้น (ปวีณา และคณะ, 2563) นอกจากนี้ความโดดเด่นของขนาดตัวที่เล็กเหมาะสมกับขนาดของปากสัตว์น้ำวัยอ่อน และยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โคพีพอดสามารถผลิตกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated fatty acids หรือ PUFAs) โดยเฉพาะ docosahexaenoic acid (DHA; C22:6n-3) และ eicosapentaenoic acid (EPA; C20:5n-3) ได้ โดยโคพีพอดมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นอาหารมีชีวิตสำหรับสัตว์น้ำวัยอ่อน เพื่อรองรับอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ถึงแม้ว่าโคพีพอดจะมีความสำคัญต่อการเป็นอาหารมีชีวิตของสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยสามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และอัตราการรอดของสัตว์น้ำวัยอ่อนหลายชนิดทั้งลูกปลาและลูกกุ้ง (พงศธร, 2558) อย่างไรก็ตามการใช้โคพีพอดในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำยังขาดความเข้าใจทางด้านชีววิทยาโมเลกุลของโคพีพอด

ปัจจุบันได้มีการงานการศึกษาจีโนมและทรานสคริปโตมของโคพีพอด *A. royi* โดยมีขนาดประมาณของจีโนมเท่ากับ 450 Mb (Jørgensen et al., 2019) ต่อมาได้มีการค้นพบยีนในกลุ่ม fatty acid elongase (ELO) และ fatty acid desaturase (FAD) จำนวน 4 ยีน (Elov14, Elov15, Fad Δ5 และ Fad Δ6) ที่คาดว่าเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดไขมันจำเป็นในกลุ่มโอเมกา-3 (Nielsen et al., 2019) โดยกลไกการสร้างกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (PUFA) ของสิ่งมีชีวิตเป็นกลไกที่ซับซ้อนและประกอบด้วยเอนไซม์หลักหลายชนิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจุบันยังขาดข้อมูลกลไกการสังเคราะห์ PUFA ของโคพีพอด การศึกษาการสังเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอดมีความจำเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาการเพาะเลี้ยงโคพีพอดให้มีคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ออนุบาลลูกสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยโคพีพอดจะใช้เอนไซม์ดีแซตทูเรส (FAD) ในการสังเคราะห์กรดไขมันจำเป็นในกลุ่ม PUFA ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเติมพันธะคู่เข้าที่ตำแหน่งจำเพาะบนสายเอซิลของกรดไขมัน ดังนั้นการศึกษายีนดีแซตทูเรสที่แสดงออกในแต่ละระยะพัฒนาการของโคพีพอดจะช่วยบ่งบอกแนวทางการทำงานของเอนไซม์ดีแซตทูเรสที่มีความสำคัญในแต่ละระยะ ซึ่งจะนำไปสู่การเลือกใช้สับสเตรทจากสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงโคพีพอด ที่จะนำไปสู่การจัดการการเพาะเลี้ยงโคพีพอดให้มีคุณค่าทางโภชนาการมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมัน และการแสดงออกของยีน methyl-end desaturases (ArO3D-1 และ ArO3D-2) เป็นยีนที่น่าจะเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอด ซึ่งข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยจะช่วยให้สามารถเข้าใจความสัมพันธ์ของการแสดงออกของยีนในกลุ่มการสังเคราะห์กรดไขมันของโคพีพอดต่อองค์ประกอบของกรดไขมันในโคพีพอด เพื่อใช้ในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงโคพีพอดเชิงพาณิชย์ของไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเลี้ยงสาหร่ายและโคพีพอดเพื่อเก็บตัวอย่าง

ทำการเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย *Tetraselmis* sp. ในอาหารสูตรกิลลาร์ด F/2 (Guillard, 1973) ที่เตรียมจากน้ำทะเลความเค็ม 25 ppt ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ทำการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25°C ในอากาศและแสงโดยใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ตลอดเวลา ทำการเลี้ยงเป็นเวลา 7 วัน และนำสาหร่ายมาเลี้ยงโคพีพอด *A. royi* เป็นเวลา 15 วัน ในน้ำทะเลที่มีความเค็ม 25 ppt เก็บตัวอย่างโคพีพอดแต่ละระยะพัฒนาการ (นอเพลียส โคพีพอดิด และ ตัวเต็มวัย) โดยใช้ผ้ากรองไมครอนที่มีขนาดรูผ้า (Pore size) 33, 180 และ 300 ไมโครเมตร เพื่อแยกโคพีพอดแต่ละระยะ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นล้างโคพีพอด แช่แข็งในตู้ -80°C เพื่อวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันในแต่ละระยะพัฒนาการของโคพีพอด *A. royi*

ทำการเลี้ยงโคพีพอด *A. royi* ในน้ำทะเลความเค็ม 25 ppt โดยให้สาหร่าย *Tetraselmis* sp. เป็นอาหารเป็นเวลา 15 วัน จากนั้นทำการแยกระยะโคพีพอด ได้แก่ ตัวเต็มวัย (AD), โคพีพอดิด (CD) และนอเพลียส (NP) ด้วยผ้ากรองขนาด 300, 180 และ 33 ไมโครเมตร ตามลำดับ ทำการล้างโคพีพอดในน้ำทะเลความเค็ม 25 ppt อย่างน้อย 2 ครั้ง จากนั้นนำตัวอย่างโคพีพอดไปวิเคราะห์หาชนิดและสัดส่วนของกรดไขมันด้วยเทคนิควิเคราะห์ GC/MS analysis วิเคราะห์ผลโดยการทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม SPSS

การค้นหาลำดับยีน methyl-end desaturases (ArO3D-1 และ ArO3D-2)

ค้นหาข้อมูลของยีน ArO3D-1 (GenBank accession number: GHAJ01031023) และ ArO3D-2 (GHAJ01060007) จากฐานข้อมูลทรานสคริปโตมของโคพีพอด *A. royi* วิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ และลำดับกรดอะมิโนของยีนด้วยโปรแกรม Expasy (<https://www.expasy.org>) ทำนายโดเมนของโปรตีนด้วยโปรแกรม SMART (<http://smart.embl-heidelberg.de>) เปรียบเทียบความเหมือนกับยีนที่รายงานในฐานข้อมูล GenBank โดยใช้โปรแกรม BLASTP (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) และทำ Sequence alignment โดยใช้โปรแกรม Clustal Omega (<https://www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalo/>)

การสกัด RNA และเตรียม cDNA

ทำการสกัด total RNA จากทั้งสามระยะของโคพีพอด *A. royi* (กลุ่มตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) ที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis* sp. ด้วยชุดสกัดอาร์เอ็นเอ TRIzol™ Reagent ทำการย่อยดีเอ็นเอที่เจือปนออกด้วยเอนไซม์ DNase I วิเคราะห์ความเข้มข้นและตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่าง RNA ด้วยเครื่อง Nano Drop 2000 (Thermo Scientific) และสังเคราะห์ cDNA โดยใช้ ImProm-II™ Reverse Transcription System Kit (Promega) เพื่อนำมาใช้ในปฏิกิริยา RT-PCR

การวิเคราะห์การแสดงออกของยีน

ทำการออกแบบไพรเมอร์ให้จำเพาะกับยีน ArO3D-1 (F: AGGGTGAGGATGTTCCCTTGGTA และ R: TCATTGCACTTCCTCACAAGGT) และ ArO3D-2 (F: ACGAGATCTTCTACCCCGTGAG และ R: CCCAAGATAAGTCCA

AGCCAAG) โดยใช้โปรแกรม Primer3Plus ตรวจสอบการแสดงออกของยีน โดยใช้ cDNA ของโคพีพอดทั้ง 3 ระยะการพัฒนากการ (ระยะนอนเพเลียส ระยะโคพีโพติค และระยะตัวเต็มวัย) ที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis* sp. ด้วยเทคนิค Semi-quantitative RT-PCR โดยใช้โปรแกรมดังนี้ 94°C 1 นาที ตามด้วย 25 รอบ ของ 94°C 30 วินาที, 55°C 30 วินาที และ 72°C 30 วินาที และทำยสุดท้ายที่ 72°C 5 นาที ขั้นตอนต่อไปนำ PCR product ที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้ 1.8% Agarose gel ย้อมด้วย Ethidium bromide (EtBr) นำแผ่นเจลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gel documentation ร่วมกับโปรแกรม GeneSys จะได้แถบของยีน จากนั้นนำแถบที่ได้ไปวัดค่าการแสดงออกของยีน (mRNA expression) ด้วยโปรแกรม Gel Pro 3.1 simple analysis และคำนวณค่าการแสดงออกของยีน (Relative mRNA expression) โดยใช้ Elongation factor 1- α (F: GTGTTGGACAAGCTGAAGTC และ R: GGTCCAGTGATCATGTTCTTGATG) เป็นยีนควบคุม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อเปรียบเทียบการแสดงออกของยีนในโคพีพอดแต่ละระยะ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์กรดไขมันในโคพีพอด *A. royi* ที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis* sp.

จากการศึกษาปริมาณของกรดไขมันของโคพีพอด *A. royi* ทั้ง 3 ระยะที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis* sp. ด้วยวิธี GC/MS พบปริมาณของ PUFA ของโคพีพอด *A. royi* ในระยะนอนเพเลียส (NP), ระยะโคพีโพติค (CD) และระยะตัวเต็มวัย (AD) มีค่าเท่ากับ 22.5%, 37.59% และ 42.0% ตามลำดับ โดยปริมาณของ PUFA ในโคพีพอดมีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ในโคพีพอด *A. dengizicus* ที่เลี้ยงด้วย *Tetraselmis tetrahele* พบว่ามีปริมาณของ PUFA (37.56%) (Farhadian et al., 2009) โดยทั้งสามระยะพัฒนากการของโคพีพอดพบว่ามี LC-PUFA อยู่ในปริมาณที่สูง เท่ากับ 5.27%, 9.43% และ 10.51% ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ค่าของกรดไขมันโอเมกา-3 ในโคพีพอดทั้ง 3 ระยะ พบว่า มีค่าเท่ากับ 15.58%, 25.25% และ 26.64% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบกรดไขมัน DHA (C22:6 n-3) ในโคพีพอดทั้ง 3 ระยะ โดยใน ระยะตัวเต็มวัย (AD) พบมากที่สุด (4.85%) รองลงมาคือระยะวัยรุ่นโคพีโพติค (CD) (4.23%) และระยะตัวอ่อนนอนเพเลียส (NP) (2.78%) ในขณะที่กรดไขมันโอเมกา-6 ของโคพีพอดทั้ง 3 ระยะ มีปริมาณ 6.92%, 12.34% และ 15.36% ตามลำดับ โดยพบกรดไขมัน ARA (C20:4 n-6) ในโคพีพอดระยะวัยรุ่นโคพีโพติค (CD) (1.11%) และระยะ ตัวเต็มวัย (AD) (1.31%) แต่ไม่พบในโคพีพอดระยะตัวอ่อนนอนเพเลียส (NP) แสดงดัง Table 1

Table 1 Fatty acid analysis in the three developmental stages (nauplius; NP), copepodid; CD, and adult; AD) of the cyclopoid copepod *A. royi* fed with *Tetraselmis* sp.

Fatty acids	Copepod <i>Apocyclops royi</i>		
	NP	CD	AD
n-3 PUFA			
C18:3 n-3 (ALA)	10.31±6.04	17.14±0.53	18.10±3.01
C20:3 n-3	Not detect	0.79±0.21	1.15±0.10
C20:5 n-3 (EPA)	2.50±0.19	3.10±0.76	2.55±0.08
C22:6 n-3 (DHA)	2.78±0.01 ^a	4.23±0.49 ^{a,b}	4.85±0.88 ^b
n-6 PUFA			
C18:2 n-6 cis (LA)	6.92±0.72 ^a	10.47±2.55 ^{a,b}	12.81±0.55 ^b
C18:3 n-6	n.d.	0.56±0.02	0.59±0.06
C20:2 n-6	n.d.	n.d.	0.39±0.13
C20:3 n-6	n.d.	0.21±0.00 ^a	0.27±0.01 ^b
C20:4 n-6 (ARA)	n.d.	1.11±0.42	1.31±0.19
∑SC_PUFA	17.23±6.76	28.16±2.04	31.49±3.62
∑LC_PUFA	5.27±0.20 ^a	9.43±0.35 ^b	10.51±1.01 ^b
∑n-3 PUFA	15.58±5.84	25.25±0.59	26.64±2.31
∑n-6 PUFA	6.92±0.72 ^a	12.34±2.98 ^{a,b}	15.36±0.30 ^b
∑PUFA	22.50±6.56 ^a	37.59±2.39 ^b	42.00±2.61 ^b

Note: Data represents the mean±standard deviation of triplicate samples. Means with different lowercase letter (shown above) are significantly different ($p < 0.05$; one-way ANOVA with Duncan's multiple range tests). n.d.= Not detected.

การศึกษา ยีน และการแสดงออกของยีน *ArO3D-1* และ *ArO3D-2* ของโคพีพอด *A. royi*

ผลจากการวิเคราะห์ยีนในกลุ่ม methyl-end desaturases ของโคพีพอด *A. royi* ค้นพบยีนจำนวน 2 ยีน ประกอบด้วย *ArO3D-1* และ *ArO3D-2* เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าทั้ง 2 ยีนเป็นยีนใหม่ที่ยังไม่มีรายงานในโคพีพอด *A. royi* (Nielsen et al., 2019) ซึ่งได้รายงานการค้นพบยีนจำนวน 4 ยีน ในกลุ่ม fatty acid elongase (ELO) และ fatty acid desaturase (FAD) ที่คาดว่าเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดไขมันจำเป็นในกลุ่มโอเมกา-3 (Nielsen et al., 2019) ผลจากการวิเคราะห์ยีน *ArO3D-1* และ *ArO3D-2* ในโคพีพอด *A. royi* พบว่าประกอบด้วย Open reading frame (ORF) ขนาด 1,149 และ 1,233 คู่เบส สามารถแปลรหัสได้เป็นโปรตีนขนาด 382 และ 410 กรดอะมิโน ตามลำดับ จากการวิเคราะห์หาโดเมนที่มีความสำคัญด้วยโปรแกรม SMART พบว่า *ArO3D-1* และ *ArO3D-2* ประกอบด้วย FAD domain จำนวน 1 โดเมน แสดงใน Fig. 1 ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติเฉพาะสำคัญของเอนไซม์ FAD เหมือนกับการรายงานการศึกษาลักษณะสมบัติของยีน FAD ในโคพีพอดชนิดอื่นๆ (Nielsen et al., 2019; Kabeya et al., 2021) ผลจากการเปรียบเทียบความเหมือนกับยีนที่มีรายงานในฐานข้อมูล (GenBank) ด้วยโปรแกรม BLASTP พบว่ายีน *ArO3D-1* และ *ArO3D-2* มีความ

เหมือนกับยีน methyl-end desaturase-1 (O3D-1) และ methyl-end desaturase-2 (O3D-2) ของโคพีพอด *Tigriopus californicus* โดยมีค่าความเหมือนเท่ากับ 72% และ 73% ตามลำดับ จากรายงานของ Kabeya et al. (2021) พบว่ายีน O3D-1 อยู่ในกลุ่ม methyl-end desaturase ที่มี $\Delta 12$, $\Delta 15$ และ $\Delta 17$ desaturase activity ในขณะที่ยีน O3D-2 อยู่ในกลุ่ม methyl-end desaturase ที่มี $\Delta 15$, $\Delta 17$ และ $\Delta 19$ desaturase activity (Kabeya et al., 2021)

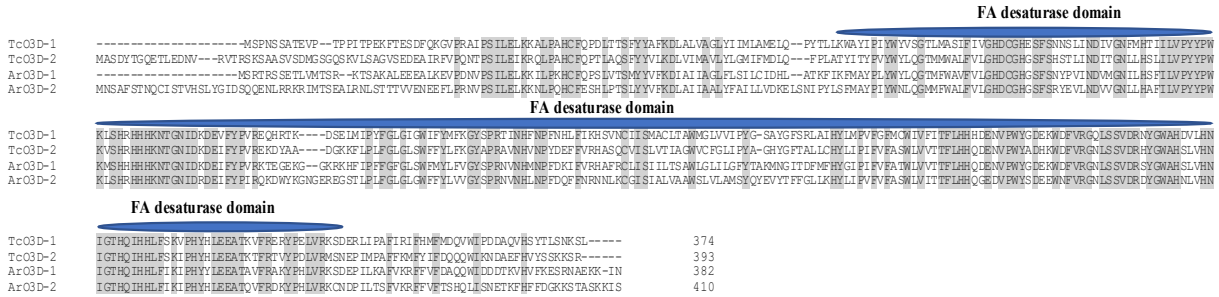


Fig. 1 Multiple alignment of deduced amino acid sequence of methyl-end desaturases (ArO3D-1 and ArO3D-2) of copepod *A. royi* with TcO3D-1 and TcO3D-2 of copepod *T. californicus*

Note: Gray highlights indicate complete conservation in two species of copepod

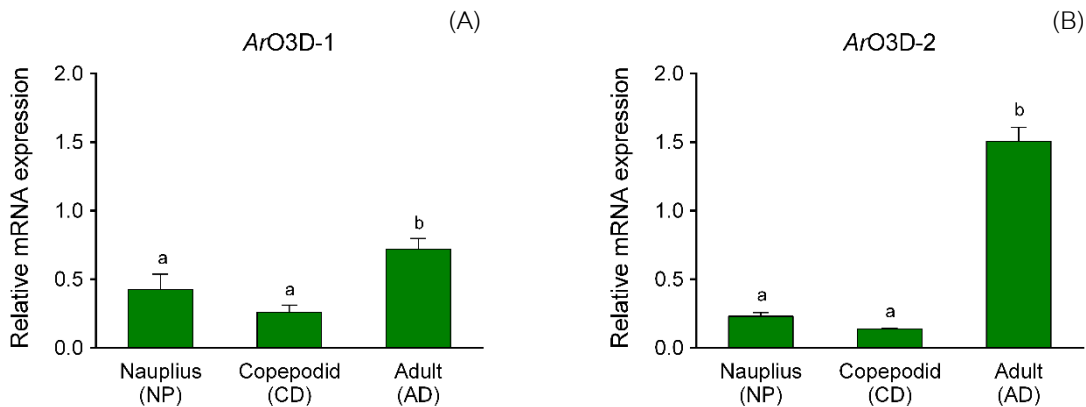


Fig. 2 Gene expression analysis of ArO3D-1(A) and ArO3D-2(B) mRNA in various developmental stages of copepod *A. royi*

Note: The expression profile from the nauplius (NP), copepodid (CD), and adult (AD) developmental stages were analyzed by semi-quantitative RT-PCR analysis. The elongation factor 1- α (EF1 α) served as an internal control in all analyzes. Data represents the mean \pm 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).

เมื่อทำการออกแบบไพรเมอร์ที่จำเพาะกับยีน ArO3D-1 และ ArO3D-2 เพื่อตรวจสอบการแสดงออกของยีนในแต่ละระยะพัฒนาการของโคพีพอด *A. royi*-TH ด้วยเทคนิค Semi-quantitative RT-PCR โดยใช้ยีน elongation factor 1- α (EF1 α) เป็นยีนควบคุม ผลการศึกษพบว่า ยีน ArO3D-1 และ ArO3D-2 มีการแสดงออกที่สูงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระยะตัวเต็มวัย (AD) ของโคพีพอด *A. royi* เมื่อเทียบกับระยะหอยเพ็ลลีส (NP) และระยะโคพีพอด (CD) ดัง

แสดงใน Fig. 2(A) และ Fig. 2(B) ตามลำดับ จากรายงานการศึกษาของ Lenz et al. (2014) ค้นพบว่ายีน delta-9 desaturase (D9D) ของโคพีพอด *Calanus finmarchicus* มีการแสดงออกที่สูงในระยะเวลา CD เมื่อเทียบกับระยะ AD (ตัวเต็มวัยเพศเมีย) อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์พบว่า D9D เป็นเอนไซม์ที่สร้างกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่เดี่ยว (monounsaturated fatty acid: MUFA) โดยทำหน้าที่แตกต่างจากกลุ่มของเอนไซม์ O3D ที่ทำหน้าที่สร้างกรดไขมัน PUFA เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กรดไขมันพบว่าการแสดงออกของยีน ArO3D-1 และ ArO3D-2 ในระยะ AD (แสดงออกสูง) และ ระยะ NP (แสดงออกน้อย) มีความสอดคล้องกับปริมาณของ PUFA โดยมีค่าเท่ากับ 42.0% (AD) และ 22.5% (NP) ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงบทบาทของยีนทั้งสองในการสังเคราะห์ PUFA อย่างไรก็ตามการศึกษาขั้นต่อไปในเชิงลึกของการทำงานของ ArO3D-1 และ ArO3D-2 จะทำให้ทราบหน้าที่ของยีนทั้งสองในการสังเคราะห์กรดไขมัน PUFA ในโคพีพอด *A. royi* มากยิ่งขึ้น

สรุป

ผลจากการศึกษาวิจัยประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันและค้นพบยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนของโคพีพอด *A. royi* สายพันธุ์ไทย พบว่าโคพีพอดที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis* sp. ทั้ง 3 ระยะ ได้แก่ ระยะนอพลีซิส (NP), ระยะโคพีพอดิต (CD) และระยะตัวเต็มวัย (AD) พบว่ามี LC-PUFA อยู่ในปริมาณที่สูง 5.27%, 9.43% และ 10.51% ตามลำดับ และได้ค้นพบยีนใหม่ 2 ยีน ได้แก่ ArO3D-1 และ ArO3D-2 พบว่ามีการแสดงออกเพิ่มสูงขึ้นในระยะตัวเต็มวัย แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 ยีน อาจทำหน้าที่ในวิถีการสังเคราะห์กรดไขมัน PUFA ของโคพีพอด *A. royi* ซึ่งข้อมูลในเชิงลึกที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาการเพาะเลี้ยงโคพีพอดเชิงพาณิชย์ของไทยในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (P2050332), สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (สัญญาเลขที่ วช.อว.(อ)(ภส)/49/2564) และกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สัญญาเลขที่ RCU_F_64_004_23)

เอกสารอ้างอิง

- ปวีณา ตปนีวรวงษ์, อภิญญา อยู่สบาย, ปรรธนา ปานทอง, ปาริชาติ ชุมทอง, จันทรจรัส วัฒนะโชติ, มะลิวัลย์ คุตะโค. 2563. องค์ประกอบของกรดไขมันของไซโคลพอยด์โคพีพอด *Apocyclops royi* ที่เลี้ยงด้วยสาหร่ายชนิดแตกต่างกัน. วารสารแก่นเกษตร 48: 101–108.
- พงศธร จันทรรัตน์. 2558. การเพาะเลี้ยงโคพีพอดเพื่อการอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนในโรงเพาะฟัก. วารสารเกษตร 32: 225–239.
- Farhadian, O., Yuso, F.M., Mohamed, S. 2009. Nutritional values of *Apocyclops dengizicus* (Copepoda: Cyclopoida) fed *Chaetoceros calcitrans* and *Tetraselmis tetraathele*. Aquac. Res. 40: 74–82.
- Guillard, R.R.L. 1973. Culture methods and growth measurements. Cambridge University Press. New York, NY, USA.

- Jørgensen, T.S., Nielsen, B.L.H., Petersen, B., Browne, P.D., Hansen, B.W., Hansen, L.H. 2019. The whole genome sequence and mRNA transcriptome of the tropical cyclopoid copepod *Apocyclops royi*. G3-Genes Genom Genet. 9, 1295–1302.
- Kabeya, N., Ogino, M., Ushio, H., Haga, Y., Satoh, S., Navarro, J.C., Monroig, Ó. 2021. A complete enzymatic capacity for biosynthesis of docosahexaenoic acid (DHA, 22: 6n–3) exists in the marine Harpacticoida copepod *Tigriopus californicus*. Open Biol. 11, 200402.
- Lenz, P.H., Roncalli, V., Hassett, R.P., Wu, L.S., Cieslak, M.C., Hartline, D.K., Christie, A.E. 2014. De novo assembly of a Transcriptome for *Calanus finmarchicus* (Crustacea, Copepoda) – the dominant zooplankter of the North Atlantic Ocean. PLoS One 9, e88589.
- 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.

เปรียบเทียบฤทธิ์ในการฆ่าแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027 ด้วยพลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จและเครื่องกำเนิดไอออนประจุลบ

Comparative bactericidal activities against *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027 by Dielectric-barrier discharge (DBD) plasma and negative ion generator

ตันติกร เหล่าสุข^a, นฤสมณ์ แน่นหนา^a, บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง^c, ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์^b, ธนาภัทร ปาลกะ^{b,*}

Tuntikorn Laosuk^a, Naruesorn Nanna^a, Boonchoat Paosawatyanong^c, Sirirat Rengpipat^b, Tanapat Palaga^{b,*}

^aหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตเพื่ออุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^bภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^cภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^aProgram in Science for Industry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

^bDepartment of Microbiology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

^cDepartment of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: tanapat.p@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบฤทธิ์ในการฆ่าแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027 บนอาหารแข็งชนิด Luria Bertani (LB) ด้วยพลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric-barrier discharge; DBD) และเครื่องกำเนิดไอออนประจุลบ (negative ion generator) โดยใช้วิธีการนับโคโลนี (plate count method) หลังจากเลี้ยง *P. aeruginosa* ในอาหารเหลว LB broth ที่ 37°C เป็นเวลา 3 ชม นำเชื้อมาทำเจือจาง 10 เท่าให้ถึงระดับ 10⁻⁶ หยดสารแขวนลอยแบคทีเรีย 100 µl ลงบนจานอาหารแข็งชนิด LB และเกลี่ยให้ทั่วจานอาหารเพาะเชื้อ การทดลองประกอบด้วย ชุดควบคุม ชุดที่สัมผัสพลาสมาชนิด DBD และชุดที่สัมผัส negative ion generator เวลาที่ใช้ในการสัมผัสคือ 1 ชั่วโมง นำจานเลี้ยงเชื้อทั้งหมดไปบ่มที่ 37°C ซ้ำมคืน จากการประเมินผลการทดลองซ้ำสามครั้งในแต่ละภาวะ พบว่าพลาสมาชนิด DBD มีประสิทธิภาพในการฆ่า *P. aeruginosa* 99.18±1.41% ซึ่งมากกว่าการฆ่าด้วย negative ion generator ที่มีเพียง 1.42±8.26% และพลาสมาชนิด DBD ยังมีประสิทธิภาพในการฆ่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุมที่ $p < 0.01$ ผลที่ได้จากการงานวิจัยนี้บ่งชี้ถึงศักยภาพในการนำพลาสมาชนิด DBD ไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการกำจัดแบคทีเรียได้

คำสำคัญ: ฤทธิ์ในการฆ่าแบคทีเรีย, พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ, เครื่องกำเนิดไอออนประจุลบ

Abstract

This research aims to compare bactericidal activities against *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027 on Luria Bertani (LB) agar by Dielectric-barrier discharge (DBD) Plasma and negative ion generator. The experiment was performed by the plate count method. After *P. aeruginosa* was cultured in LB broth at 37°C for 3 hr, the culture was diluted 10-fold to 10⁻⁶, and bacterial suspension 100 µl was dropped and spread evenly on LB agar. The study was divided into 3 groups: the control group, the DBD plasma exposure for 1 hr, and the negative ion generator exposure for 1 hr. All plates, in triplicate for individual condition were then incubated overnight at 37°C. The results showed that DBD plasma with the antibacterial activities of 99.18±1.41% was more effective than the negative ion generator with antibacterial activities only 1.42±8.26%. The DBD plasma is significantly effective than those of the control at $p < 0.01$. These results indicate the applicable potential to use the DBD plasma in the field that requires eliminating bacteria.

Keywords: Bactericidal activity, Dielectric-barrier discharge (DBD) plasma, Negative ion generator

คำนำ

จุลินทรีย์เป็นสาเหตุของโรคติดเชื้อและก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการแพร่ระบาดของโรคได้ ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคที่หลากหลายทั้งบนพื้นผิว และในอากาศ ซึ่งหนึ่งในเทคนิคนั้นคือ การใช้พลาสมาชนิด Dielectric-barrier discharge (DBD) ซึ่งพลาสมาที่สร้างขึ้นเกิดสถานะพลาสมาบริเวณขอบของขั้วอิเล็กโทรด โดยจะปล่อยประจุไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งทำปฏิกิริยากับโมเลกุลในอากาศทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระชนิด Reactive Oxygen Species (ROS) และชนิด Reactive Nitrogen Species (RNS) (Pai et al., 2018) ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในด้านการแพทย์ ทันตกรรม การเกษตร อุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม (Sakudo et al., 2019) และอีกหนึ่งเทคโนโลยีก็ได้รับความสนใจ คือ negative ion generator ที่มีการปล่อยอิเล็กตรอนออกมาผ่านคาร์บอนแบล็ก (carbon black) ไปสู่อากาศ โดยมีรายงานว่าสามารถลดปริมาณของ *Serratia marcescens* และ *Staphylococcus epidermidis* ในลักษณะที่แพร่กระจายทางอากาศได้ (airborne) (Zhou et al., 2018) แต่ยังไม่มียางานการกำจัดเชื้อบนพื้นผิว ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ จะเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร หรือในการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนที่ต้องการความสามารถในการกำจัดเชื้อ โดย *P. aeruginosa* เป็นแบคทีเรียแกรมลบที่พบได้ในธรรมชาติ เช่น ดิน น้ำ และพืชพรรณต่างๆ ซึ่งมีความสามารถในการก่อโรคติดเชื้อที่ทางเดินระบบหายใจ (Wu and Li, 2015) และยังเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคเน่าในผลไม้ (fruit rot disease) ซึ่งส่งผลกระทบต่อเกษตรกร (Mondal et al., 2012)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบฤทธิ์ในการฆ่าแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027 บนอาหารแข็งชนิด LB ด้วยพลาสมาชนิด DBD และ negative ion generator โดยใช้วิธีการนับโคโลนี (plate count method)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเชื้อ *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027

ในการทดลองนี้ใช้ *P. aeruginosa* ATCC9027 ที่ได้รับความอนุเคราะห์ และดำเนินการปฏิบัติงานในตู้ชีวนิรภัย Biosafety cabinet Type II A ในห้องวิจัยระดับ Biosafety level II ของภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และผู้วิจัยผ่านการอบรมด้านความปลอดภัยทางชีวภาพและการรักษาความปลอดภัยทางชีวภาพ และสอบผ่านได้รับประกาศนียบัตรเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2563 สามารถปฏิบัติงานกับจุลินทรีย์กลุ่มเสี่ยง 2 ได้ถึง 15 ตุลาคม 2566

นำโคโลนี *P. aeruginosa* ATCC9027 ไปเลี้ยงในอาหารเหลวชนิด LB ที่อุณหภูมิ 37°C อัตราความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Dijksteel et al., 2020) จนได้ค่า Optical Density 600 nm (OD₆₀₀) เท่ากับ 0.05–0.06 นำมาเจือจางด้วยวิธีเจือจาง 10 เท่า ใน 0.85% โซเดียมคลอไรด์ จนถึงที่ระดับการเจือจาง 10⁶ และดูด 100 µl นำมาเกลี่ยเชื้อลงบนอาหารแข็งชนิด LB ทั้งหมด 3 ซ้ำต่อหนึ่งภาวะ โดยแบ่งเป็นจานอาหารเพาะเชื้อที่ใช้เป็นชุดควบคุม ชุดทดสอบ โดยการสัมผัสกับพลาสมาชนิด DBD และชุดทดสอบกับ negative ion generator

การติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบ

พลาสมาชนิด DBD

ติดตั้งเครื่องพลาสมาชนิด DBD กำลังไฟ 15 W ขนาดขั้วอิเล็กโทรดกว้าง×ยาว เท่ากับ 2×2 เซนติเมตร โดยติดตั้งเข้ากับกล่องอะคริลิก กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 14×9.5×4.5 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างจากขั้วอิเล็กโทรดจนถึงจานอาหารเพาะเชื้อ 4 เซนติเมตร โดยก่อนทำการทดลองทำความสะอาดกล่องอะคริลิกด้วยแอลกอฮอล์ 70% และฆ่าเชื้อด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต 15 นาที และนำมาครอบจานเลี้ยงแบคทีเรีย *P. aeruginosa* ที่ spread plate ลงบนอาหารแข็งชนิด

LB ระดับเจือจาง 10^{-6} เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Choi et al., 2022) ดังแสดง Fig. 1(A) โดยขณะทดลองอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25.0–26.0°C จากนั้นนำไปบ่มอุณหภูมิ 37°C ซ้ำมคืน

Negative ion generator

ติดตั้งเครื่อง negative ion generator กำลังไฟ 1 W ที่ประกอบด้วยคาร์บอนแบล็ก (carbon black) เข้ากับกล่องอะคริลิกขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 14×9.5×7 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างจากปลายคาร์บอนแบล็กจนถึงจานเลี้ยงเชื้อ 4 เซนติเมตร โดยก่อนทำการทดลองทำความสะอาดกล่องอะคริลิกด้วยแอลกอฮอล์ 70% และฆ่าเชื้อด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต 15 นาที และนำมาครอบจานเลี้ยง *P. aeruginosa* ที่เกลี่ยเชื้อลงบนอาหารแข็งชนิด LB ระดับเจือจาง 10^{-6} เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยขณะทดลองอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25.0–26.0°C จากนั้นนำไปบ่มอุณหภูมิ 37°C ซ้ำมคืน (Fig. 1B)

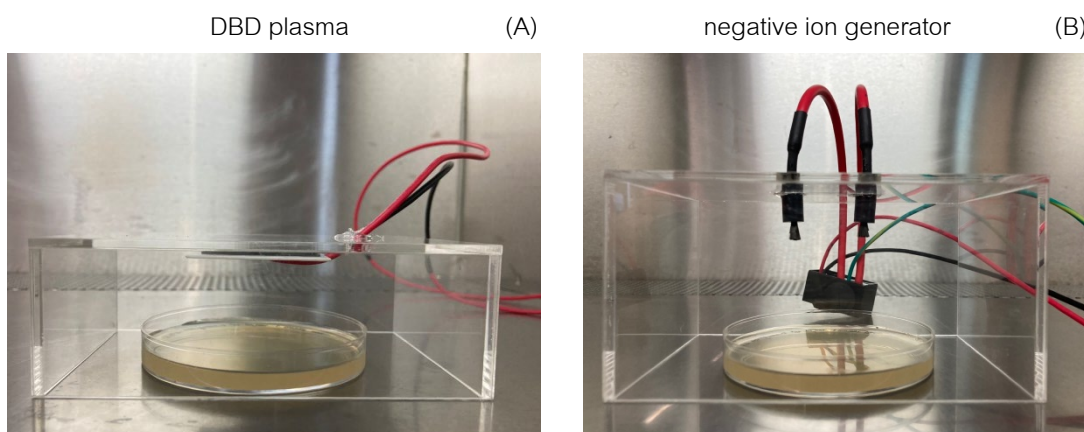


Fig. 1 Experiment set up: (A) DBD plasma with acrylic box width (W)×depth (D)×height (H) = 14×9.5×4.5 cm; (B) negative ion generator with acrylic box W×D×H = 14×9.5×7 cm with *P. aeruginosa* (10^{-6} diluted suspension) on LB agar

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel 365 ในการคำนวณหาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองโดยใช้ One-way analysis of variance (ANOVA) Post-hoc Bonferroni และใช้ t-test : Two-sample assuming equal variance ที่ความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฆ่า *P. aeruginosa* ATCC9027 บนอาหารแข็งชนิด LB ด้วยพลาสมาชนิด DBD และ negative ion generator โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยมีเงื่อนไขการทดลองแบ่งเป็น ชุดควบคุม ชุดที่สัมผัส negative ion generator และชุดที่สัมผัสกับพลาสมาชนิด DBD ร่วมกับ *P. aeruginosa* บนอาหารแข็งชนิด LB ที่ระดับเจือจาง 10^{-6} ใช้ เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงใน Fig. 2 ซึ่งจากผลการทดลองพบลักษณะของโคโลนีที่แตกต่างกันในจานเพาะเชื้อเดียวกัน แต่คาดว่าไม่ได้มาจากการปนเปื้อนเชื้ออื่นระหว่างการทดลอง เนื่องจากหลังนำจานเพาะเชื้อออกมาจากตู้บ่ม 1 ชั่วโมง โคโลนีของ *P. aeruginosa* เปลี่ยนสีเป็นสีเขียวทุกโคโลนี ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของ *P. aeruginosa* และได้ค่าเฉลี่ยโคโลนีจากการทำสามซ้ำของชุดควบคุม ชุดที่สัมผัส negative ion generator และชุดที่สัมผัสกับพลาสมาชนิด DBD เท่ากับ 239.67 ± 35.02 , 234.67 ± 21.57 และ 1.67 ± 2.89 โคโลนี ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบความแตกต่าง ตรวจสอบว่าในชุดควบคุมและชุดที่สัมผัสกับ negative ion generator ไม่มีความแตกต่างกัน

$p = 0.84$ ส่วนในชุดควบคุมและชุดที่สัมผัสกับพลาสมาชนิด DBD มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ดังแสดงใน Fig. 3

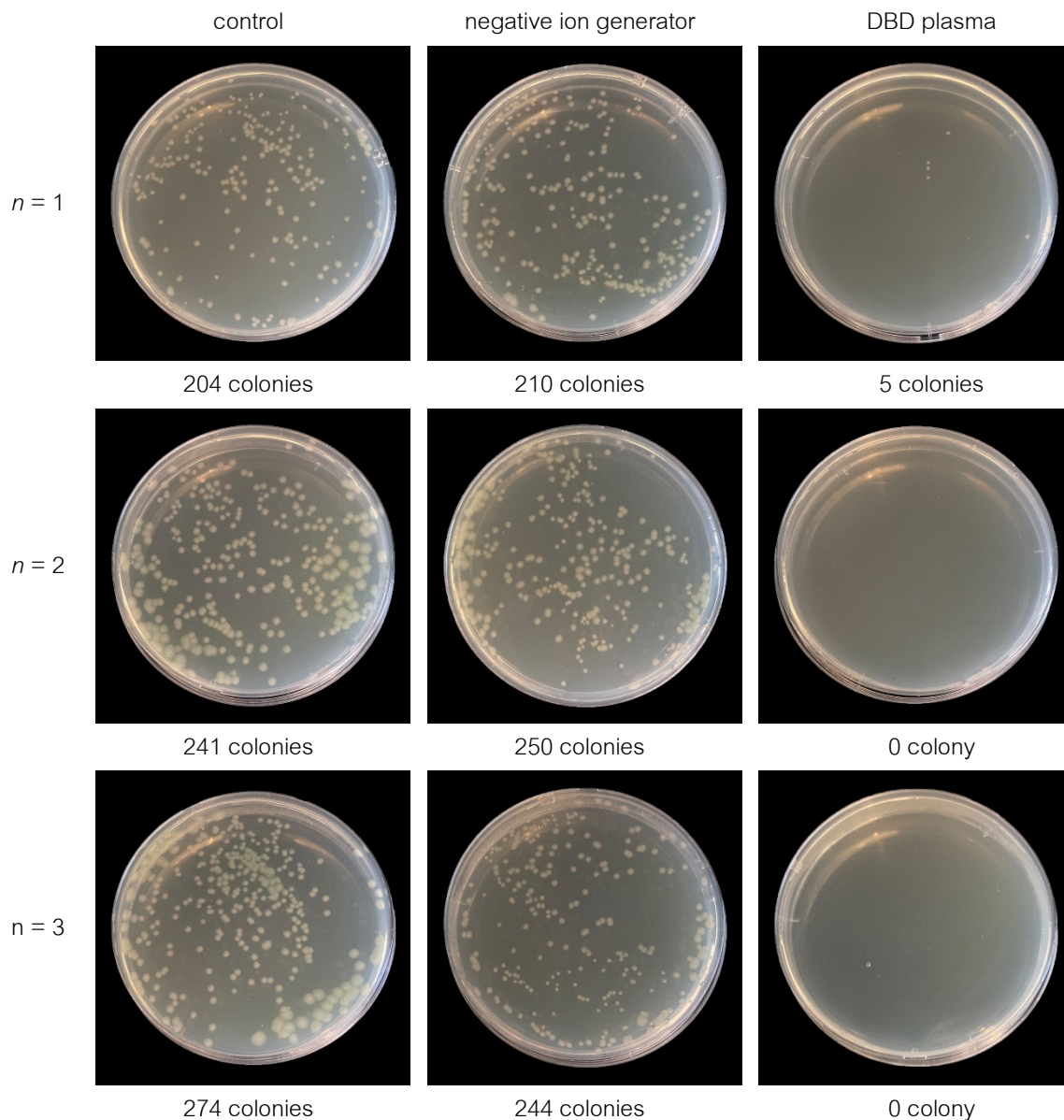


Fig. 2 The effect of the negative ion generator and DBD plasma on *Pseudomonas aeruginosa*

Note: *P. aeruginosa* at the 10^{-6} dilution was plated on LB agar before exposure to the negative ion generator and DBD plasma for 1 hr. Plates were incubated at 37°C for 18 hr. Colonies were counted at the following day. All experiments were performed in triplicate.

ผลที่ได้จากการทดลองนี้บ่งชี้ว่าหลังการสัมผัส พลาสมาชนิด DBD มีประสิทธิภาพในการฆ่าแบคทีเรีย *P. aeruginosa* ATCC9027 บนอาหารแข็งชนิด LB มากกว่า negative ion generator เนื่องจากพลาสมาชนิด DBD นั้นปล่อยอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานที่มากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน (ionization energy) ของอะตอม/โมเลกุลในอากาศส่งผลให้เกิดสถานะพลาสมา (plasma state) และเกิดเป็น ROS และ RNS ซึ่งต่างจาก negative ion generator ที่ปล่อยอิเล็กตรอนในพลังระดับต่ำกว่า แต่ก็ยังสามารถเกิด ROS ได้จากการให้และรับ

อิเล็กตรอนในโมเลกุลอากาศ จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อที่แตกต่างกัน นอกจากนี้พลาสมาชนิด DBD นั้นยังมีประสิทธิภาพฆ่าแบคทีเรียอื่นอีกเช่น *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* (Kostov et al., 2010) และยังมีประสิทธิภาพในการลดเซลล์มะเร็งปอด แต่ก็ส่งผลต่อเซลล์ปกติเช่นกันหลังสัมผัสพลาสมาชนิด DBD เป็นเวลา 1 นาที (Panngom et al., 2013) หากนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องฟอกอากาศ จะต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ และเป็นพิษต่อเซลล์มนุษย์น้อยที่สุด

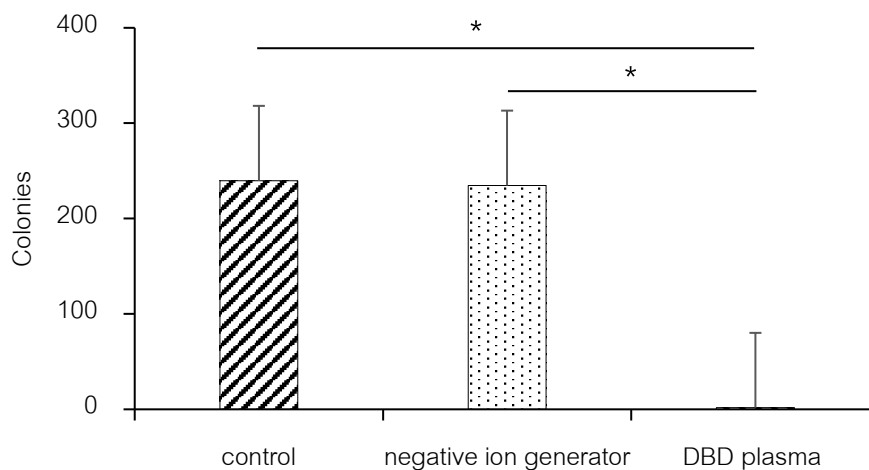


Fig. 3 The effect of the negative ion generator and DBD plasma on *P. aeruginosa*

Note: Average of 10^{-6} diluted *P. aeruginosa* suspension from the control, negative ion generator, and DBD plasma groups after overnight of incubation. Statistical analysis comparison using the Post-hoc Bonferroni by Students' t-test showed that the *P. aeruginosa* colonies after exposure to the DBD plasma decreased significantly from those of the control group at $*p < 0.01$. Whereas no significant difference of colonies number between those from negative ion generator exposure and the control group ($p = 0.84$).

สรุป

พลาสมาชนิด DBD มีประสิทธิภาพในการฆ่าแบคทีเรีย *P. aeruginosa* บนอาหารแข็งชนิด LB อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในขณะที่ negative ion generator แสดงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *P. aeruginosa* บนอาหารแข็งชนิด LB ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากชุดควบคุม ($p = 0.84$) จึงสรุปได้ว่าพลาสมาชนิด DBD มีประสิทธิภาพในการฆ่าแบคทีเรีย *P. aeruginosa* บนอาหารแข็งชนิด LB ได้ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านในโครงการ Sci-FI สมาชิก 2015 Lab และบริษัท บีทีวี่ส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำสำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Choi, M.-S., Jeon, E.B., Kim, J.Y., Choi, E. H., Lim, J.S., Choi, J., & Park, S.Y. 2022. Application of dielectric barrier discharge plasma for the reduction of non-pathogenic *Escherichia coli* and *E. coli* O157:H7 and the quality stability of fresh oysters (*Crassostrea gigas*). LWT-Food Sci. Technol. 154: 112698. doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112698
- Dijksteel, G.S., Ulrich, M.M.W., Vlig, M., Sobota, A., Middelkoop, E., Boekema, B.K.H.L. 2020. Safety and bactericidal efficacy of cold atmospheric plasma generated by a flexible surface Dielectric Barrier Discharge device against *Pseudomonas aeruginosa* in vitro and in vivo. Ann. Clin. Microbiol. 19: 37. doi.org/10.1186/s12941-020-00381-z
- Kostov, K.G., Rocha, V., Koga-Ito, C.Y., Matos, B.M., Algatti, M.A., Honda, R.Y., Kayama, M.E., Mota, R.P. 2010. Bacterial sterilization by a dielectric barrier discharge (DBD) in air. Surf. Coat. Technol. 204: 2954–2959. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.01.052
- Mondal, K., Mani, C., Singh, J., Dave, S., Tipre, D., Trivedi, B.M. 2012. Fruit rot of tinda caused by *Pseudomonas aeruginosa* –A New Report from India. Plant Dis. 96(1): 141. doi.org/10.1094/PDIS-05-11-0404
- Pai, K., Timmons, C., Roehm, K.D., Ngo, A., Narayanan, S.S., Ramachandran, A., Jacob, J.D., Ma, L.M., Madihally, S.V. (2018). Investigation of the roles of plasma species generated by surface dielectric barrier discharge. Sci. Rep. 8: 16674. doi.org/10.1038/s41598-018-35166-0
- Pannngom, K., Baik, K.Y., Nam, M.K., Han, J.H., Rhim, H., & Choi, E.H. 2013. Preferential killing of human lung cancer cell lines with mitochondrial dysfunction by nonthermal dielectric barrier discharge plasma. Cell Death Discov. 4: e642–e642. doi.org/10.1038/cddis.2013.168
- Sakudo, A., Yagy, Y., Onodera, T. 2019. Disinfection and sterilization using plasma technology: Fundamentals and future perspectives for biological applications. Int. J. Mol. Sci. 20(20): 5216. doi.org/10.3390/ijms20205216
- Wu, M., Li, X. 2015. Chapter 87 - *Klebsiella pneumoniae* and *Pseudomonas aeruginosa*. In Tang, Y.-W., Sussman, Liu, M.D., Poxton, I., Schwartzman, J. (Eds.). Molecular Medical Microbiology (2nd ed.). Academic Press. pp. 1547–1564.
- Zhou, P., Yang, Y., Huang, G., Lai, A.C.K. 2018. Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow. Build Environ. 127: 204–210. doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.006

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติและการแสดงออกของ crustacean hyperglycemic hormone (CHH)-like peptide ในโคพีพอด *Apocyclops royi*
 Characterization and expression analysis of crustacean hyperglycemic hormone (CHH)-like peptide in copepod *Apocyclops royi*

พัชรี โยควิบูน^{a,b}, วลัยพร เจริญทรัพย์ศรี^{a,b}, ปวีณา ตปนียวรวงษ์^{a,b}, ปาริชาติ ชุมทอง^{a,b}, ประรธนา ปานทอง^{a,b}, ปิติ อัมพารยัพ^{a,b,*}

Patchari Yocawibun^{a,b}, Walaiporn Charoensapsri^{a,b}, Paveena Tapaneeyaworawong^{a,b}, Parichat Chumtong^{a,b}, Prarthana Pantong^{a,b}, Piti Amparyup^{a,b,*}

^aทีมวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

^bศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^aMarine Biotechnology Research Team, National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), Pathum Thani 12120, Thailand

^bCenter of Excellence for Marine Biotechnology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: piti.amp@biotec.or.th

บทคัดย่อ

Crustacean hyperglycemic hormone (CHH) เป็นนิวโรเปปไทด์ที่ควบคุมสมดุลของพลังงานและกระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญในครัสเตเชียน เช่น เมแทบอลิซึมของไขมัน การลอกคราบ และการสืบพันธุ์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะสมบัติของยีน ArCHH-like ในโคพีพอด *Apocyclops royi* พบว่า ArCHH-like มีรูปแบบการจัดเรียงตัวของลำดับกรดอะมิโนคล้ายกับโปรตีนในกลุ่ม CHH และมีความคล้ายกับโปรตีน CHH-like ของโคพีพอด *Lepeophtheirus salmonis* 68% เมื่อวิเคราะห์การแสดงออกของยีนพบว่า ArCHH-like มีการแสดงออกในระยะตัวเต็มวัยสูงกว่าระยะนอเพเลียสและโคพีพอดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ArCHH-like อาจเป็นนิวโรเปปไทด์ที่มีบทบาทสำคัญในช่วงปลายของการเจริญพัฒนาของโคพีพอด *A. royi*

คำสำคัญ: โคพีพอด, นิวโรเปปไทด์, Crustacean hyperglycemic hormone

Abstract

Crustacean hyperglycemic hormone (CHH) is a neuropeptide that plays key roles in the regulation of energy balance and several important physiological processes in crustaceans such as lipid metabolism, molting, and reproduction. In this study, a CHH-like peptide, ArCHH-like, from the copepod *Apocyclops royi* was characterized. ArCHH-like contained characteristic sequence structure of the CHH protein family and exhibited 68% amino acid sequence similarity to a CHH-like protein of the copepod *Lepeophtheirus salmonis*. Gene expression analysis revealed that ArCHH-like transcript was significantly expressed at higher level in the adult stage as compared to the nauplius and copepodid stages. This finding suggests that ArCHH-like peptide may play a role in the later stages of *A. royi* development.

Keywords: Copepod, Crustacean hyperglycemic hormone, Neuropeptide

คำนำ

โคฟีพอด เป็นสิ่งมีชีวิตในกลุ่มครัสเตเชียนที่มีขนาดเล็ก และเป็นแหล่งอาหารธรรมชาติที่สำคัญของสัตว์น้ำ (Turner, 2004) โคฟีพอดมีวงจรชีวิตสั้น มีการเจริญเติบโตโดยอาศัยการลอกคราบ ประกอบด้วยตัวอ่อนระยะนาอเพลียส (nauplius) ระยะโคฟีโพติค (copepodid) และตัวเต็มวัย (adult) (Chullasorn et al., 2012; Santhanam and Perumal, 2012) จากรายงานวิจัยพบว่าตัวอ่อนระยะนาอเพลียสของโคฟีพอดหลายชนิดมีขนาดที่เหมาะสมกับช่องปากของลูกปลา ระยะแรกฟัก (Støttrup, 2000; McKinnon et al., 2003) นอกจากนี้ โคฟีพอดยังมีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated fatty acid, PUFA) โปรตีน รงควัตถุ วิตามิน และสารอาหารอื่นๆ ที่มีคุณค่าทางโภชนาการและสำคัญจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำวัยอ่อน (Bell et al., 2003; van der Meeren et al., 2008) โคฟีพอดจึงเป็นแหล่งอาหารทางเลือกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นอาหารมีชีวิตสำหรับอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนในโรงเพาะฟัก (Drillet et al., 2011; Støttrup, 2000)

Crustacean hyperglycemic hormone (CHH) เป็นนิวโรเปปไทด์ที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการรักษาสมดุลของเมแทบอลิซึมในครัสเตเชียน (Fanjul-Moles, 2006) โดยทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับรักษาสมดุลของกลูโคสในเลือดและการควบคุมกระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญต่างๆ เช่น เมแทบอลิซึมของไขมัน การลอกคราบ การสร้างเซลล์สืบพันธุ์ และการตอบสนองต่อความเครียด (Fanjul-Moles, 2006) CHH จัดเป็นนิวโรเปปไทด์ใน CHH-family มีโครงสร้างการเรียงตัวของกรดอะมิโนคล้ายกับ molt-inhibiting hormone (MIH), vitellogenesis/gonad-inhibiting hormone (VIH/GIH) และ mandibular organ-inhibiting hormone (MOIH) ที่พบในครัสเตเชียน และ ion transport peptide (ITP) ที่พบในแมลง (Keller, 1992) โดยเปปไทด์ส่วนใหญ่ใน CHH-family มีขนาดประมาณ 70–80 กรดอะมิโน ประกอบด้วยกรดอะมิโนซิสเทอีนอนุรักษ์ 6 ตัว เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ 3 พันธะ (Gorgels-Kallen and Voorter, 1985; Mattson and Spaziani, 1985)

Apocyclops royi เป็นโคฟีพอดในกลุ่มไซโคลพอยด์ที่มีขนาดค่อนข้างเล็กและมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นอาหารมีชีวิตในการอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อน (Blanda et al., 2015; Chang and Lei, 1993; Liao et al., 2001) *A. royi* สามารถเปลี่ยนกรดไขมันสายสั้นให้เป็นกรดไขมันโอเมก้า 3 ซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ (Pan et al., 2018; Nielsen et al., 2019) ถึงแม้ว่า CHH จะเป็นเปปไทด์ที่ทำหน้าที่สำคัญในการควบคุมกลไกต่างๆ ในครัสเตเชียน อย่างไรก็ตาม องค์ความรู้เกี่ยวกับยีน CHH ในโคฟีพอดยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาลักษณะสมบัติและรูปแบบการแสดงออกของยีน ArCHH-like ในระยะพัฒนาการต่างๆ ของโคฟีพอด *A. royi*

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

เลี้ยงโคฟีพอด *A. royi* ด้วยสาหร่ายสีเขียว *Tetraselmis suecica* ตามวิธีของ ปวีณา และคณะ (2562) กรองโคฟีพอด *A. royi* แยกระยะนาอเพลียส, โคฟีโพติค และตัวเต็มวัย ด้วยผ้ากรองขนาด 33, 150 และ 250 μm ตามลำดับ เก็บตัวอย่างโคฟีพอด *A. royi* แต่ละระยะที่อุณหภูมิ -80°C จนกว่าจะนำไปสกัด RNA

การค้นหาลำดับนิวคลีโอไทด์และลำดับกรดอะมิโนของยีน ArCHH-like

ค้นหาข้อมูลของยีน CHH จากฐานข้อมูลทรานสคริปโตมของโคฟีพอด *A. royi* (Amparyup et al., unpublished data) วิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์และลำดับกรดอะมิโนของยีน ArCHH-like ด้วยโปรแกรม ExPASy (<https://www.expasy.org>)

ทำนายโดเมนที่มีความสำคัญของโปรตีนด้วยโปรแกรม SMART (<http://smart.embl-heidelberg.de>) ทำนายส่วนของเปปไทด์ส่งสัญญาณ (Signal peptide) ด้วยโปรแกรม SignalP 3.0 (<http://www.cbs.dtu.dk/services/SignalP/>) เปรียบเทียบความเหมือนกับยีนที่รายงานในฐานข้อมูล GenBank โดยใช้โปรแกรม BLASTP (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) ทำ Sequence alignment โดยใช้โปรแกรม Clustal Omega

การสกัด RNA การสังเคราะห์ cDNA และการตรวจสอบการแสดงออกของยีน ArCHH-like ด้วยเทคนิค Real-time RT-PCR

สกัด RNA จากตัวอย่างโคฟีพอด *A. royi* ระยะนอเพเลียส, โคฟีโพติด และตัวเต็มวัย ด้วย Tri Reagent (Molecular Research Center) กำจัด DNA ที่เจือปนโดยย่อยด้วยเอนไซม์ DNase I (Promega) สังเคราะห์ cDNA ด้วย RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit (Thermo Scientific) ตรวจสอบการแสดงออกของยีนในระยะการเติบโตของโคฟีพอด *A. royi* ต่าง ๆ ด้วยเทคนิค Real-time RT-PCR โดยทำการออกแบบไพรเมอร์จากลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน ArCHH-like และยีน Elongation factor-1 α เป็นยีนควบคุม (Table 1 แสดงไพรเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้) ทำปฏิกิริยา Real-time RT-PCR ด้วย Luna[®] Universal qPCR Master Mix (NEB) โดยเครื่อง CFX96 TOUCHTM Real-Time PCR Detection System (BIO-RAD, USA) ประมวลผลด้วยโปรแกรม Bio-Rad CFX Maestro 1.1 นำค่า Ct ที่ได้จากโปรแกรมมาวิเคราะห์ผลด้วยวิธี $\Delta\Delta C_t$ method) ตามวิธีของ Livak และ Schmittgen (2001) และวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA ด้วยโปรแกรม SPSS ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Table 1 Primer list used in this study

Oligo name	Sequence (5'->3')	Size (bp)	Remarks
ArCHH17119_F	GTTCAACGAGGAGGGAATCA	224	Real-time PCR
ArCHH17119_R	TCGAGGTAAGCTGCCACTTC		
copArEF-1aF	GTGTTGGACAAGCTGAAGTC	143	Real-time PCR
copArEF-1aR	GGTCCAGTGATCATGTTCTTGATG		

ผลและวิจารณ์ผลทดลอง

การค้นหาลักษณะสมบัติของยีน Crustacean hyperglycemic hormone (CHH) ในโคฟีพอด A. royi

จากการค้นหายีนในกลุ่มนิวโรเปปไทด์จากทรานสคริปโตมของโคฟีพอด *A. royi* พบยีน ArCHH-like มี open reading frame (ORF) ขนาด 333 bp ที่สามารถแปลรหัสได้เป็นโปรตีนขนาด 110 กรดอะมิโน มีน้ำหนักโมเลกุล 12.26 kDa และมีค่า isoelectric point (pI) เท่ากับ 5.20 เมื่อเปรียบเทียบความเหมือนของ ArCHH-like กับโปรตีนที่มีรายงานในฐานข้อมูล GenBank ด้วยโปรแกรม BlastP พบว่า ArCHH-like มีความเหมือนกับโปรตีน CHH-like protein ของโคฟีพอด *Lepeophtheirus salmonis* เท่ากับ 68%

จากการวิเคราะห์พบว่าโปรตีน CHH จัดเป็นโปรตีนในกลุ่มนิวโรเปปไทด์ประกอบไปด้วยโดเมนที่สำคัญ ได้แก่ Crust_neurohorm domain และเปปไทด์ที่เป็นเอกลักษณ์ดังนี้ signal peptide, CHH precursor-related peptide (CPCP) และ CHH mature peptide (Kim et al., 2013; Chang and Lai, 2018) เมื่อทำการวิเคราะห์หาโดเมนที่สำคัญ

ภายในโมเลกุลของ ArCHH-like พบว่าประกอบด้วย signal peptide ที่ลำดับอะมิโน 1–16 และ Crust_neurohorm domain ที่ลำดับอะมิโนที่ 103 (E -value $1.1e-18$) และเมื่อวิเคราะห์ลำดับอะมิโนภายใน Crust_neurohorm domain พบว่าประกอบด้วย CHH mature peptide พบกรดอะมิโนซิสเตอีน (cysteine) จำนวน 6 ตำแหน่ง (C^{42} , C^{57} , C^{60} , C^{73} , C^{77} , C^{86}) แสดงใน Fig. 1 (แสดงผลเปรียบเทียบลำดับอะมิโนของยีน ArCHH-like ของโคพีพอด กับยีน CHH ของครัสเตเชียนสายพันธุ์อื่นๆ) ความเหมือนซึ่งเป็นลักษณะสมบัติเฉพาะสำคัญของกลุ่มโปรตีน CHH เหมือนกับการรายงานการศึกษาลักษณะสมบัติของยีน CHH ในกลุ่มสิ่งมีชีวิตจำพวกครัสเตเชียน (Chang and Lai, 2018; Kim et al., 2013; Webster et al., 2012)



Fig. 1 Multiple alignment of deduced amino acid sequence of copepod ArCHH-like with other CHH peptides

Note: The predicted signal peptides are underlined. The six conserved cysteine residues are red boxes.

การศึกษารูปแบบการแสดงออกของยีน ArCHH-like ในโคพีพอด *A. royi*

จากการศึกษารูปแบบการแสดงออกของยีน ArCHH-like ในแต่ละระยะการเติบโตของโคพีพอด *A. royi* ประกอบด้วย ระยะนาอเพลียส (Nauplii I-VI), ระยะโคพีพอดิต (Copepodid I-VI) และระยะตัวเต็มวัย (Adult) ด้วยเทคนิค Real-time RT-PCR พบว่าการแสดงออกของยีน ArCHH-like ของโคพีพอด *A. royi* ในระยะตัวเต็มวัยมีระดับการแสดงออกสูงกว่าระยะโคพีพอดิตและระยะนาอเพลียสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Fig. 2) โดยพบว่าการแสดงออกของยีน ArCHH-like จะมีการแสดงออกที่เพิ่มขึ้นตามระยะพัฒนาการการเจริญเติบโตของโคพีพอด *A. royi*

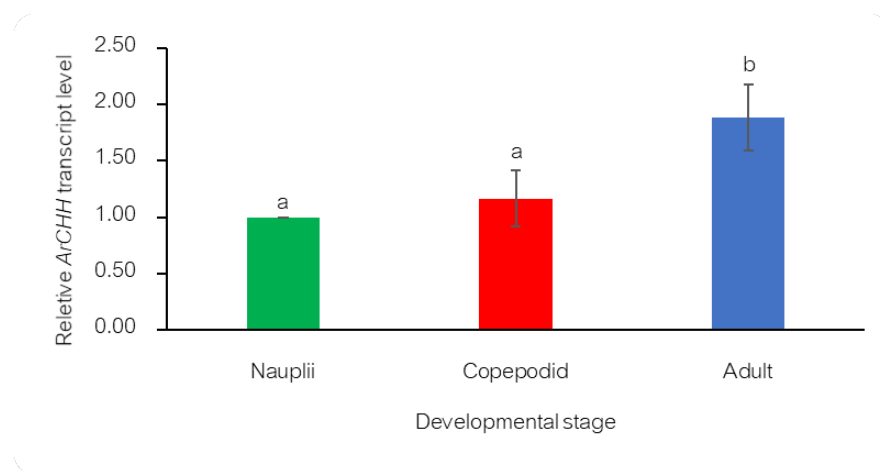


Fig. 2 Gene expression analysis of ArCHH-like transcript in various developmental stages of copepod *A. royi*

Note: The expression profile from the nauplius (NP), copepodid (CD), and adult (AD) developmental stages were analyzed real-time RT-PCR analysis. The elongation factor-1 α (EF-1 α) served as an internal control in all analyzes.

สรุป

ในการศึกษานี้ ได้ค้นพบยีน ArCHH-like เป็นการค้นพบครั้งแรกในโคพีพอด *A. royi* พบว่าจัดอยู่ในกลุ่ม CHH ของครัสเตเชียน ซึ่งเป็นนิวโรเปปไทด์ที่ควบคุมสมดุลของพลังงานและกระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญในครัสเตเชียน จากการวิเคราะห์การแสดงออกของยีนพบว่า ArCHH-like มีการแสดงออกในระยะตัวเต็มวัยสูงกว่าระยะนอเพลียดและโคพีพอดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่า ArCHH-like อาจทำหน้าที่เป็นนิวโรเปปไทด์ที่มีบทบาทสำคัญในช่วงปลายของการเจริญพัฒนาของโคพีพอด *A. royi*

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (P2050332) และ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (สัญญาเลขที่ วช.อว.(อ)(ภส)/49/2564)

เอกสารอ้างอิง

ปวีณา ตปนียวรงค์, อภินาถ ประสพวงศ์, มะลิวัลย์ คุณะโค, สรวิศ เผ่าทองสุข. 2019. การเติบโตของโคพีพอด

Apocyclops royi (Lindberg, 1940) ที่เลี้ยงด้วยสาหร่าย *Tetraselmis suecica* และ *Thalassiosira* sp. ในระบบแบบกึ่งต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง. แก่นเกษตร 47 (ฉบับพิเศษ 1): 306–312.

พงศธร จันทรรัตน์. 2558. การเพาะเลี้ยงโคพีพอดเพื่อการอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนในโรงเพาะฟัก. วารสารเกษตร 31(2): 225–239.

- Ananthi, P., Santhanam, P., Nandakumar, R., Ananth, S., Jothiraj, K., Kumar, S.D. 2011. Production and utilization of marine copepods as live feed for larval rearing of tiger shrimp *Penaeus monodon* with special emphasis on astaxanthin enhancement. *Indian Journal of Natural Sciences* 1(8): 494–503.
- Bell, J.G., Mcevoy, L.A., Estevez, A., Shields, R.J. and Sargent, J.R. 2003. Optimising lipid nutrition in first-feeding flatfish larvae. *Aquaculture* 227: 211–220.
- Blanda, E., Drillet, G., Huang, C., Hwang, J., Jakobsen, H.H., Rayner, T.A., Su, H., Wu, C., Hansen, B.W. 2015. Trophic interactions and productivity of copepods as live feed from tropical Taiwanese outdoor aquaculture ponds. *Aquaculture* 445: 11–21.
- Chang, W.B., Lei, C.H. 1993. Development and energy content of a brackish-water copepod, *Apocyclops royi* (Lindberg) reared in a laboratory. *Bull. Inst. Zool., Academia Sinica* 32(1): 62–81.
- Chang, W.H., Lai, A.G. 2018. Comparative genomic analysis of crustacean hyperglycemic hormone (CHH) neuropeptide genes across diverse crustacean species [version 1; peer review: 1 approved, 2 approved with reservations]. *F1000Research*. 7: 100. doi.org/10.12688/f1000research.13732.1
- Chullasorn, S., Ivanenko, V.N., Dahms, H.U., Kangtia, P., Yang, W.X. 2012. A new species of *Tigriopus* (Copepoda, Harpacticoida, Harpacticidae) from Thailand with the description of its naupliar development. *Helgoland Marine Research* 66: 139–151.
- Chung, J.S., Dirksen, H., Webster, S.G., 1999. A remarkable, precisely timed release of hyperglycemic hormone from endocrine cells in the gut is associated with ecdysis in the crab *Carcinus maenas*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 96: 13103–13107.
- Chung, J.S., Webster, S.G. 2006. Binding sites of crustacean hyperglycemic hormone and its second messengers on gills and hindgut of the green shore crab, *Carcinus maenas*: A possible osmoregulatory role. *Gen. Comp. Endocrinol.* 147: 206–213.
- Dahm, H.U. 2000. Phylogenetic implications of the Crustacean Nauplius. *Advance in copepod taxonomy. Hydrobiologia* 417: 91–99.
- De Kleijn, D.P.V., Van Herp, F. 1998. Involvement of the hyperglycemic neurohormone family in the control of reproduction in decapod crustaceans. *Invertebr. Reprod. Dev.* 33: 263–272.
- Drillet, G., Frouël, S., Sichlau, M.H., Jepsen, P.M., Højgaard, J.K., Joarder, A.K., Hansen, B.W. 2011. Status and recommendations on marine copepod cultivation for use as live feed. *Aquaculture* 315: 155–166.
- Fanjul-Moles, M.L. 2006. Biochemical and functional aspects of crustacean hyperglycemic hormone in decapod crustaceans: review and update. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* 142: 390–400.
- Farhadian, O., Yusoff, F.M., Arshad, A.B. 2007. Ingestion rate of postlarvae *Penaeus monodon* fed *Apocyclops dengizicus* and *Artemia*. *Aquaculture* 269: 265–270. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.034

- Gorgels-Kallen, J.L., Voorter, C.E.M. 1985. The secretory dynamics of the CHH-producing cell group in the eyestalk of the crayfish, *Astacus leptodactylus*, in the course of the day/night cycle. *Cell Tissue Res.* 241: 361–366.
- Jantrarat, P., Tempakdee, P., Pripanapong, S. 2004. Evaluation of different larval feeds for survival and development of early stage mud crab (*Scylla olivacea*). *Kasetsart J.: Nat. Sci.* 38(4): 484–492.
- Jorgensen, T.S., Nielsen, B.L.H., Petersen, B., Browne, P.D., Hansen, B.W., Hansen, L.H. 2019. The Whole Genome Sequence and mRNA Transcriptome of the Tropical Cyclopoid Copepod *Apocyclops royi*. *Genes|Genomes|Genetics* 9: 1295–1302. doi.org/10.1534/g3.119.400085
- Keller, R. 1992. Crustacean neuropeptides: structures, functions and comparative aspects. *Experientia* 48: 439–448.
- Kim, B.M., Jeong, C.B., Han, J., Kim I.C., Rhee, J.S., Lee, J.S. 2013. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* 158: 131–141.
- Liao, I.C., Su, H.M., Chang, E.Y. 2001. Techniques in finfish larvi culture in Taiwan. *Aquaculture* 200: 1–31.
- Mattson, M.P., Spaziani, E. 1985. Cyclic AMP mediates the negative regulation of Y-organ ecdysteroid production *Mol. Cell Endocrinol.* 42: 185–189.
- McKinnon, A.D., Duggan, S., Nichols, P.D., Rimmer, M.A., Semmens, G., Robino, B. 2003. The potential of tropical paracalanid copepods as live feeds in aquaculture. *Aquaculture* 223: 89–106.
- 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. *Biology Open* 8: 1–10. doi:10.1242/bio.038331
- Pan, Y.J., Sadovskaya, I., Hwang, J.S., Souissi, S. 2018. Assessment of the Fecundity, Population Growth and Fatty Acid Composition of *Apocyclops royi* (Cyclopoida, Copepoda) Fed on Different Microalgal Diets. *Aquacult. Nutr.* 24: 970–978.
- Rosaura, L.R., Maria, L.F.M., Elsa, G.E.C. 2017. Crustacean hyperglycemic hormone is synthesized in the eyestalk and brain of the crayfish *Procambarus clarkia*. *PLOS ONE* 12(4): e0175046.
- Santhanam, P., Perumal, P. 2012. Evaluation of the marine copepod *Oithona rigida* Giesbrecht as live feed for larvi culture of Asian seabass *Lates calcarifer* Bloch with special reference to nutritional value. *Indian J. Fish.* 59: 127–134.
- Serrano, L., Blanvillain, G., Soye, D., Charmantier, G., Grousset, E., Aujoulat, F., SpaningsPierrot, C. 2003. Putative involvement of crustacean hyperglycemic hormone isoforms in the neuroendocrine mediation of osmoregulation in the crayfish *Astacus leptodactylus*. *J. Exp. Biol.* 206: 979–988.
- Spanings-Pierrot, C., Soye, D., Van Herp, F., Gompel, M., Skaret, G., Grousset, E., Charmantier, G. 2000. Involvement of crustacean hyperglycemic hormone in the control of gill ion transport in the crab *Pachygrapsus marmoratus*. *Gen. Comp. Endocrinol.* 119: 340–350.

- Støttrup, J.G. 2000. The elusive copepods: Their production and suitability in marine aquaculture. *Aquacult. Res.* 31: 703–711.
- Turner, J.T. 2004. The importance of small planktonic copepods and their roles in pelagic marine food webs. *Zool. Stud.* 43: 255–266.
- Van der Meeren, T., Olsen, R.E., Hamre, K., Fyhn, H.J. 2008. Biochemical composition of copepods for evaluation of feed quality in production of juvenile marine fish. *Aquaculture* 274: 375–397.
- Webster, S.G., Keller, R., Dircksen, H. 2012. The CHH-superfamily of multifunctional peptide hormones controlling crustacean metabolism, osmoregulation, moulting, and reproduction. *Gen. Comp. Endocrinol.* 175: 217–233.

ปริมาณผลผลิตและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดคอลลาเจนจากกระดูกจระเข้พันธุ์ไทย (*Crocodylus siamensis*)

Yield and influencing factor on collagen extraction from Siamese crocodile (*Crocodylus siamensis*) bone

กัญญารัตน์ โชคตระกูล^a, จินดาวรรณ สิริันทวีเนติ^a, สุดาวรรณ เชนชมศรี^b, วิน เชนชมศรี^{a,*}

Kanyarath Choketarkoon^a, Jindawan Siruntawineti^a, Sudawan Chaeychomsri^b, Win Chaeychomsri^{a,*}

^aภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง คณะเกษตร กำแพงแสน นครปฐม 73140

^aDepartment of Zoology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bCentral Laboratory and Greenhouse Complex, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fsciwcc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

กระดูกจระเข้ เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการทำแหละซึ่งมีมูลค่าต่ำ การศึกษานี้เก็บตัวอย่างกระดูกจระเข้พันธุ์ไทยจากการเพาะเลี้ยงมาทำความสะอาด บด กำจัดแคลเซียมและโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจน แล้วสกัดคอลลาเจนด้วยกรดอะซิติก 0.5 M (ที่อุณหภูมิ 70°C, 90°C และไม่ใช่ความร้อน) ร่วมกับเอนไซม์เปปซินความเข้มข้น 0.1% พบปริมาณผลผลิตของคอลลาเจนจากการสกัดเท่ากับ 10% เมื่อหาปริมาณโปรตีนรวมด้วยวิธีการ Bradford และวิเคราะห์รูปแบบโปรตีนด้วยเทคนิค SDS-PAGE พบการสกัดด้วยกรดที่ 90°C แสดงปริมาณโปรตีนสูงที่สุด และรูปแบบโปรตีนแสดงขนาดโมเลกุลเปปไทด์เล็กที่สุด ปริมาณโปรตีนรองลงมาได้แก่ การสกัดที่ 70°C และการสกัดที่ไม่ใช่ความร้อน ผลการศึกษาแสดงปัจจัยอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณโปรตีนและขนาดโมเลกุลของเปปไทด์ของสารสกัดคอลลาเจน

คำสำคัญ: การสกัด, กระดูก, คอลลาเจน, จระเข้, เปปซิน

Abstract

Crocodile bone is a by-product during processing of the crocodile slaughter industry. It is regarded as trash and has a low valuation. This study collected bone samples of Siamese crocodile obtained from captive and then cleaned, ground, and removed calcium and non-collagen proteins. Collagen was then extracted with 0.5 M acetic acid (at 70°C, 90°C and without heat) and with 0.1% pepsin. The yield of the extracted collagen was 10%. The extracts were determined for total protein by Bradford's method and the protein form was analyzed by the SDS-PAGE technique. The acidic extraction at 90°C showed the highest protein content and the protein form presented the smallest peptide molecular size. The following protein contents were extraction at 70°C and non-thermal extraction. The results reveal that temperature factor influenced protein content and molecular size of the collagen extract peptides.

Keywords: Bone, Collagen, Crocodile, Extraction, Pepsin

บทนำ

คอลลาเจนคือเส้นใยโปรตีนที่พบมากที่สุดในร่างกายประมาณร้อยละ 30 ของโปรตีนทั้งหมดที่รวมกัน (วรินญา, 2558) โดยทั่วไปพบได้ตามผิวหนัง กระดูก กระดูกอ่อน และรวมถึงเนื้อเยื่อต่างๆในร่างกายของสัตว์และมนุษย์ (Schmidt et al., 2016) มีคุณสมบัติเสริมสร้างความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และเพิ่มความชุ่มชื้นแก่ผิวหนัง (León-López et al., 2019) ที่ผ่านมามีการสกัดคอลลาเจนจากหนังและกระดูกจากสัตว์บก เช่น หมู วัว เป็นต้น ซึ่งพบว่าคอลลาเจนที่ได้จากสัตว์บกเป็นแหล่งก่อการระบาดของโรค Bovine Spongiform Encephalopathy (BSE) ที่เป็นโรคติดเชื้อที่เกิดขึ้นในวัว และยังส่งผลต่อคนที่รับประทานเนื้อวัวที่มีการติดเชื้อเข้าไปทำให้คนเป็นโรค Creutzfeldt-Jakob Disease (CJD) (วิจิตรา และศรีธัญ, 2561) นอกจากนี้คอลลาเจนจากหมูยังขัดต่อหลักศาสนาซึ่งไม่ผ่านเครื่องหมายฮาลาล ทำให้ชาวมุสลิมไม่สามารถบริโภคได้ ทำให้มีการหาแหล่งคอลลาเจนใหม่จากสัตว์น้ำแทนคอลลาเจนจากสัตว์บก เช่น การสกัดคอลลาเจนจากเกล็ดปลากะพงแดง (*Lutjanus argentimaculatus*) (ฉลองขวัญ และคณะ, 2551) ปลิงทะเล (*Stichopus vastus*) (Abedin et al., 2015) เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนการสกัดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีที่เลือกใช้

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเพาะเลี้ยงจระเข้จำนวนมาก มีจระเข้ที่เพาะเลี้ยงไม่ต่ำกว่า 1 ล้านตัว (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560) ซึ่งทำให้มีกระดูกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการฆ่าและจระเข้จำนวนมาก ก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมและมีการใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์ที่มีมูลค่าต่ำ ทั้งที่มันมีคุณค่าทางยาและเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารได้ โดยกระดูกจระเข้ส่วนใหญ่เป็นกระดูกอ่อนซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของโปรตีนคอลลาเจน

อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาเรื่องคอลลาเจนที่ได้จากกระดูกจระเข้พันธุ์ไทยที่มีแหล่งวัตถุดิบอยู่มากในประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์เพิ่มมูลค่าให้กับจระเข้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมคอลลาเจน จึงได้ศึกษาปริมาณผลผลิตและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดคอลลาเจนจากกระดูกจระเข้ เพื่อให้ได้คอลลาเจนคุณภาพดีเป็นสารตั้งต้นในการประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและความงามต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

เตรียมตัวอย่างกระดูกจระเข้ก่อนการสกัดคอลลาเจน

นำกระดูกจระเข้ (ส่วนซี่โครง กระดูกสันหลัง และข้อต่อขา) ล้างทำความสะอาด บด แล้วนำมาแช่ใน 1.2 N HCL อัตราส่วนกระดูกจระเข้ต่อกรดเป็น 1:6 (w/v) ที่อุณหภูมิห้องเพื่อกำจัดแคลเซียม ทำการกวนทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดูกจระเข้ล้างน้ำจมี pH 6-7 แล้วนำมากำจัดโปรตีนอื่นที่ไม่ใช่คอลลาเจนและกำจัดเมดสีโดยแช่ใน 0.1 N NaOH ในอัตราส่วนกระดูกจระเข้ต่อต่างเป็น 1:10 (w/v) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยทำการกวนตลอดเวลา และเปลี่ยนสารละลายทุก 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างกระดูกจระเข้ด้วยน้ำจมี pH 7-8

การสกัดคอลลาเจน

นำกระดูกจระเข้ที่ผ่านการกำจัดแคลเซียมและกำจัดโปรตีนอื่นที่ไม่ใช่คอลลาเจนมาสกัดคอลลาเจนซึ่งการสกัดคอลลาเจนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1) การสกัดด้วยกรดร่วมกับความร้อน การสกัดเริ่มจากการนำกระดูกจระเข้ 10 กรัม (น้ำหนักเปียก) ใส่ 0.5 M กรดอะซิติก ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทำการสกัดด้วยกรดร่วมกับความร้อนเมื่อครบเวลาที่ต้องการจึงทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็งจนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการสกัดต่อด้วยข้อ 2)

2) การใช้กรดร่วมกับเอนไซม์เปปซิน โดยเติมเอนไซม์เปปซิน (porcine gastric mucosa; Sigma Aldrich, USA) 0.1% ของน้ำหนักกระดูกจะเซ่ เมื่อสกัดคอลลาเจนจนครบเวลาจึงยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เก็บส่วนสารละลายที่ผ่านการกรอง จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Freeze Dry เพื่อเก็บรักษาตัวอย่างไว้ได้นาน

ศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการสกัดด้วยกรดร่วมกับความร้อน

ทำการสกัดคอลลาเจนจากกระดูกจะเซ่ตามข้อ 1) และ 2) โดยศึกษาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C และ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตามด้วยการสกัดคอลลาเจนด้วยกรดร่วมกับเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สารสกัดคอลลาเจนที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและรูปแบบโปรตีนของคอลลาเจนจากกระดูกจะเซ่

การสกัดคอลลาเจนโดยไม่ใช้ความร้อน

สกัดคอลลาเจนจากกระดูกจะเซ่โดยใช้กรดร่วมกับเอนไซม์ตามวิธีข้อ 2) โดยไม่มีการให้ความร้อนในสารละลายกรด โดยทำการสกัดที่อุณหภูมิห้อง (28±2°C) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

การหาปริมาณผลผลิตของคอลลาเจนจากกระดูกจะเซ่

หาปริมาณผลผลิตของคอลลาเจนจากกระดูกจะเซ่ตาม Equation 1:

$$\text{ปริมาณผลผลิตของคอลลาเจน(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักคอลลาเจนหลังจากการทำแห้ง(กรัม)}}{\text{น้ำหนักกระดูกจะเซ่ที่ผ่านการกำจัดโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนและเม็ดสี(กรัม)}} \times 100 \quad (1)$$

การหาปริมาณโปรตีน

นำตัวอย่างหาโปรตีนด้วย Bradford Assay โดยตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมกับ Quick Start Bradford 1x Dye Reagent 1 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นทำการหาโปรตีนด้วยการวัดค่าดูดกลืนแสง (OD) 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง spectrophotometer ซึ่งแต่ละตัวอย่างทำการวัด 3 ครั้ง ค่าที่ได้นำมาเทียบกับกราฟมาตรฐานโปรตีนที่ใช้สารละลาย BSA (Bovine serum albumin) ที่ความเข้มข้น 0.125, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

วิเคราะห์รูปแบบโปรตีนของคอลลาเจนจากกระดูกจะเซ่พันธุ์ไทย

วิเคราะห์รูปแบบโปรตีนของคอลลาเจนโดยใช้เทคนิค Sodium Dodecyl Sulphate–Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) โดยนำตัวอย่างคอลลาเจนที่ได้มาเติมสารละลาย sample buffer ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 0.5 (v/v) ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีสารรีดิวซ์ (β-Mercaptoethanol) ตัวอย่างถูกไหลลงลงใน SDS-PAGE ที่เตรียมจากความเข้มข้นของ stacking gel ร้อยละ 4.5 และ running gel ร้อยละ 15 หลังจากแยกโปรตีนทำการย้อมด้วยสี Coomassie Brilliant Blue R 250 บันทึกผลรูปแบบโปรตีนบนแผ่นเจล โดยใช้เครื่อง gel documentation รุ่น InGenius3

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

แผนการทดลองทำทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยผลผลิตคอลลาเจนนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างตัวอย่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการหาผลผลิตของคอลลาเจนโดยรวมทั้งสามวิธี พบว่า มีปริมาณผลผลิตคอลลาเจนเฉลี่ยเท่ากับ 10% และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีของเบรดฟอร์ด ที่นำตัวอย่างเทียบกับสารละลายมาตรฐาน (BSA) พบว่า คอลลาเจนที่สกัดได้มีปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกัน คอลลาเจนที่สกัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C มีปริมาณโปรตีนสูงสุด ปริมาณโปรตีนรองลงมาได้แก่ การสกัดคอลลาเจนที่อุณหภูมิ 70°C และคอลลาเจนที่สกัดโดยไม่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิห้อง (28±2°C) มีโปรตีนเท่ากับ 568, 515 และ 358 มิลลิกรัมต่อกรัมคอลลาเจน ตามลำดับ แสดงดัง Table 1 ซึ่งสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณโปรตีนในการสกัดคอลลาเจนจากจระเข้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณโปรตีนจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

Table 1 Protein content of collagen extracted solution obtained by extraction with acid and heat at 70°C and 90°C and without heat at room temperature

Temperature	Protein content (mg/g collagen)
70°C	515±25.5 ^b
90°C	568±18.1 ^c
Room temperature	358±27.1 ^a

Note: ^{a-c} Means values with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

การตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี SDS-PAGE พบว่าอุณหภูมิในการสกัดคอลลาเจนด้วยกรดร่วมกับความร้อนมีผลต่อขนาดโมเลกุลของเปปไทด์ โดยสารสกัดคอลลาเจนที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C (Fig. 1A) และ 90°C (Fig. 1B) เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานขึ้นเปปไทด์จะมีขนาดเล็กลง ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 90°C เนื่องจากการให้ความร้อนเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยกรด (acid hydrolysis) (ฉลองขวัญ และคณะ, 2551) รวมถึงการใช้เอนไซม์เปปซินที่อุณหภูมิ 37°C มีส่วนช่วยในการย่อยของโมเลกุลเปปไทด์ได้ดีขึ้น เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยของเอนไซม์เปปซิน (Devlin, 1997) และเมื่อสังเกตสารสกัดคอลลาเจนที่ไม่ผ่านการสกัดด้วยกรดร่วมกับความร้อน ใน Fig. 2 พบว่าประกอบด้วยเปปไทด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าสารสกัดคอลลาเจนที่ผ่านการให้ความร้อน และพบแถบโปรตีนเด่นด้านบน 2 แถบ ที่น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 127 และ 117 kDa ซึ่งคาดว่าคอลลาเจนที่สกัดได้เป็น type I และเป็นตำแหน่งของสาย $\alpha 1$ และ $\alpha 2$ เนื่องจากคอลลาเจนจากกระดูกแอลลิเกเตอร์อเมริกัน (*Alligator mississippiensis*) ที่ศึกษาโดย Wood et al.(2008) พบตำแหน่งของสาย $\alpha 1$ และ $\alpha 2$ ที่น้ำหนักโมเลกุล 123 และ 110 kDa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอลลาเจนที่สกัดได้ นอกจากนี้คอลลาเจนที่สกัดด้วยกรดร่วมกับความร้อนและไม่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะมีและไม่มีสารรีดิวซ์ (β -Mercaptoethanol) พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

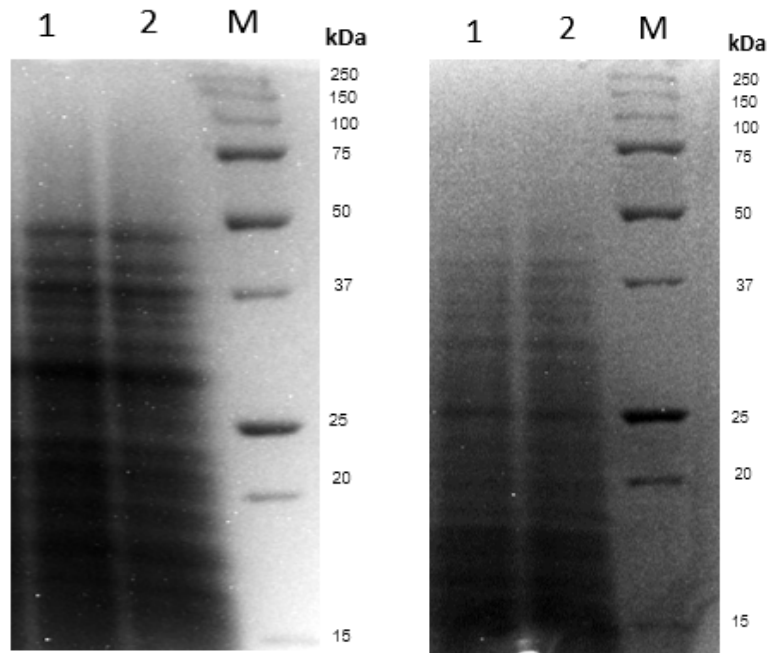


Fig 1 SDS-PAGE patterns of crocodile bone collagen extracted by acid and heat at 70°C (A) and 90°C (B) for 12 hours, on 15% gel

Note: Lane M: standard marker proteins; Lane 1: crocodile bone collagen under reducing agents condition; Lane 2: crocodile bone collagen under non-reducing agents condition.

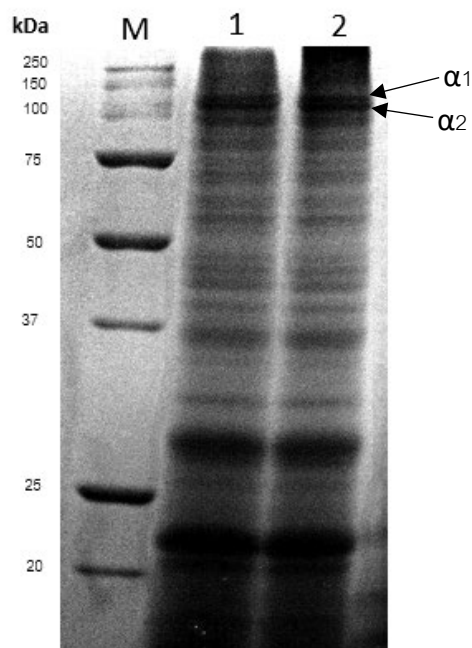


Fig 2 SDS-PAGE patterns of crocodile bone collagen extracted by acid combined with pepsin (without acid and heat treatment) on 15% gel

Note: Lane M: standard marker proteins; Lane 1: crocodile bone collagen under reducing agents condition; Lane 2: crocodile bone collagen under non-reducing agents condition.

ดังนั้นในที่นี้จึงเลือก การสกัดคอลลาเจนที่อุณหภูมิ 90°C เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูงสุดและมีเปปไทด์ขนาดโมเลกุลเล็กที่ง่ายต่อการดูดซึม แต่ถ้าหากต้องการการสกัดคอลลาเจนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ และยังรักษาโครงสร้างของสาย $\alpha 1$ และ $\alpha 2$ เอาไว้ได้ จะต้องเลือกวิธีการสกัดคอลลาเจนที่ไม่ผ่านความร้อน ซึ่งอย่างไรก็ตามวิธีนี้ให้ปริมาณโปรตีนที่ค่อนข้างต่ำ

สรุปผลการทดลอง

การสกัดคอลลาเจนจากจระเข้พันธุ์ไทยด้วยกรดร่วมกับความร้อนและไม่ใช้ความร้อน มีปริมาณผลผลิตที่ได้เฉลี่ย 10% และพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อการสกัดคอลลาเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิ 90°C มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับ 568 มิลลิกรัมต่อกรัมคอลลาเจน และเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคอลลาเจนที่มีโมเลกุลเปปไทด์ขนาดเล็ก ส่วนการสกัดคอลลาเจนที่ไม่ใช้ความร้อน เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคอลลาเจนที่มีขนาดเปปไทด์ใหญ่ ซึ่งมีปริมาณโปรตีนเท่ากับ 358 มิลลิกรัมต่อกรัมคอลลาเจน โดยขนาดของโมเลกุลเปปไทด์ทำให้คอลลาเจนมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งการนำคอลลาเจนไปใช้ในผลิตภัณฑ์ควรคำนึงถึงขนาดโมเลกุลให้สอดคล้องกันเพื่อผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ประจำปีงบประมาณ 2563 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และจากภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณบริษัท ซี เอส จี โปรดักส์ (ไทยแลนด์) จำกัด สำหรับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ในการวิจัย รวมถึงฟาร์มจระเข้ศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ให้ความอนุเคราะห์กระดูกจระเข้สำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2560. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จัดประชุม “จระเข้ไทยก้าวไกลสู่ระดับโลก” เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และข้อมูลด้านการอนุรักษ์ การเลี้ยง โรคระบาด และแนวทางการกำกับดูแลเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมจระเข้ตลอดสายการผลิต. <https://www.moac.go.th/news-preview-392991791260>, 8 เมษายน 2563.
- ฉลองขวัญ พิพัฒน์เจริญวงศ์, วรณวิบูลย์ กาญจนบุญชร, วรณิ จิรภาคย์กุล. 2551. การสกัดคอลลาเจนจากเกล็ดปลา กะพงแดง (*Lutjanus argentimaculatus*). ใน: รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 33-40.
- วรินญา ปัญญาแก้ว. 2558. การศึกษาผลของการรับประทานคอลลาเจนเสริมต่อความยืดหยุ่นและความชุ่มชื้นของผิว. สารนิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- วิจิตรา ตั้งชี, ศรีธัญย์ รักษาพรหมณ์. 2561. สมบัติบางส่วนของคอลลาเจนจากปลิงทะเลดำ (*Holothuria leucospilota*). Partial properties of pepsin-soluble collagen from black sea cucumber (*Holothuria leucospilota*). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 26: 767-776.

- Abedin, M.Z., Karim, A.A., Gan, C., Ghazali, F.B., Barzideh, Z., Zzaman, W., Zaidul, I.S. 2015. Identification of angiotensin I converting enzyme inhibitory and radical scavenging bioactive peptides from sea cucumber (*Stichopus vastus*) collagen hydrolysates through optimization. *Int. Food Res. J.* 22: 1074–1082.
- Devlin, T.M. 1997. *Textbook of Biochemistry with Clinical Correlations*. 4th ed. Wiley-Liss, Inc., New York.
- León-López, A., Morales-Peñaloza, A., Martínez-Juárez, V.M., Vargas-Torres, A., Zeugolis, D. I., Aguirre-Álvarez, G. 2019. Hydrolyzed Collagen-Sources and Applications. *Molecules* 24: 4031. doi.org/10.3390/molecules24224031
- Schmidt, M.M., Dornelles, R.C.P., Mello, R.O., Kubota, E.H., Mazutti, M.A., Kempka, A.P., Demiate, I.M. 2016. Collagen extraction process. *Int. Food Res. J.* 23: 913–922.
- Wood, A., Ogawa, M., Portier, R.J., Schexnayder, M., Shirley, M., Losso, J.N. 2008. Biochemical properties of alligator (*Alligator mississippiensis*) bone collagen. *Comp. Biochem. Physiol. Part B: Biochem. Mol. Biol.* 151: 246–249. doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.05.015

**สาขาวิศวกรรมศาสตร์
และสถาปัตยกรรมศาสตร์
(Subject: Engineering
and Architecture)**

**ภาคบรรยาย
(Oral Presentation)**

ประสิทธิภาพของปล่องรังสีอาทิตย์ร่วมกับเครื่องทำความชื้นแบบอัลตราโซนิกส์เพื่อลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน

The efficiency of solar chimney with ultrasonic humidifier for reduce indoor particulate matter (PM_{2.5})

สุปรียา ผ่องใส*, ธนา อนันต์อาชา

Supreeya Pongsai*, Thana Ananacha

หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมและการออกแบบเพื่อความยั่งยืน ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Master of Architecture Program in Innovation and Designing for Sustainability, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

*Corresponding author. E-mail address: Supreeya.p11@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัญหามลพิษทางอากาศเป็นปัญหาหลักของของประชาชนที่พักอาศัยอยู่ในเมือง ฝุ่นละออง PM_{2.5} ก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพมากมาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของปล่องรังสีอาทิตย์ร่วมกับเครื่องทำความชื้นแบบอัลตราโซนิกส์เพื่อลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน เปรียบเทียบบ้านทดสอบ 2 หลัง มีปริมาตรเท่ากันที่ 0.88 m³ บ้านหลังที่ 1 ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ บ้านหลังที่ 2 ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ร่วมกับเครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิกส์ ทำการทดสอบปล่อยละอองน้ำที่ 1 นาที เว้น 29 นาที, 2 นาที เว้น 28 นาที และ 3 นาที เว้น 27 นาที ตั้งแต่เวลา 8.00–16.00 น. ผลการทดลองพบว่า SC-UH มีประสิทธิภาพในการลดฝุ่น PM_{2.5} มากกว่า SC 18.4% และมีอุณหภูมิต่างกันมากที่สุดในช่วง 14.30 น. คือ 1.37°C

คำสำคัญ: ปล่องรังสีอาทิตย์, ฝุ่น PM_{2.5}, ละอองน้ำ

Abstract

Air pollution is the main problem of people living in cities. PM_{2.5} causes many health problems. The objective of this research was to test the efficiency of the Solar Chimney with an Ultrasonic Humidifier to reduce the particulate matter of less than 2.5 microns. Compare between house installed Solar Chimney and the house installed Solar Chimney with Ultrasonic Humidifier in the same volume at 0.88 m³. Spraying water droplets were tested at 1, 2, and 3 min, every 30 min, from 8:00 a.m. – 4:00 p.m. The results showed that SC-UH was 18.4% more effective at reducing PM_{2.5} than SC with large temperature differences. A maximum of 1.37 °C at 2.30 p.m.

Keyword: PM 2.5, Solar Chimney, Ultrasonic Humidifier

คำนำ

ในช่วง 2–3 ปีที่ผ่านมาประชาชนตื่นตัวกับปัญหามลพิษทางอากาศมากขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่ จะต้องสวมใส่หน้ากากอนามัยเมื่อต้องเดินทางออกไปในที่สาธารณะในช่วงที่ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ เกินมาตรฐาน ปัญหามลพิษทางอากาศในประเทศไทยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาจะสามารถควบคุมให้ใกล้เคียง ค่ามาตรฐานได้ แต่ในช่วงปีหลังค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ เฉลี่ยทั้งปีและ 24 ชั่วโมงสูงเกินค่ามาตรฐานในช่วงเดือน มกราคมถึงมีนาคม (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) มลพิษทางอากาศในประเทศไทยมักเกิดขึ้นในเมืองใหญ่ ๆ ที่กำลัง ขยายตัวและมีการก่อสร้าง และส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่และสุขภาพของประชาชน ประชาชนส่วนใหญ่ที่อาศัยอยู่ใน เมืองใช้ชีวิตอยู่ภายในอาคารสูงถึงมากกว่า 89% ของเวลาที่ใช้ในแต่ละวัน (WHO, 2015) อาการป่วยจากปัญหามลพิษ ทางอากาศบางครั้งอาจไม่แสดงอาการเด่นชัด โดยปัญหาดังกล่าวมักพบได้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทน้อย หรือไม่มีการ ระบายอากาศเลย (กรมอนามัย, 2559)

การออกแบบสถาปัตยกรรมที่ผ่านมามากไม่ได้คำนึงถึงปัญหาฝุ่นละออง การออกแบบเปลือกอาคารให้ยัง สามารถใช้ลมธรรมชาติได้เกิดจากที่มีการเน้นช่องเปิดกว้างและตรงกันข้าม จึงต้องมีการคิดค้นเรื่องการป้องกันฝุ่นจาก ช่องว่างที่เปิดกว้างเหล่านั้น (จิรัฐพร, 2562) ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ปล่องรังสีอาทิตย์ (Solar Chimney) นอกจากจะมีประสิทธิภาพช่วยลดความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารแล้วยังมีประสิทธิภาพการไหลเวียนอากาศได้ดีแม้มีช่อง เปิดขนาดเล็ก การศึกษาหน้าต่างกระจกสองชั้น ที่ชั้นนอกติดตั้งไฟเบอร์กลาสซีเมนต์และแผ่นอลูมิเนียมพบว่า มีอัตราการ ระบายอากาศอยู่ที่ $0.005-0.013 \text{ m}^3/\text{s}$ (Thana et al., 2014) ปล่องรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศและ ลดช่วยลดความเร็วลมที่จะมาปะทะเข้าสู่ภายในอาคารเมื่อเทียบกับช่องเปิดแบบอื่น ๆ และการฉีดละอองน้ำขนาดเล็กช่วย ลดฝุ่นละอองได้ (Kim et al., 2021) จึงมีแนวโน้มพัฒนาปล่องรังสีอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับเครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิกส์

งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน โดยใช้ปล่องรังสีอาทิตย์ ร่วมกับเครื่องทำความชื้นแบบอัลตราโซนิกส์ ทำการทดสอบประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอน และ ประสิทธิภาพทางความร้อน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือเป็นผนังอาคารที่สามารถลดอุณหภูมิภายในบ้านและลดความ เข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่จะเข้าสู่ภายในอาคารได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบชุดทดลอง

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยบ้านทดสอบ 2 หลังซึ่งมีขนาดเท่ากัน คือ Home 1 (Solar Chimney; SC) ขนาด $1.2 \times 1.2 \times 1.2 \text{ m}$. ด้านหน้าติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ ขนาด $0.7 \times 0.8 \times 0.1 \text{ m}$. Home 2 (Solar Chimney with Ultrasonic Humidifier; SC-UH) ขนาด $1.2 \times 1.2 \times 1.2 \text{ m}$. ด้านหน้าติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ร่วมกับเครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิกส์ ทำการปล่อยละอองน้ำทั้งหมด 4 จุด แสดงดัง Fig. 2 ขนาด $0.7 \times 0.8 \times 0.1 \text{ m}$. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลด ฝุ่นละออง และ ประสิทธิภาพทางความร้อน โดยทำการหันหน้าบ้านทดสอบไปทางทิศใต้เพื่อรับแสงแดด จำลองฝุ่น PM ด้วยควันธูปจำนวน 10 ดอก บริเวณด้านหลังพัดลม แสดงดัง Fig. 2 ทำการทดสอบที่ลานกว้าง อำเภอปากท่อ จังหวัด ราชบุรี ($13^\circ 26' 29.2'' \text{N } 99^\circ 49' 39.3'' \text{E}$) แสดงดัง Fig. 1



Fig. 1 A model in the experiment

ภายในบ้านทดสอบมีขนาด $0.96 \times 0.96 \times 0.96$ m. ทำจากผนังยิปซัมบอร์ด หนา 9 mm. สองชั้น ตรงกลางบุโฟมหนา 2" ตั้งสูงจากพื้น 5 cm. ด้านหลังติดบานเกล็ดระบายอากาศขนาด 0.7×0.1 m.

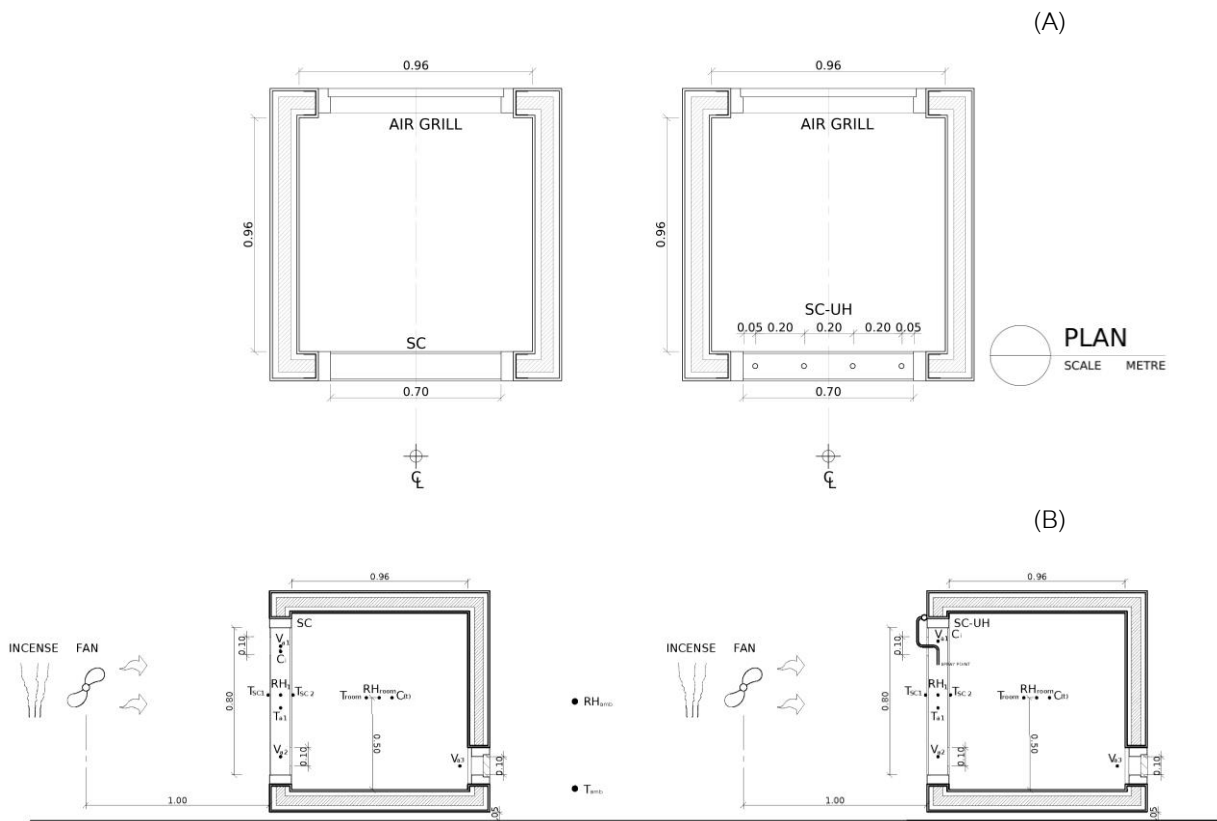


Fig. 2 A model drawing: (A) Plan; (B) section and measuring positions of experimental set-up

การติดตั้งเครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิกส์กับปล่องรังสีอาทิตย์

จากการศึกษาพบว่าการดักจับฝุ่นจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออนุภาคฝุ่นชนกับหยดน้ำที่มีขนาดเท่ากันและมีประสิทธิภาพสูงสุดในพื้นที่ที่มีอากาศแปรปรวนเพียงเล็กน้อย (Kim et al., 2020) เครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิกส์มีขนาด

หยดน้ำประมาณ 9.5 ไมครอน (Stefan Kooji, 2019) ซึ่งมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับหัวฉีดรูปแบบอื่น ผู้วิจัยจึงได้ทำการกำหนดจุดในการปล่อยละอองน้ำภายในปล่องรังสีอาทิตย์ทั้งหมด 4 จุด มีระยะห่าง 0.2 m. โดยติดตั้งสูงจากด้านล่างปล่อง 0.5 m. เพื่อให้เกิดการกระจายของละอองน้ำที่ปล่องรังสีอาทิตย์ แสดงดัง Fig. 2

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลได้มีการสอบเทียบค่ามาตรฐานเครื่องมือก่อนทำการวัดค่าและเก็บข้อมูลประกอบด้วย เครื่องมือเก็บบันทึกข้อมูล (Data Recorder) Data Logger HIOKI สำหรับบันทึกอุณหภูมิ (Temperature; °C) ร่วมกับ เทอร์โมคัปเปิล Type K OMEGA Neoflon PFA รุ่น TT-K-24 (0-260 °C, ค่าเบี่ยงเบน -18.87 °C ที่อุณหภูมิ 200°C) เครื่องวัดความเร็วลมแบบเส้นลวดความร้อน (Hot Wire Anemometer) รุ่น GM8903 (ความแม่นยำ ±1.5% + 0.2 m/s) สำหรับใช้วัดความเร็วลมของการระบายอากาศและความเร็วลมสิ่งแวดล้อม เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) Testo รุ่น Testo 480 (ช่วงการวัด 0–100% RH) เครื่องวัดละอองฝุ่นในอากาศ (Particular counters) สำหรับวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}; µm) Smartmi PM2.5 Detector (ช่วงการวัด 0–600 µm) เครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิคส์ ความถี่ 50 Hz (สามารถทำละอองน้ำได้ 1800±200 Kg/hr) จำลองฝุ่น PM จากควันธูปยาว 32 cm. และพัดลม HATARI 18" รุ่น HT-T18M3 กำลังไฟฟ้า 61 W

การเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลโดยแบ่งกรณี เป็น 2 การทดลอง

1) การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการลดฝุ่น PM_{2.5} มีรูปแบบการปล่อยละอองน้ำ 3 รูปแบบ คือปล่อยละอองน้ำเป็นเวลา 1 นาที เว้น 29 นาที (1 ธ.ค. 64), 2 นาที เว้น 28 นาที (2 ธ.ค. 64) และ 3 นาที เว้น 27 นาที (3 ธ.ค. 64) ตั้งแต่เวลา 8.00 น. – 16.00 น. (8 ชั่วโมง) จำลองฝุ่น PM จากควันธูปก่อนเปิดเครื่องทำความชื้นเป็นเวลา 5 นาที และจุดธูปใหม่ทุก 30 นาที และบันทึกข้อมูลทุก 5 นาที เป็นเวลา 1 วันต่อการปล่อยละอองน้ำ 1 รูปแบบ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดฝุ่น (n) PM_{2.5} ตาม Equation 1; C(t) คือ ความเข้มข้นของ PM ภายในกึ่งกลางบ้านทดสอบ, C_i คือ ความเข้มข้นของ PM ตั้งต้นที่ปากปล่องรังสีอาทิตย์ (Kim et al, 2020)

$$n(t) = 1 - \frac{C(t)}{C_i} \quad (1)$$

2) การทดสอบรูปแบบการปล่อยละอองน้ำที่มีประสิทธิภาพในการลดฝุ่น PM_{2.5} มากที่สุด เปรียบเทียบระหว่าง Home1 (SC) และ Home2 (SC-UH) ระยะเวลา 3 วัน (5–7 ธ.ค. 64) จำลองฝุ่น PM จากควันธูปก่อนเปิดเครื่องทำความชื้นเป็นเวลา 5 นาที จุดธูปใหม่ทุก 30 นาที บันทึกค่าความเข้มข้น PM_{2.5} และอุณหภูมิ ทุก 30 นาทีที่บ้านทดสอบทั้ง 2 หลัง เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดฝุ่น PM_{2.5} ตาม Equation 1 และทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนโดยการเก็บข้อมูลที่มีเครื่องมืออย่างจำกัด จึงทำการติดตั้งเครื่องมือที่บ้านทดสอบทั้ง 2 หลังที่ตำแหน่งเดียวกัน คือ ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 9 จุด, ตำแหน่งวัดค่าความเร็วลม 6 จุด และ ตำแหน่งวัดค่า PM_{2.5} 4 จุด แสดงใน Fig. 2

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพในการลดฝุ่น $PM_{2.5}$ โดยเปรียบเทียบการปล่อยละอองน้ำ 3 รูปแบบ

ในการทดลองที่ 1 (1 ธ.ค. 64) เปิดเครื่องทำหมอก 1 นาที เว้น 29 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพลดฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ยทั้งวัน 43.7% หลังจากเปิดเครื่องทำละอองน้ำได้ทำการวัดประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ในนาที่ที่ 5, 10, 15, 20 และ 30 พบว่าประสิทธิภาพลดฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ยทั้งวัน คือ 41%, 49.1%, 48.7%, 42.9%, 41% และ 35.4% ตามลำดับ แสดงใน Fig. 3

การทดลองที่ 2 (2 ธ.ค. 64) เปิดเครื่องทำหมอก 2 นาที เว้น 28 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพลดฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ยทั้งวัน 44.3% หลังจากเปิดเครื่องทำละอองน้ำได้ทำการวัดประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ในนาที่ที่ 5, 10, 15, 20 และ 30 พบว่าประสิทธิภาพลดฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ยทั้งวัน คือ 41.8%, 49.8%, 49.9%, 43.7%, 41.6% และ 38.7% ตามลำดับ แสดงใน Fig. 3

การทดลองที่ 3 (3 ธ.ค. 64) เปิดเครื่องทำหมอก 3 นาที เว้น 27 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพลดฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ยทั้งวัน 50.4% หลังจากเปิดเครื่องทำละอองน้ำได้ทำการวัดประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ในนาที่ที่ 5, 10, 15, 20 และ 30 พบว่าประสิทธิภาพลดฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ยทั้งวัน คือ 47.4%, 53.9%, 54.0%, 49.7%, 49.1% และ 47.8% ตามลำดับ แสดงใน Fig. 3

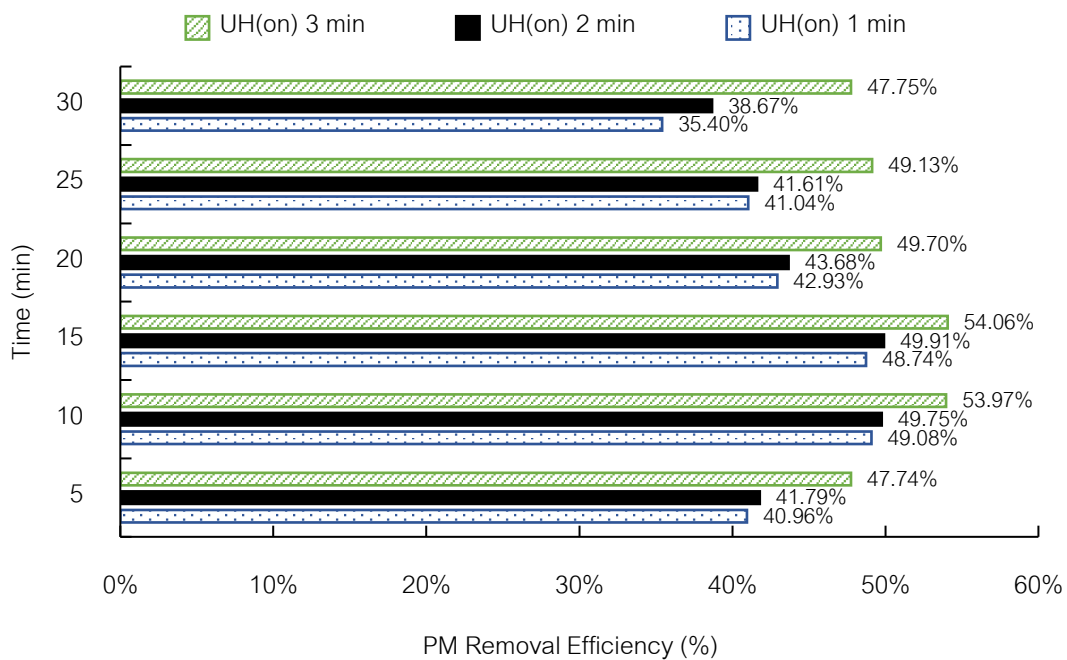


Fig. 3 Comparison of PM Removal Efficiencies according to operation time.

จากการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการลดฝุ่น $PM_{2.5}$ โดยเปิดละอองน้ำทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ารูปแบบการเปิดละอองน้ำที่มีประสิทธิภาพในการลดฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่ดีที่สุด คือรูปแบบ 3 นาที เว้น 27 นาที และมีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อทำการเปิดเครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิกส์ไปแล้ว 10-15 นาที หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลง จึงได้ทำการเลือกรูปแบบการเปิดละอองน้ำ 3 นาที เว้น 27 นาที มาทดสอบประสิทธิภาพในการลดฝุ่น $PM_{2.5}$ และประสิทธิภาพทางความร้อน โดยเปรียบเทียบบ้านทดสอบ 2 หลัง ระหว่าง Home1 (SC) บ้านทดสอบที่ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์และ Home2 (SC-UH) บ้านทดสอบที่ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ร่วมกับเครื่องทำความชื้นอัลตราโซนิกส์

Table 1 Average PM Removal Efficiency between SC and SC-UH 15 min after UH operated (6 Dec 21)

Time	Home1(SC)			Home2(SC-UH)		
	Ci	C(t)	Removal Efficiency	Ci	C(t)	Removal Efficiency
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(%)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(%)
8:15 AM	263±20	162±12	38.29%	299.5±15	118±16	60.60%
8:45 AM	343±22	225±14	34.40%	165.5±10	73±8	55.89%
9:15 AM	339±26	236±10	30.38%	269±10	120±5	55.39%
9:45 AM	211±16	139±9	34.12%	279.5±21	136±10	51.34%
10:15 AM	361±22	238±15	33.98%	206±15	101±12	50.97%
10:45 AM	499±37	324 ±16	35.07%	279.5±6	119±15	57.42%
11:15 AM	326±31	193±12	40.80%	232.5±33	111±21	52.26%
11:45 AM	439±30	273±15	37.81%	209.5±8	90±7	57.04%
12:15 PM	252±18	163±7	35.32%	213.5±25	105±7	50.82%
12:45 PM	264±20	164±16	37.88%	289.5±14	125±5	56.82%
1:15 PM	242±7	143±13	40.79%	122.5±5	55±3	55.10%
1:45 PM	219±23	138±11	36.99%	219±13	97±7	55.71%
2:15 PM	474±16	287±13	39.39%	220±16	101±6	54.09%
2:45 PM	251±18	160±8	36.25%	320±16	138±15	56.88%
3:15 PM	166±14	105±16	36.75%	145±13	69±9	52.41%
3:45 PM	218±10	140±9	35.63%	273.5±15	123±12	55.03%
Average			36.49%			54.86%

จาก Table 1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพลดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ระหว่าง Home1(SC) และ Home2(SC-UH) วันที่ 6 ธ.ค. 64 ผลการทดสอบพบว่า Home2(SC-UH) มีประสิทธิภาพลดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ เฉลี่ยในนาทีที่ 15 มากกว่า Home1(SC) 18.4% Home1(SC) มีประสิทธิภาพลดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ มากที่สุด 40.8% Home2(SC-UH) มีประสิทธิภาพลดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ มากที่สุด 60.6%

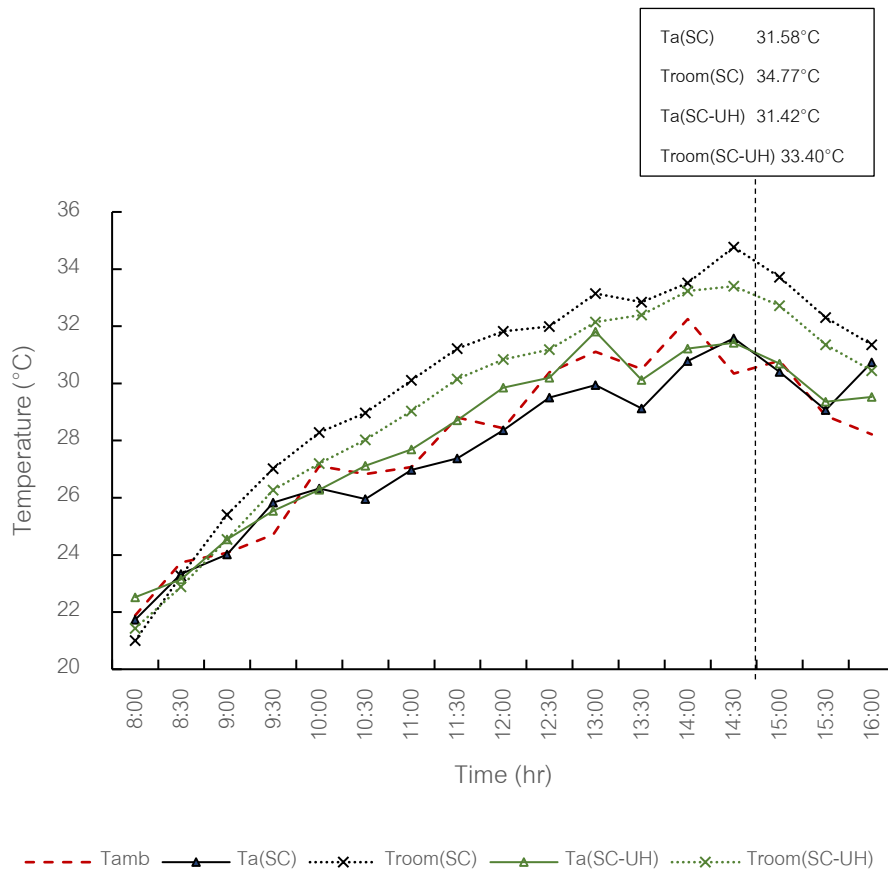


Fig. 4 Temperature Comparison of SC and SC-UH (6 Dec 21)

การเปรียบเทียบอุณหภูมิของบ้านทดสอบทั้ง 2 หลังพบว่าเกิดการสะสมความร้อนภายในบ้านทดสอบช่วงบ่ายของวัน (12.00 น. – 15.00 น.) โดย Home1(SC) มีอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงบ่าย 33.12 °C และ Home2(SC-UH) มีอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงบ่าย 32.27 °C บ้านทดสอบมีอุณหภูมิต่างกันมากที่สุดในช่วง 14.30 น. คือ 1.37 °C Home2(SC-UH) มีอุณหภูมิภายในบ้านต่ำกว่า Home1(SC) ตลอดทั้งวัน เนื่องจาก Home2(SC-UH) เปิดเครื่องทำความร้อนภายในปล่องรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งวัน ทุก 30 นาที ในขณะที่ Home1(SC) เป็นเพียงปล่องรังสีอาทิตย์จึงทำให้เกิดการสะสมความร้อนได้มากกว่า แสดงใน Fig. 4

สรุป

บ้านทดสอบ SC-UH ที่มีรูปแบบการเปิดละอองน้ำ 3 นาที เว้น 27 นาที ตัวแปรต้นคือ รูปแบบการปล่อยละอองน้ำ ปริมาตร 0.88 m³ มีประสิทธิภาพในการลดฝุ่น PM_{2.5} เฉลี่ย 54.86% ในนาทีที่ 15 และมีอุณหภูมิต่างกันมากที่สุดในช่วง 14.30 น. โดยบ้านทดสอบ SC มีอุณหภูมิมากกว่าบ้านทดสอบ SC-UH คือ 1.37 °C ซึ่งเปรียบเทียบกับ การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น PM ในระบบปิดในอดีตของ Kim et al. (2020) โดยกล่องทดลองติดตั้งเครื่องอัลตราโซนิก ร่วมกับเปียโซอิเล็กทริก ตัวแปรต้นคือระยะเวลาในการบันทึกผลค่า PM มีประสิทธิภาพในการลดฝุ่น PM_{2.5} 22.7% และ 24.4% ในนาทีที่ 30 ณ จุดวัดค่าที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

อ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2561. โครงการศึกษาแหล่งกำเนิดและแนวทางการจัดการฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในพื้นที่ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล. <https://www.pcd.go.th/airandsound>, 26 เมษายน 2564
- กรมอนามัย. 2559. คู่มือปฏิบัติงานเพื่อการตรวจประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร. <http://ghh.anamai.moph.go.th>, 12 มิถุนายน 2564
- จิรัฐพร วงศ์วัชรไพบูลย์. 2562. สถาปัตยกรรมกรองฝุ่นละออง PM2.5. <https://voicetv.co.th/read/pK4tNi2Im>, 15 เมษายน 2564
- Ananacha, T., Puangsombat, W., Hirunlarbh, J., Khedari, J. 2014. Daylighting and thermal performance of Thai modern façade wall. *Energy Procedia* 52. 14: 271–277. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.078
- Kim, D., Kim, J., Lee, S.J. 2021. Effectual removal of indoor ultrafine PM using submicron water droplets. *J. Environ.* 296. 21: 113166
- Kim, J., Kim, J.J., Lee, S.J. 2020. Efficient removal of indoor particulate matter using water microdroplets generated by a MHz-frequency ultrasonic atomizer. *Build. Environ.* 175. 20: 106797
- Kooji, S., Astefanei, A., Corthals, G.L., Bonn, D. 2019. Size distributions of droplets produced by ultrasonic nebulizers. *Sci. Rep.* 19: 6128

ประสิทธิภาพของตู้เสื้อผ้าบิวท์อินระบายอากาศ

Efficiency of Ventilated Built-in Closet

จอร์จ เคนดารี*, ธนา อนันต์อาชา

Georges Khedari*, Thana Ananacha

หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมและการออกแบบเพื่อความยั่งยืน ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Master of Architecture Program in Innovation and Designing for Sustainability, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

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

บทคัดย่อ

จากปัญหาเรื่องความชื้นสะสมในตู้เสื้อผ้า งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตู้เสื้อผ้าบิวท์อินระบายอากาศ (Ventilated Built-in Closet: VBC) เพื่อลดอุณหภูมิ ความชื้นสะสมในตู้เสื้อผ้า โดยตู้ VBC ประกอบด้วย ปล่องระบายอากาศ ติดตั้งพัดลม ขนาด 24 V ช่องระบายอากาศ (Air Gap) ขนาด 7.5 cm. และมีช่องเปิด 2 ช่อง ขนาด 1.5 × 22 cm. คือ ช่องนำอากาศเข้าบริเวณด้านล่าง และช่องเปิดด้านหลังตู้ เพื่อระบายอากาศ โดยเปรียบเทียบระหว่างตู้เสื้อผ้าที่ระบายอากาศกับไม่ระบายอากาศ จากการวัดอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม และเปรียบเทียบช่วงเวลากับรอบการทำงานของพัดลม แบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1. เปิด 20 นาที ปิด 10 นาที เฉพาะเวลากลางวัน (6:00–18:00 น.) กรณีที่ 2. เปิด 15 นาที ปิด 15 นาที และ กรณีที่ 3. เปิด 10 นาที ปิด 20 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง เก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 2 วัน ผลวิเคราะห์ พบว่าการระบายอากาศที่เหมาะสม ในเวลากลางวัน คือ กรณีที่ 1 แต่ในกลางคืน จะเป็นกรณีที่ 3 และพบว่า สามารถลดอุณหภูมิ ความชื้นในตู้เสื้อผ้า ได้อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่ 8.87 ACH

คำสำคัญ: การระบายอากาศ คุณภาพอากาศ ตู้เสื้อผ้าบิวท์อินระบายอากาศ

Abstract

This paper reports on the efficiency of a Ventilated Built-in Closet (VBC) to reduce the temperature and humidity build-up in the closet. The design included a 7.5 cm air gap at the back, 2 openings 1.5 × 22 cm at bottom and at the shelves and a 24 V ventilation fan. Temperature and relative humidity are compared between ventilated and non-ventilated wardrobes. Three fan cycles were considered. Case 1: It will turn on for 20 min, turn off for 10 min during 6:00–18:00. Case 2: Open 15 min, Close 15 min, and Case 3, Open 10 min, Close 20 min. It was found that the designed ventilated built-in wardrobe can reduce the temperature and humidity accumulation efficiently. The measured air change (ACH) of the ventilated closet is 8.87. During the day, case 1 is recommended and lead to good ventilation, whereas at night, case 3 is suitable.

Keywords: Indoor air quality, Ventilated built-in closet, Ventilation

คำนำ

ปัจจุบัน ห้องนอน เป็นมากกว่าพื้นที่สำหรับนอนหลับของผู้พักอาศัยในบ้าน ในทุกวันนี้ห้องนอน จึงเป็นพื้นที่พักผ่อน และใช้ในการทำกิจกรรมอื่น ๆ ด้วย เราใช้เวลาส่วนมากอยู่ในห้องนอน หลักการออกแบบห้องนอนในปัจจุบัน มีการจัดวางเครื่องเรือนมากมาย ซึ่ง ตู้เสื้อผ้า เป็นหนึ่งในเครื่องเรือน ที่มีความสำคัญที่สุดในห้องนอน แต่ในการศึกษา (Hyun-Hwa Lee et al., 2016) ได้พบว่า ในสภาวะที่สภาพแวดล้อมมีความชื้นสูง ตู้เสื้อผ้าบิวทอน เป็นแหล่งที่เกิดการสะสมของความชื้น และการเกิดเชื้อราในห้องนอน นำมาซึ่งปัญหาคุณภาพอากาศที่ไม่ดีของห้องนอน

จากการศึกษาคุณภาพอากาศภายในห้องนอน (Kraiwuth et al., 2021) พบว่า คุณภาพอากาศในห้องนอน ส่งผลต่อคุณภาพการนอนหลับ ประสิทธิภาพการทำงานของร่างกาย และสุขภาพของผู้พักอาศัยในห้องนอนนั้นด้วย โดยนอกจากปัจจัยด้านอุณหภูมิ และความชื้น หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ คือ เชื้อรา ที่เป็นในสาเหตุของคุณภาพการนอนหลับที่ไม่ดี ซึ่งประเทศที่มีภูมิอากาศร้อนชื้น อากาศที่มีอุณหภูมิ และความชื้นสูงเกือบตลอดทั้งปี โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 27 °C และความชื้นที่ 73-75 % (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2562) ในแต่ละภูมิภาค ของประเทศไทย มีอุณหภูมิ และความชื้นที่ใกล้เคียงกัน (Khedari et al., 2002) สภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดเชื้อรา คือ ในช่วงอุณหภูมิที่ 20-50°C และความชื้นที่ 60% ขึ้นไป เช่น ในห้องนอนที่ไม่มีการระบายอากาศ จะเกิดการสะสมของความชื้นภายในตู้เสื้อผ้า เนื่องจากการออกแบบของตู้เสื้อผ้าบิวทอน ที่เป็นลักษณะกล่องปิด ไม่มีการระบายอากาศ และไม่ได้รับแสงแดด ทำให้ภายในตู้เสื้อผ้าเกิดเชื้อราขึ้นได้ง่าย ซึ่งจะพบมากในช่วงฤดูฝนของประเทศไทย (บ้านและสวน, 2020) มีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ (ASHRAE Standard 62.1, 2016) และหลักการในการระบายอากาศ รวมถึงช่วงเวลา และรอบการทำงาน ของพัดลมระบายอากาศ (Khedari et al., 2011; Boonvayothin et al., 2011)

งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตู้เสื้อผ้าบิวทอนระบายอากาศ (VBC) ที่สามารถระบาย และศึกษาช่วงเวลา และรอบการทำงาน ของพัดลมระบายอากาศที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้า โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือ ต้นแบบของระบบระบายอากาศที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าบิวทอน ลดอุณหภูมิและความชื้นสะสมในตู้เสื้อผ้า อันเป็นสาเหตุของเชื้อราในตู้เสื้อผ้าและในห้องนอน

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบชุดทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ต้องการศึกษาดูประสิทธิภาพของตู้เสื้อผ้าบิวทอนระบายอากาศ โดยการเปรียบเทียบการระบายอากาศระหว่างตู้เสื้อผ้าบิวทอนระบายอากาศ ตู้เสื้อผ้าบิวทอนธรรมดา และห้องนอน โดยในการทดลองประกอบไปด้วยตู้ 2 ใบ ที่มีขนาดเท่ากัน ขนาด กว้าง 60 cm. ยาว 80 cm และสูง 240 cm. โดยขนาดที่ใช้ออกแบบชุดทดลอง อ้างอิงจากขนาดของตู้เสื้อผ้าขนาดเล็กทั่วไปในห้องตลาด และความสูงของห้องนอนที่ใช้ในการทดลอง โดยตู้ VBC ติดตั้งปล่องระบายอากาศ และติดตั้งพัดลมระบายอากาศ Sanyo Denki San Ace 120 เป็นพัดลมไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current fan : DC fan) ขนาด 24 V ใช้กำลังไฟฟ้า 8.16 W ขนาดของพัดลม 120 mm ให้อัตราการไหลของอากาศ 118 cfm (3.34 m³/s) มีช่องระบายอากาศ (Air Gap) ขนาด 7.5 cm. และมีช่องเปิด 2 ช่อง ขนาด 1.5 × 22 cm. คือ ช่องนำอากาศเข้าบริเวณด้านล่าง และช่องเปิดด้านหลังตู้ เพื่อระบายอากาศ ดังภาพ Fig. 1

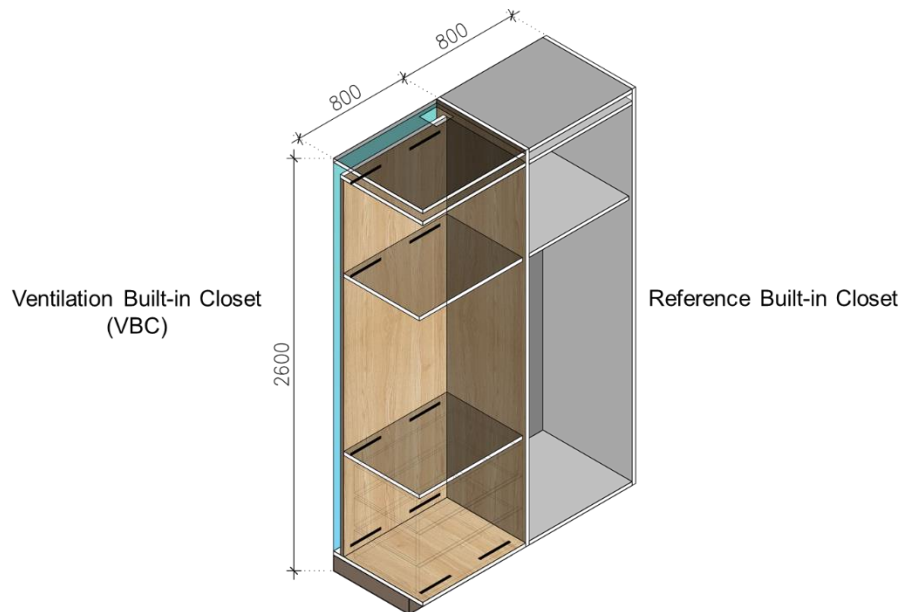


Fig. 1 Ventilation Built-in Closet (VBC) and Reference Closet (millimeter)

หลักการระบายอากาศ

ในงานวิจัยนี้ ใช้แนวความคิดในการออกแบบปล่องระบายอากาศแบบธรรมชาติ ในแนวตั้ง (Stack Ventilation) ร่วมกับช่องเปิดระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าบิวทอิน และพัดลมระบายอากาศ เนื่องจากตู้เสื้อผ้าบิวทอิน มีลักษณะเป็นกล่องปิด และส่วนด้านบนของตู้ ที่จะติดกับฝ้าเพดานกับห้องใต้หลังคาของบ้าน โดยการออกแบบช่องเปิดด้านล่าง เพื่อนำอากาศในห้องนอนเข้าสู่ภายในตู้ และระบายสู่ปล่องระบายอากาศที่อยู่ด้านหลังด้วยพัดลมระบายอากาศที่ถูกติดตั้งไว้ด้านบนติดกับฝ้าเพดาน ผ่านทางช่องระบายอากาศบริเวณด้านหลัง ในแต่ละส่วนของตู้เสื้อผ้าประกอบไปด้วยลิ้นชักด้านล่าง ราวตาก และชั้นวางด้านบน โดยใช้พัดลมระบายอากาศ ดังภาพ Fig. 2

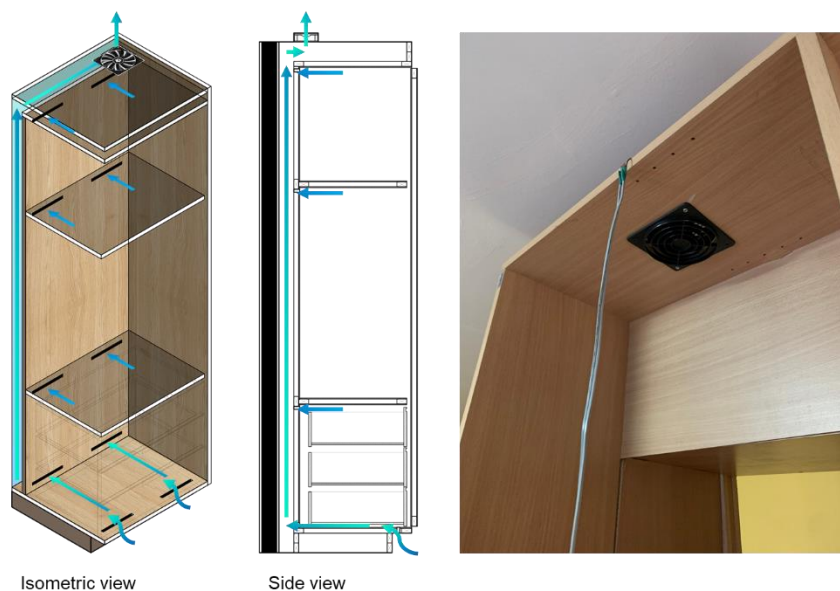


Fig. 2 Ventilation scheme of Ventilated Built-in Closet

ขนาด และตำแหน่งช่องเปิด

การคำนวณขนาดของช่องเปิด ได้คำนวณจากอัตราการระบายอากาศที่ต้องการของห้องนอน ที่มีขนาด 20 m^2 การคำนวณความต้องการระบายอากาศต่อพื้นที่ ได้จากค่ามาตรฐานความต้องการขั้นต่ำที่กำหนด คือ $1.08 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (ASHRAE Standard 62.1, 2016) ได้ค่าเท่ากับ $21.6 \text{ m}^3/\text{h}$ และเมื่อคำนวณความต้องการระบายอากาศต่อคน จากค่ามาตรฐานความต้องการขั้นต่ำที่กำหนด คือ $9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (ASHRAE Standard 62.1, 2016) โดยในงานวิจัยนี้ได้คำนวณจากการกำหนดเป็น 2 คน เนื่องจากในห้องนอนอาจมีผู้ใช้งานที่มากกว่าหนึ่งคน จึงได้เท่ากับ $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ซึ่งเมื่อคำนวณความต้องการระบายอากาศทั้งหมดพบว่า ต้องการการระบายอากาศที่ $39.6 \text{ m}^3/\text{h}$ โดยนำค่าความต้องการระบายอากาศมาคำนวณขนาดของช่องเปิด พบว่าขนาดของช่องเปิด คือ 55 cm^2 เนื่องจากในตู้เสื้อผ้ามีการใส่เสื้อผ้า ซึ่งอาจทำให้การระบายอากาศไม่สะดวก จึงได้คำนวณให้เผื่อขนาด (Safety Factor) เพิ่มขึ้น 20 % จึงได้ขนาดของช่องเปิด 66 cm^2 โดยได้แบ่งช่องเปิดเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ ช่องนำอากาศเข้าอยู่บริเวณด้านล่างของตู้เสื้อผ้า และส่วนที่ 2 คือ ช่องเปิดที่ระบายอากาศไปยังปล่องระบายอากาศที่อยู่ด้านหลัง โดยแบ่งให้ช่องเปิดอยู่ตำแหน่งซ้ายและขวาของแต่ละช่วงของปล่องระบายอากาศ (Air Gap) เพื่อให้กระจายการระบายอากาศในตู้และให้ขนาดเหมาะสมกับตู้เสื้อผ้าแสดงดังภาพ Fig. 2

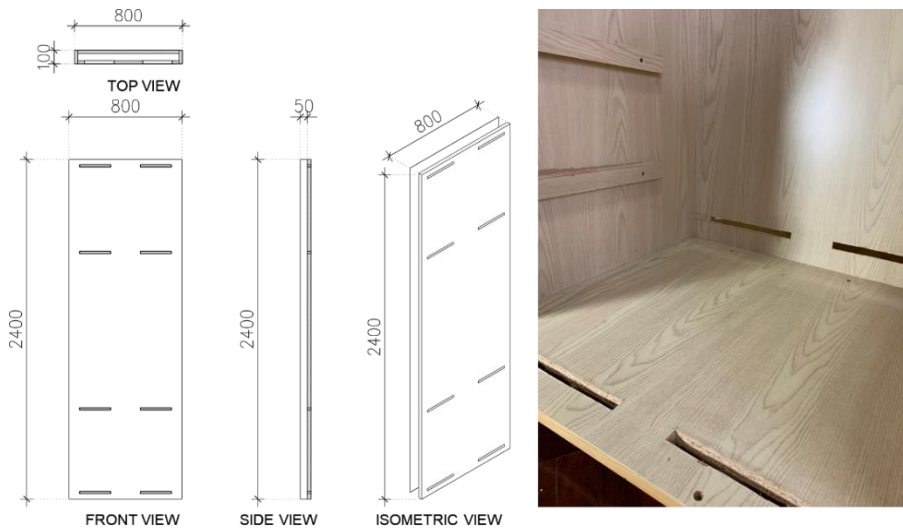


Fig. 2 Dimension and Position of Opening in the Air Gap (millimeter)

เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลได้มีการสอบเทียบค่ามาตรฐานเครื่องมือก่อนทำการวัดค่า และเก็บข้อมูลประกอบไปด้วย เครื่องมือ Testo 480 โดยใช้หัววัด Testo Module Type : 0635 1543 ในการวัดและเก็บข้อมูลความเร็วลม และใช้เครื่องมือ Airmass 2.5 Inspector Type QQPM+ Room sensor PM2.5/PM10/Temp/Hum and CO2/TVOC โดยใช้เครื่องมือ DC Voltage Regulator ในควบคุม และปรับแรงดันไฟฟ้าพัดลมระบายอากาศให้เหมาะสมต่อการระบายอากาศ

การเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้ ต้องการศึกษา และเปรียบเทียบช่วงเวลากับรอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตู้เสื้อผ้าบิวท์อินระบายอากาศ และการระบายอากาศที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าบิวท์อิน โดยวัดอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม และเปรียบเทียบระหว่างตู้เสื้อผ้าบิวท์อินที่ระบายอากาศกับตู้ไม่ระบายอากาศ ทำการทดลองในห้องนอน ที่มีขนาด 20 m^2 (กว้าง 4 m. ยาว 5 m. และสูง 2.6 m.) และมีปริมาตร 52 m^3 โดยการ

เก็บข้อมูลการระบายอากาศ ช่วงเวลา กับรอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศ แบ่งการทดลอง เป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1. เปิด 20 นาที ปิด 10 นาที เฉพาะในเวลากลางวัน (6:00 น. – 18:00 น.) เก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 2 วัน กรณีที่ 2. เปิด 15 นาที ปิด 15 นาที และในกรณีที่ 3. เปิด 10 นาที ปิด 20 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง เก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 2 วัน เนื่องจากในการศึกษางานวิจัยของ Boonvayothin et al. (2011) ได้ศึกษารอบการทำงานของพัดลมที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศในห้อง แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าบิวทอิน จึงปรับลดรอบการทำงานของพัดลมให้เหมาะสม และควบคุมพัดลมด้วย Electronic Timer เนื่องจากเครื่องมือที่มีจำกัด ในการวิเคราะห์ข้อมูล และเปรียบเทียบผลการทดลองของทั้ง 3 ชุดทดลอง จึงติดตั้งเครื่องมือทดสอบในตู้ทั้ง 2 ใบ และในห้องนอน โดยวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 3 จุดคือ ที่กึ่งกลางของตู้ทั้ง 2 ใบ และในห้องนอน และจุดวัดความเร็วลมทั้งหมด 11 จุดคือ ที่ทุกตำแหน่งของช่องเปิดระบายอากาศ และในปล่องระบายอากาศด้านหลังของตู้ VBC ที่แสดงตำแหน่งจุดวัดต่างๆ ดังภาพ Fig. 4

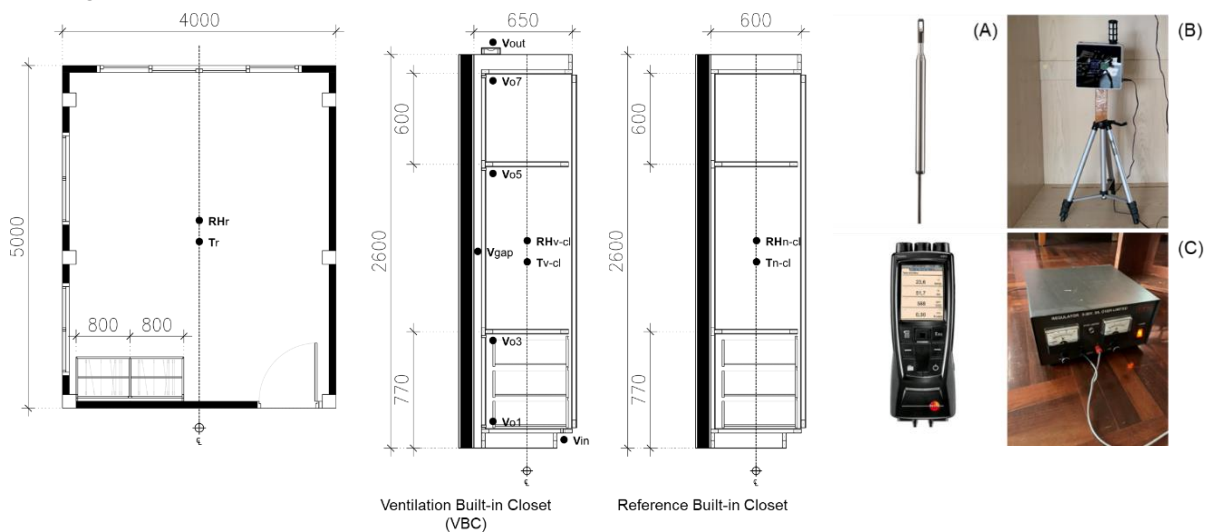


Fig. 4 Instrument Measuring point of Room, Ventilation Built-in Closet (VBC) and Reference Closet (millimeter) Testo 480 (A) Airmass 2.5 Inspector (B) and DC Voltage Regulator (C)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตู้ VBC โดยศึกษาการระบายอากาศอากาศในตู้ก่อนเปิดระบบระบายอากาศ เปรียบเทียบอุณหภูมิ และความชื้นของตู้เสื้อผ้าบิวทอินที่มีการระบายอากาศ แต่ไม่เปิดระบบระบายอากาศ กับตู้เสื้อผ้าบิวทอินที่ไม่มีระบบระบายอากาศ ในห้องนอน พบว่า ตู้ทั้ง 2 ใบ มีอุณหภูมิ และความชื้นที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ และความชื้นที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ และความชื้นของห้องที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมในแต่ละช่วงเวลา

จึงสรุปได้ว่าตู้เสื้อผ้าบิวทอินที่ไม่มีการระบายอากาศ จะมีการสะสมอุณหภูมิ และความชื้นภายในตู้เสื้อผ้า และในการทดสอบการระบายอากาศ โดยการทดลองเปิดระบบระบายอากาศ ด้วยรอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศในกรณีที่ 1 คือ เปิดพัดลม 20 นาที ปิด 10 นาที เฉพาะในเวลากลางวัน (6:00 น. – 18:00 น.) และเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 1 วัน พบว่า ในตู้ VBC และตู้เสื้อผ้าบิวทอินที่ไม่มีการระบายอากาศ มีความแตกต่างของอุณหภูมิ และความชื้นอย่างชัดเจนในเวลากลางวัน และลดลงในช่วงเวลากลางคืน เมื่อปิดพัดลมระบายอากาศ มีการสะสมของอุณหภูมิ และความชื้น ทำให้อุณหภูมิ และความชื้นระหว่างตู้ทั้ง 2 เมื่อปิดพัดลมระบายอากาศกลับมาใกล้เคียงกัน และมีการระบายอากาศที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดแสดง ดังภาพ Fig. 5

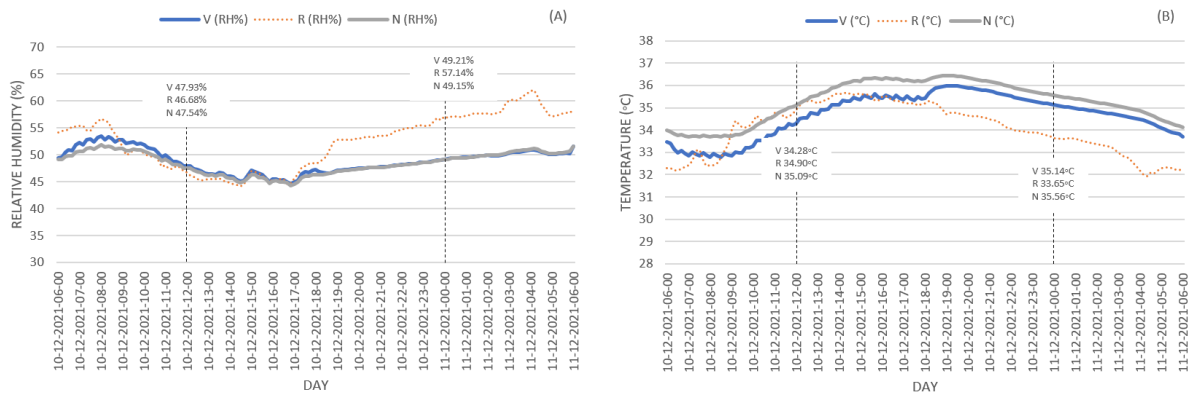


Fig. 5 Hourly variations of relative humidity; (A) and temperature; (B) of V-Closet and N-Closet compared to room temperature (series 1)

จึงสรุปได้ว่าตู้เสื้อผ้าบิวทอินที่ไม่มีการระบายอากาศ จะมีการสะสมอุณหภูมิ และความชื้นภายในตู้เสื้อผ้า และในการทดสอบการระบายอากาศ โดยการทดลองเปิดระบบระบายอากาศ ด้วยรอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศในกรณีที่ 1 คือ เปิดพัดลม 20 นาที ปิด 10 นาที เฉพาะในเวลากลางวัน (6:00 น. – 18:00 น.) และเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 1 วัน พบว่า ในตู้ VBC และตู้เสื้อผ้าบิวทอินที่ไม่มีการระบายอากาศ มีความแตกต่างของอุณหภูมิ และความชื้นอย่างชัดเจนในเวลากลางวัน และลดลงในช่วงเวลากลางคืน เมื่อปิดพัดลมระบายอากาศ มีการสะสมของอุณหภูมิ และความชื้น ทำให้อุณหภูมิ และความชื้นระหว่างตู้ทั้ง 2 เมื่อปิดพัดลมระบายอากาศกลับมาใกล้เคียงกัน และมีการระบายอากาศที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดแสดง ดังภาพ Fig. 5

จากผลการทดลองในกรณีที่ 1 จึงได้ปรับรอบการทำงาน และช่วงเวลาการทำงานของระบบระบายอากาศ โดยการเพิ่มช่วงเวลาในการทำงานของพัดลมระบายอากาศ ให้ระบายอากาศในช่วงกลางวัน และกลางคืน แต่ปรับลดรอบการทำงานของพัดลมลง เพื่อเปรียบเทียบการระบายอากาศของตู้ทั้ง 2 ใบ และรอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศ โดยทดลองรอบการทำงานในกรณีที่ 2 คือ เปิดพัดลม 15 นาที ปิด 15 นาที โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 1 วัน พบว่า ในตู้ VBC มีการระบายอากาศ มีความแตกต่างของอุณหภูมิ และความชื้น กับตู้เสื้อผ้าบิวทอินที่ไม่มีการระบายอากาศ ในช่วงเวลากลางวันที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ 1 แต่ในช่วงเวลากลางคืน พบว่า มีการระบายอากาศที่เพิ่มมากขึ้นที่แสดง ดังภาพ Fig. 6

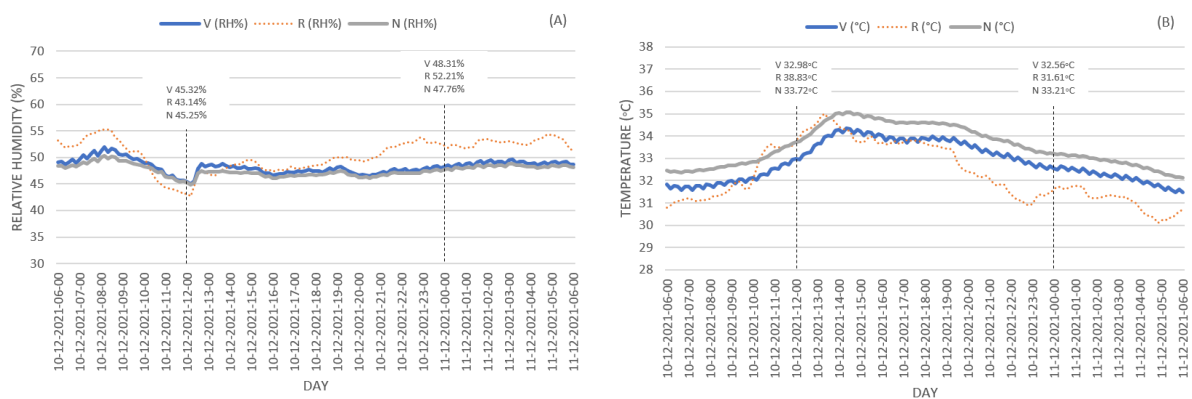


Fig. 6 Hourly variations of relative humidity; (A) and temperature; (B) of V-Closet and N-Closet compared to room temperature (series 2)

จากผลการทดลองในกรณีที่ 2 เนื่องจากมีการเพิ่มช่วงเวลาในการทำงานพัดลมระบายอากาศ ทำให้การใช้พลังงานของระบบระบายอากาศสูงขึ้น เพื่อเปรียบเทียบ และหาความเหมาะสมของรอบการทำงาน และประสิทธิภาพในการระบายอากาศ จึงได้ปรับลดระยะเวลาการทำงานของพัดลมระบายอากาศ คือรอบการทำงานของพัดลมในกรณีที่ 3 คือ เปิดพัดลม 10 นาที ปิด 20 นาที โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 1 วัน พบว่า ในตู้ VBC มีการระบายอากาศ มีความแตกต่างของอุณหภูมิ และความชื้น กับตู้เสื้อผ้าบิวทอนที่ไม่มีการระบายอากาศ ในช่วงเวลากลางวันที่ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 แต่ในช่วงเวลากลางคืน พบว่า มีการระบายอากาศลดลง น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงเวลากลางวัน ที่แสดง ดังภาพ Fig. 7

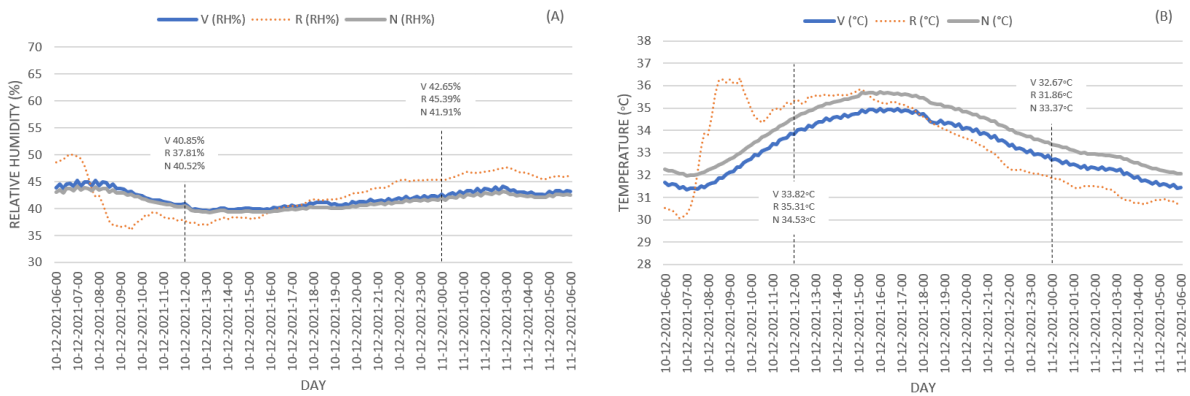


Fig. 7 Hourly variations of relative humidity; (A) and temperature; (B) of V-Closet and N-Closet compared to room temperature (series 3)

จากการทดสอบรอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศทั้ง 3 กรณี จึงได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าระบายอากาศ โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา ของตู้ VBC กับตู้เสื้อผ้าบิวทอนที่ไม่มีการระบายอากาศ ได้ผลการวิเคราะห์ ดังตาราง Table 1

Table 1 Time Schedule for fan operation and average temperatures difference between V-Closet and N-Closet

Ave temp/Percentage differences	6:00 a.m. – 9:00 a.m.		9:00 a.m. – 12:00 p.m.		12:00 p.m. – 3:00 p.m.		3:00 p.m. – 6:00 p.m.	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
20 min ON 10 min OFF (OFF at Night)	0.79	-	0.78	-	0.82	-	0.80	-
15 min ON 15 min OFF	0.72	-9.72%	0.78	0.00%	0.81	-1.23%	0.76	-5.26%
10 min ON 20 min OFF	0.64	-23.44%	0.67	-16.42%	0.74	-10.81%	0.75	-6.67%
Ave temp/Percentage differences	6:00 p.m. – 9:00 p.m.		9:00 p.m. – 12:00 a.m.		12:00 a.m. – 3:00 a.m.		3:00 a.m. – 6:00 a.m.	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
20 min ON 10 min OFF (OFF at Night)	0.48	-	0.42	-	0.42	-	0.38	-
15 min ON 15 min OFF	0.75	36.00%	0.61	31.15%	0.61	31.15%	0.61	37.70%
10 min ON 20 min OFF	0.72	33.33%	0.64	34.38%	0.62	32.26%	0.61	37.70%

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ในช่วงเวลากลางวัน รอบการทำงานของพัดลม ในกรณีที่ 1 มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงกว่า จึงให้ประสิทธิภาพการระบายอากาศที่สูงกว่า กรณีที่ 2 และ 3 ตามลำดับ แต่ในช่วงเวลากลางคืน เมื่อเปรียบเทียบรอบการทำงานของพัดลม ในกรณีที่ 2 และ 3 มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ในช่วงเวลา 9:00 น. – 12:00 น. รอบการทำงานพัดลมในกรณีที่ 1 ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า กรณีที่ 2 และ 3 ที่

9.7% และ 23.4% ตามลำดับ และจะลดลงในช่วงเวลาต่อมา แต่ในเวลากลางวัน รอบการทำงานพัดลม ในกรณีที่ 2 และ 3 ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และในช่วงเวลา 3:00 น. – 6:00 น. จะให้ประสิทธิภาพการระบายอากาศที่เท่ากัน ที่ 37.7% โดยจากการศึกษา วัดความเร็วลมที่ช่องเปิด พบว่า ความเร็วลมเฉลี่ย คือ 0.5 m/s และพบว่า สามารถระบายอากาศ ได้ อัตราการไหลของอากาศ และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่ 11.88 m³/h และ 8.87 ACH ตามลำดับ และจากการทดลอง สามารถให้อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศในห้องนอนที่ 0.23 ACH

สรุป

จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ จึงสรุปได้ว่า ระบบระบายอากาศในตู้ VBC ช่วยลดอุณหภูมิและความชื้นที่สะสมในตู้เสื้อผ้าบิวท์อินได้ และช่วยปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในห้องของบ้านพักอาศัยได้ โดยรอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าบิวท์อิน คือ ในช่วงเวลากลางวัน ให้รอบการทำงานของพัดลมเป็นกรณีที่ 1 คือ เปิดพัดลม 20 นาที ปิด 10 นาที เนื่องจากในเวลากลางวัน อุณหภูมิของห้องสูง ทำให้ประสิทธิภาพการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าบิวท์อินสูง และในเวลากลางคืนให้รอบการทำงานของพัดลมเป็นกรณีที่ 3 คือ เปิดพัดลม 10 นาที ปิด 20 นาที เนื่องจากในเวลากลางคืน อุณหภูมิของห้องต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพการระบายอากาศในตู้เสื้อผ้าบิวท์อินต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลากลางวัน ซึ่งช่วยให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้พลังงาน และช่วยประหยัดพลังงานในการใช้พัดลมในเวลากลางคืน จึงเหมาะกับการนำไปติดตั้งในห้องนอนของบ้านพักอาศัย เนื่องด้วย ตู้เสื้อผ้าบิวท์อินระบายอากาศจะช่วยระบายอากาศ ลดความร้อน ความชื้นที่สะสมในตู้เสื้อผ้า และห้องนอนในบ้านพักอาศัยได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมอุตุนิยมวิทยา. 2562. ความรู้อุตุนิยมวิทยา. <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=22>, 29 มีนาคม 2564.
- บ้านและสวน. 2020. การดูแลและทำความสะอาดเสื้อผ้าในตู้เสื้อผ้า ให้หมดปัญหากวนใจ. <https://www.baanlaesuan.com/167353/diy/mold-in-the-closet>, 25 เมษายน 2564.
- ASHRAE. 2016. ASHRAE Standard 62.1-2016 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta.
- Lee, H.-H. Oh, H.R., Lim, J.H., Song, S.Y. 2016. Evaluation of the thermal environment for condensation and mold problem diagnosis around built-in furniture in Korean. Energy Procedia 96: 601–612
- Khedari, J., Sangprajak, A., Hirunlabh, J. 2002. Thailand climatic zones. Renew. Energy 25: 267–280
- Khedari, J., Kaewruang, S., Pratinthong, N., Hirunlabh, J. 2011. Natural ventilation of houses by a Trombe wall under the climatic conditions in Thailand. Int. J. Ambient Energy 20: 85–94
- Kallawicha, K., Boonvisut, S., Chao, H.J., Nitmetawong, T. 2021. Bedroom environment and sleep quality of apartment building residents on urban Bangkok. Build Environ. 188: 107434. doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107474
- Boonyayothin, V., Hirunlabh, J., Khummongkol, P., Teekasap, S., Shin, U-S., Khedari, J. 2011. Ventilation control approach for acceptable indoor air quality and enhancing energy saving in Thailand. Int. J. Vent. 9: 315–326

การพัฒนาหน้าต่างบานฝาไหลลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารพักอาศัย

The development of falhai windows reduces heat transfer to residential buildings.

กฤษฏี บัดลี*, ธนา อนันต์อาชา

Klit patlee*, Thana Ananacha

หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขานวัตกรรมและการออกแบบเพื่อความยั่งยืน ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Master of Architecture Program in Innovation and Designing for Sustainability, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

*Corresponding author. E-mail address: 635.klit.02@gmail.com

บทคัดย่อ

จากปัญหาความร้อนเข้าสู่อาคาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารโดยมีแนวคิดมาจากบานหน้าต่างฝาไหลร่วมกับปล่องรังสีอาทิตย์ เพื่อลดอุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคาร บานฝาไหลเป็นการทำฝาไม้สองชั้นที่ดีเว้นช่องสลับกั้น หากเลื่อนมาซ้อนกันจะเป็นฝาผนังที่ทึบตัน แต่หากเลื่อนขยับฝาชั้นในก็จะทำให้เกิดช่องที่ผ่านนั้น ทำให้แสงและลมสามารถผ่านเข้าออกได้ ทำการทดลอง3กรณีเปรียบเทียบบานฝาไหลที่มีช่องว่างอากาศ 1) 2.5 ซม. กับบานหน้าต่างทั่วไป 2) 5 ซม.กับบานหน้าต่างทั่วไป 3) 10 ซม.กับบานหน้าต่างทั่วไป ทำการทดสอบวัดอุณหภูมิทุก 15 นาที ในเวลากลางวัน (8.00 น. – 16.30 น.) จากกราฟวิเคราะห์พบว่ากรณีที่3 (ช่องว่างระหว่างบาน 10 ซม.) สามารถลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบานอื่นในเวลาเวลาที่ต่างที่สุดในช่วง 14.30 น. คือ 2.27 °C

คำสำคัญ: ลดการถ่ายเทความร้อน, หน้าต่าง

Abstract

From the problem of heat entering the building. This research aims to study the efficiency of heat transfer into the building with the concept of flow-covered window panes combined with solar chimneys. To reduce the temperature transferred into the building. The flowing lid is made of two layers of wooden lids that alternately spaced each other. If sliding overlap, it will be a solid wall. But if moving the inner lid, it will cause a hole in the lid. Allowing light and wind to pass through. Three experiments were performed comparing the flow door with an air gap. 1) 2.5 cm with a general pane 2) 5 cm with a general pane 3) 10 cm with a general pane. The temperature measurement test was performed every 15 minutes during the daytime (8:00 a.m. – 4:30 p.m.). (Gap between the panels 10 cm) can reduce the heat entering the building the best when compared to other doors at the largest difference between 2.30 pm, which is 2.27 °C.

Keywords: Reduce heat transfer, Window

คำนำ

การพัฒนาหน้าต่างบานฝาไหลลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารพักอาศัย เป็นโครงการที่พัฒนาต่อยอดบานฝาไหลให้เข้ากับยุคสมัยในปัจจุบัน เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดในการใช้งานทั้งการลดความร้อนสู่อาคาร บานหน้าต่างในห้องตลาดปัจจุบันนี้มีหลายรูปแบบให้เลือกและมีการพัฒนาต่อยอดมากมายแต่มีบานหน้าต่างรูปแบบหนึ่งที่ไม่มีใครหยิบมาใช้หรือพูดถึงกันในงานออกแบบทำให้เป็นที่น่าสนใจนั่นคือ บานฝาไหล

การถ่ายเทความร้อนสู่อาคารความร้อนที่อยู่ภายในอาคารมาจากแหล่งกำเนิดความร้อน 2 ส่วน หลักๆ คือ ความร้อนจากภายนอก และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารเอง โดยทั่วไปส่วนมากแล้ว ความร้อนรวมในอาคารจะมาจากภายนอกมากกว่าและเป็นความร้อนที่ได้รับอิทธิพลจากรังสีดวงอาทิตย์ โดยการส่งผ่านความร้อนจะมาจากตัวกลางหลายชนิดมาสู่อาคาร และความร้อนเหล่านั้นก็จะส่งผ่านทางเปลือกอาคารสู่ภายในอีกชั้นหนึ่ง (การถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร, 2564) จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ปล่องรังสีอาทิตย์ (Solar Chimney) ในระหว่างวันพลังงานแสงอาทิตย์จะทำความร้อนปล่องไฟและอากาศภายในปล่องไฟทำให้เกิดอากาศ updraft ในปล่องไฟ การดูด ที่สร้างขึ้นที่ฐานของปล่องไฟสามารถใช้เพื่อระบายอากาศและทำให้อาคารด้านล่างเย็นลง การระบายอากาศตามธรรมชาติสามารถสร้างขึ้นได้โดยจัดให้มีช่องระบายอากาศที่ชั้นบนของอาคารเพื่อให้อากาศอุ่นเพิ่มขึ้นโดยการพาความร้อน และหนีออกไปด้านบน ในขณะที่เดียวกันก็สามารถดึงอากาศที่เย็นลงผ่านช่องระบายอากาศที่ระดับล่างได้ (Heat transfer through the building envelope) อาจมีการปลูกต้นไม้ไว้ที่ด้านบนของอาคารเพื่อให้อากาศภายนอกเย็นลง จึงมีแนวโน้มพัฒนาปล่องรังสีอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับบานหน้าต่างบานฝาไหล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของบานฝาไหลลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารพักอาศัย ที่สามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารระหว่างวัน อันเป็นสาเหตุของความร้อนที่สะสมในอาคาร และเพื่อศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างบานหน้าต่างบานฝาไหลกับปล่องรังสีอาทิตย์ สาเหตุที่นำบานฝาไหลมาใช้บานฝาไหลนั้นถูกหยิบยกมาพัฒนาต่อยอดน้อยมากแทบไม่มีการพูดถึงในปัจจุบันต่างจากหน้าต่างรูปแบบอื่นที่มีการพัฒนาทั้งในประเทศและต่างประเทศ จากประโยชน์ของบานฝาไหลจึงเห็นว่าเป็นไปได้สูงที่จะเหมาะกับการใช้งานในบ้านรูปแบบปัจจุบัน

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

การออกแบบชุดทดลอง

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการลดการถ่ายเทความร้อนจากบานหน้าต่างสู่ภายในอาคาร ศึกษาและทดลองในบ้านทดสอบสองหลังที่มีขนาดเท่ากัน มีขนาด กว้าง 100 ซม. ยาว 100 ซม. และสูง 140 ซม. ขนาดของบ้านทดสอบมาจากข้อกำหนดในพื้นที่ที่ใช้ทดลองและขนาดบานหน้าต่าง ทั้งสองหลังสามารถถอดและใส่หน้าต่างที่นำมาทดลองได้ โดยหน้าต่างมีขนาด 80 × 110 ซม. และช่องเปิดด้านหลังเพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์เข้าไปเก็บข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนได้ทำการหันหน้าบ้านทดสอบไปทางทิศใต้เพื่อรับแสงแดด ทำการทดสอบที่ลานกว้างบ้านพักอาศัย เขตตลาดพร้าว กรุงเทพมหานคร เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล ประกอบไปด้วย 1) Data logger HIOKI สำหรับบันทึกอุณหภูมิ 2) สายเทอร์โมคัปเปิล ติดตามตำแหน่งต่างๆที่ติดตั้งในบ้านทดสอบ แสดงดังภาพ Fig. 1



Fig. 1 A model in the experiment

ภายในบ้านทดสอบมีขนาด $100 \times 100 \times 150$ ซม. ทำจากไม้อัดขนาด 10 มม. ตั้งสูงจากพื้น 5 ซม. ด้านหลังเปิดช่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์และระบายอากาศขนาด 60×40 ซม.

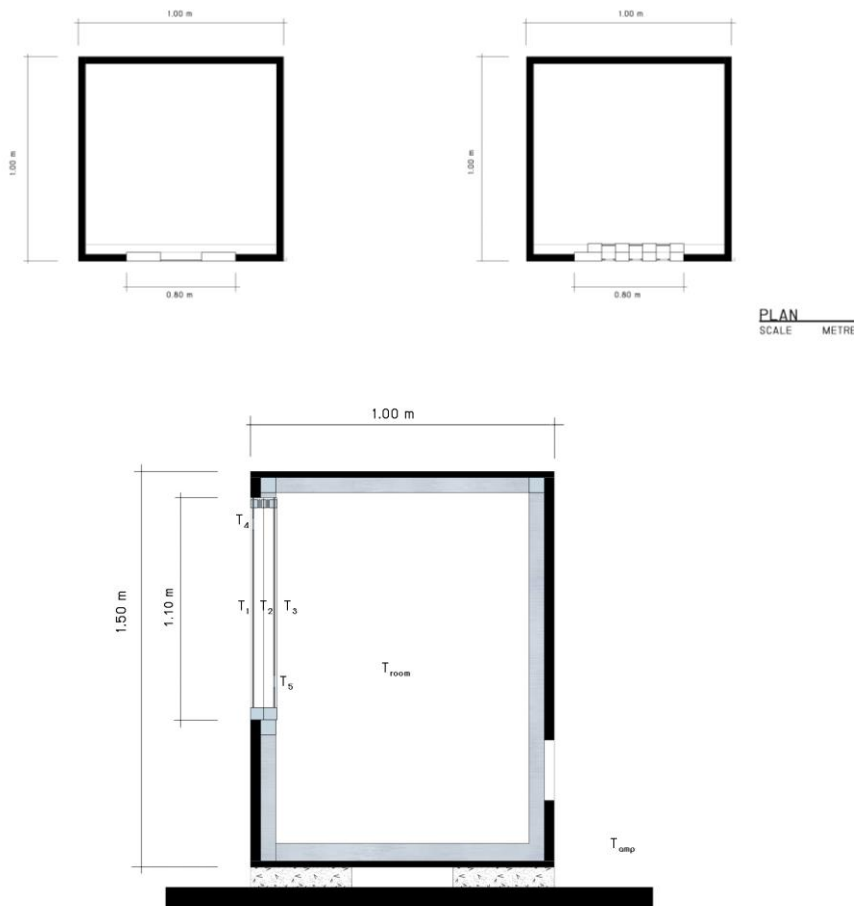


Fig. 2 A model drawing Plan: section and measuring position of experimental set-up.

ขนาดและตำแหน่งช่องเปิดของบานหน้าต่าง

ฝ้าไหลเป็นการทำฝ้าไม้สองชั้นที่ตีเว้นช่องสลักกัน หากเลื่อนมาซ้อนกันจะเป็นฝ้าผนังที่ทึบตัน แต่หากเลื่อนขยับฝ้าชั้นในก็จะทำให้เกิดช่องที่ฝ้านั้น ทำให้แสงและลมสามารถผ่านเข้าออกได้ หน้าต่างที่ใช้ในการทดลองมีการดัดแปลงมาจากฝ้าไหลดั้งเดิมโดยมีการติดกระจกระหว่างซี่บานที่เคยเป็นช่องว่างทั้งสองฝั่งทำการเปิดช่องอากาศโดยนำทฤษฎีปล่องรังสีแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดเป็นช่องว่างอากาศระหว่างฝานอกและฝ้าใน โดยขนาดช่องว่างมีขนาด 2.5 ซม. 5 ซม. 10 ซม. โดยขนาด 2.5 ซม. อ้างอิงมาจากขนาดของฝ้าไหลดั้งเดิม 10 ซม. อ้างอิงจากขนาดความกว้างของกำแพงบ้านพักอาศัยทั่วไปขนาด 5 ซม. อ้างอิงจากค่ากึ่งกลางที่เหมาะสมระหว่าง 2.5 ซม. กับ 10 ซม.ตามลำดับที่แสดงในภาพ Fig. 3

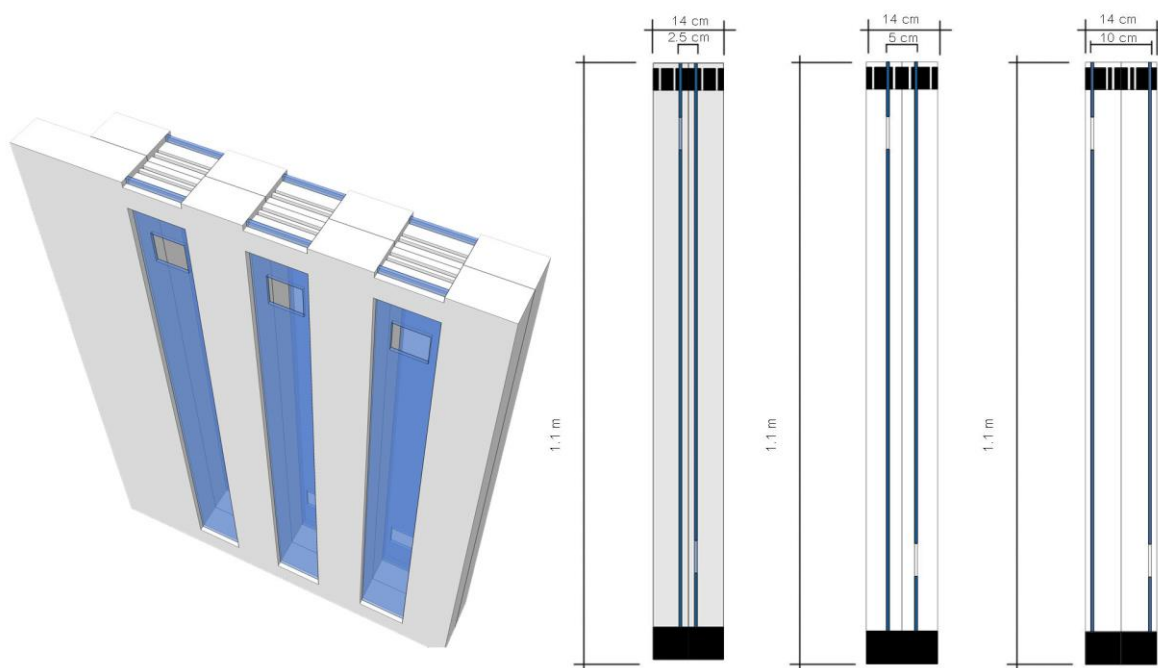


Fig. 3 Window model in the experiment

เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล ประกอบไปด้วย

- 1) Data logger HIOKI สำหรับบันทึกอุณหภูมิ
- 2) สายเทอร์โมคัปเปิล ติดตามตำแหน่งต่างที่ติดตั้งในบ้านทดสอบ

การเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้ ต้องการศึกษ การลดการถ่ายเทความร้อน เปรียบเทียบช่วงเวลา เพื่อศึกษาการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารโดยใช้รูปแบบบานหน้าต่างฝ้าไหลร่วมกับการทำงานของปล่องรังสีอาทิตย์ เก็บข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างหน้าต่างบานฝ้าไหลกับหน้าต่างReference(หน้าต่างทั่วไปที่มีหน้าตัดเท่ากับหน้าตัดบานฝ้าไหล) แบ่งเป็น 3 การทดลอง

- 1) Window1 air gap 2.5 cm. กับ Window Reference
- 2) Window2 air gap 5 cm. กับ Window Reference
- 3) Window3 air gap 10 cm. กับ Window Reference ทำการเก็บข้อมูลทุก15นาทีตั้งแต่เวลา 8.00 a.m. – 16.30 p.m.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 หน้าต่างบานฝาไหล air gap 2.5 cm. (9 ธันวาคม 2564) วัดอุณหภูมิทุก 15 นาที พบว่าอุณหภูมิในบ้านทดลองทั้งสองหลังมีความใกล้เคียงกันมีเพียงช่วงเวลา 15.45 น. ที่บ้านทั้งสองหลังมีอุณหภูมิต่างกันเกิน 1° เพียง 2 ช่วงเวลาเท่านั้น แสดงใน Fig. 4

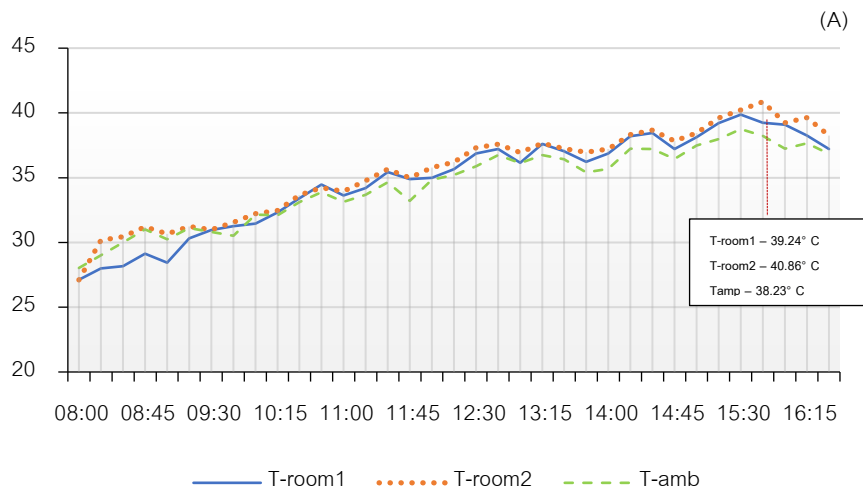


Fig. 4 Temperature graph window air gap 2.5 cm

การทดลองที่ 2 หน้าต่างบานฝาไหล air gap 5 cm. (15 ธันวาคม 2564) วัดอุณหภูมิทุก 15 นาที พบว่าอุณหภูมิในบ้านทดลองทั้งสองหลังมีความใกล้เคียงกันในช่วงเวลา 8.00 น. – 15.00 น. มีเพียงเวลา 16.15 น. บ้านทดลองหลังที่ 1 ที่ใช้บานฝาไหลเริ่มมีอุณหภูมิภายในห้องต่างกับบ้านทดลองหลังที่ 2 อย่างชัดเจนที่ 1°C ตั้งแต่ช่วงเวลา 15.00 น. – 16.30 น. แสดงใน Fig. 5

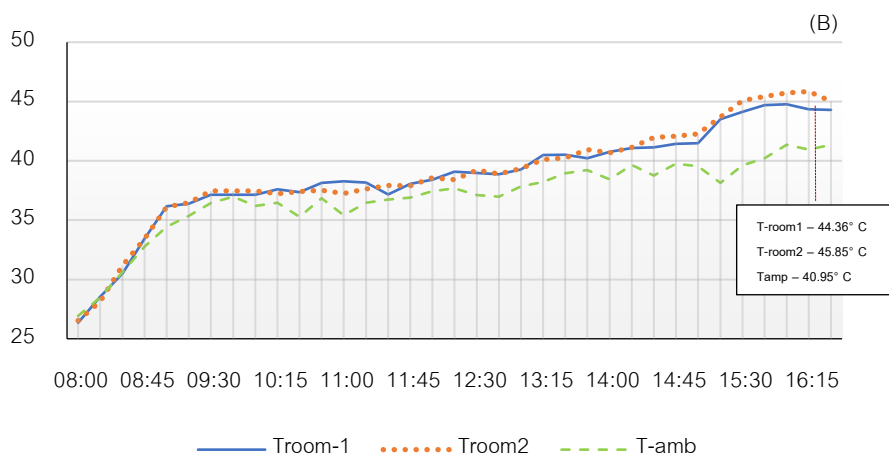


Fig. 5 Temperature graph window air gap 5 cm

การทดลองที่ 3 หน้าต่างบานฝาไหล air gap 10 ซม. (21 ธันวาคม 2564) วัดอุณหภูมิทุก 15 นาที พบว่าอุณหภูมิในบ้านทดลองทั้งสองหลังมีความใกล้เคียงกันในช่วงเวลา 8.00 น. – 13.00 น. หลังจาก 13.00 น. บ้านทดลอง

หลังที่ 1 ที่ใช้บานฝาไหลเริ่มมีอุณหภูมิภายในห้องต่างกับบ้านทดลองหลังที่ 2 อย่างชัดเจนที่ 1–2 °C ตั้งแต่ช่วงเวลา 13.00 น. – 16.30 น. ซึ่งช่วงเวลาที่อุณหภูมิต่างกันมากที่สุดคือ 14.30 น. ที่ 2.27 °C แสดงใน Fig. 6

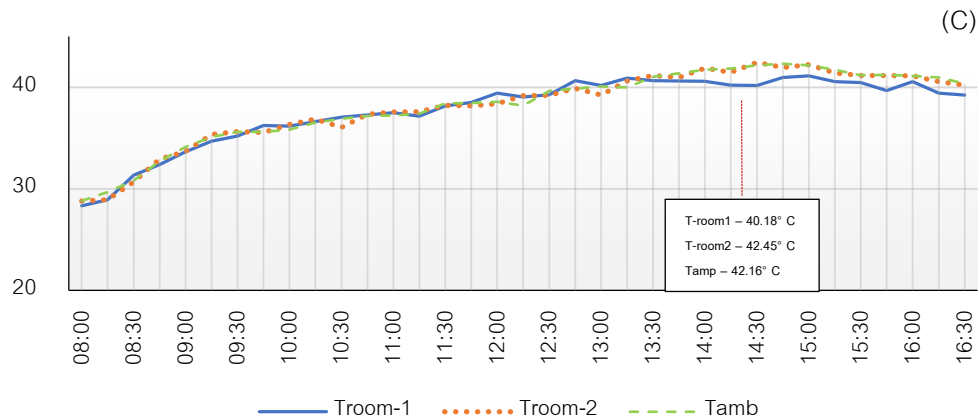


Fig. 6 Temperature graph window air gap 10 cm

จากการทดลองเบื้องต้นทั้ง 3 การทดลองพบว่า ยังมี air gap กว้างมากเท่าไรประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิยิ่งดีขึ้น ขนาดที่ดีที่สุดคือ air gap 10 cm. เห็นได้ชัดว่าช่วงเวลาที่อุณหภูมิในบ้านทดลองต่างกันและรักษาอุณหภูมิที่ลดลงได้เป็นเวลานานขึ้น แม้ในช่วงเช้า 8.00 น. – 12.00 น. จะมีอุณหภูมิที่ไม่ต่างกัน จึงได้นำกราฟอุณหภูมิ air gap ทั้ง 3 ขนาดมาเปรียบเทียบกันพบว่า อุณหภูมิใน air gap 10 cm. มีความคงที่ตั้งแต่ช่วงเวลา 9.00 น. – 16.30 น. ซึ่งต่างกับขนาด 2.5 ซม. และ 5 ซม. เมื่อเลยเวลา 14.00 น. ไปแล้วอุณหภูมิใน air gap พุ่งสูงขึ้นอย่างชัดเจน แสดงใน Fig. 7

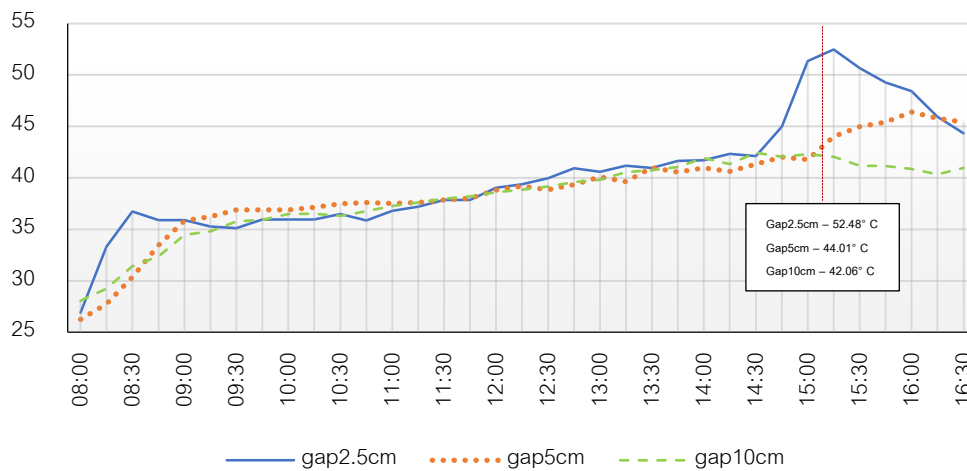


Fig. 7 Temperature graph air gap

สรุป

จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ จึงสรุปได้ว่า บานหน้าต่างลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารพักอาศัย สามารถลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้จริง โดยประสิทธิภาพการลดความร้อนเข้าสู่อาคารขึ้นอยู่กับช่องอากาศระหว่างบาน (air gap) ยิ่งมีพื้นที่ช่องอากาศมากช่วงเวลาที่สามารถลดความร้อนสามารถคงสภาพการลดความร้อนได้ไวขึ้น ขนาด 2.5 cm ไม่เห็นผลที่ชัดเจน ขนาด 5cm เริ่มมีการลดความร้อนเข้าสู่อาคารช่วงเวลา 15.30 น. ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 1°C ขนาด 10 ซม. เริ่มมี

การลดความร้อนเข้าสู่อาคารช่วงเวลา 13.30 น. ที่อุณหภูมิ 1–2 °C แสดงให้เห็นว่ายิ่งมีความกว้างของช่องอากาศมาเท่าไรๆ สภาพะการลดอุณหภูมิจะเกิดไวขึ้นและคงที่ได้ดีกว่า ดังทฤษฎีปล่องรังสีอาทิตย์ที่นำมาใช้ สามารถใช้ในงานสถาปัตยกรรมได้ จึงมีความเห็นว่าบานหน้าต่างลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารพักอาศัยเหมาะกับอาคารพักอาศัยในปัจจุบันเนื่องจากผู้คนที่อาศัยบ้านพักอาศัยในปัจจุบันมักปิดหน้าต่างเวลาออกไปทำงานหรือไปธุระหากเปิดทิ้งไว้จะเป็นอันตรายในหลายๆ ด้านทำให้มีการเก็บสะสมความร้อนระหว่างวันการนำบานหน้าต่างลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารพักอาศัยจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในบ้านปัจจุบันเพราะสามารถลดความร้อนได้จริง

เอกสารอ้างอิง

- กรมอุตุนิยมวิทยา. 2562. ความรู้อุตุนิยมวิทยา. <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=22>, 29 มีนาคม 2564.
- กระทรวงพลังงาน. 2553. รายงานไฟฟ้าของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน, 29 มีนาคม 2564.
- การถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร. 2563. Heat transfer through the building envelope. <https://ienergyguru.com/2015/09/heat-transfer-through-the-building-envelope>, 25 มกราคม 2565
- Wikipedia. 2563. ปล่องไฟพลังงานแสงอาทิตย์ – Solar chimney, <https://isecosmetic.com/wiki/Solarchimney>, 25 มกราคม 2565
- สำนักส่งเสริมศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2564. พิพิธภัณฑ์เรือนโบราณล้านนา มช. <https://art-culture.cmu.ac.th/Museum/contentdetail/1269>
- จิระเดช เทพพิพิธ. 2555. เปรียบเทียบประสิทธิผลของค่าสัมประสิทธิ์ในกระจกและแผงบังแดด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิกรม จ้านงคจิตต์. 2501. ประสิทธิภาพของการออกแบบการระบายอากาศช่องใต้หลังคาเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อน จากหลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- Sanjuan, C., Suarez, M.J., Gonzalez, M., Pistono, J., Blanco, E. 2011. Energy performance of an open-joint ventilated facade compared with a conventional sealed cavity facade. *Solar Energy* 85: 1851–1863.

การประเมินความเป็นไปได้ในการนำแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนจากรถยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่เป็นระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาในประเทศไทย

Assessment of repurposing lithium-ion batteries from electric vehicles for co-energy storage system of solar rooftop in Thailand

นิติชัย เหลืองอร่าม*, กุสกานา กุบาฮา, รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ

Nitichai Luangaram*, Kuskana Kubaha, Roongrojana Songprakorp

หลักสูตรสาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Energy Management Technology Program, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: nitichai-tee@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินความเป็นไปได้ของการนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ทั้ง 4 ด้าน คือด้านเทคนิค, สิ่งแวดล้อม, การเงิน, และสังคม การประเมินด้านเทคนิคทำนายข้อมูลด้วยวิธีการแยกส่วนประกอบร่วมกับสมการถดถอยเพื่อให้ทราบจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าและจำนวนครัวเรือนที่ติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ การประเมินด้านสิ่งแวดล้อมพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากการใช้แบตเตอรี่และพลังงานแสงอาทิตย์แทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบกริด การประเมินด้านการเงินพิจารณา NPV, IRR และ PB การประเมินด้านสังคมพิจารณาแบบสำรวจจากกลุ่มตัวอย่าง 400 คน เพื่อประเมินความต้องการของผู้ตอบแบบสำรวจ โดยประยุกต์ใช้หลักการบ้านแห่งคุณภาพ ผลการวิจัยพบว่าการนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่มีความเป็นไปได้เมื่อมีการพิจารณาค่าความอ่อนไหวของตัวแปร โดยราคาของแบตเตอรี่ที่น่ากลับมาใช้ใหม่มีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า 33% ของแบตเตอรี่ใหม่ และเพิ่มค่า DOD ในการใช้แบตเตอรี่เป็น 50% รวมถึงการให้ความรู้และมีการพัฒนาเทคโนโลยีให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานมากที่สุด

คำสำคัญ: การกักเก็บพลังงาน, การประเมินความเป็นไปได้, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, พลังงานแสงอาทิตย์, รถยนต์ไฟฟ้า

Abstract

This research studies feasibility of repurposing batteries in four factors that are technical, environmental, financial, and social. The technical feasibility applies the method of decomposition and regression analysis to forecast the data. The environmental feasibility considers reducing carbon dioxide emissions in the case of using batteries with solar rooftops. The financial feasibility considers NPV, IRR, and PB. The social feasibility considers interviews from a sample group of 400 people. These data are used for the evaluated requirement by applying the method of "House of Quality". The results show that repurposing batteries are possible when there are considering sensitivity analysis of parameters. The cost of repurposing batteries should be adjusted equal or lower to 33%, and increasing the DOD is 50%. In addition, educating most people and improving the technology to respond to customer needs are important for the feasibility.

Keywords: Battery Lithium-ion, Electric vehicles, Energy storage, Feasibility assessment, Solar energy

คำนำ

ประเทศไทยในปัจจุบัน มีผู้สนใจใช้รถยนต์ไฟฟ้าและการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามากขึ้น เมื่อแบตเตอรี่เสื่อมสภาพ ทำให้ซากของแบตเตอรี่โดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสะสมเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการจัดการซากของแบตเตอรี่อย่างถูกวิธีจะช่วยลดมลพิษรวมไปถึงต้นทุนการจัดการที่ต่ำลง วิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือการนำแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่หรือการเปลี่ยนวัตถุประสงค์การใช้งานใหม่ (Repurposing process) (Rallo et al., 2020) โดยนำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วจากรถยนต์ไฟฟ้านำกลับมาใช้ใหม่เป็นระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

ข้อดีของการนำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากจะช่วยลดมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อม (Maria et al., 2019) ยังช่วยลดต้นทุนการผลิต ส่งผลทำให้ราคาของแบตเตอรี่ลดลง ประมาณ 55% ของราคาแบตเตอรี่ใหม่ (Shijie et al., 2017; Engy, 2019; Graber et al., 2019) แต่ข้อเสียคือปริมาณค่าความจุพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงเหลือ 70-80% จากปริมาณค่าความจุพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลูกใหม่ (Llcu et al., 2019; Elisa et al., 2020) และเนื่องจากค่าความต้านทานภายในที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ช่วงอายุการใช้งานในครั้งที่สองสั้นลง จากตัวอย่างงานวิจัยของ Maria et al. (2019) และ Elisa et al. (2020) สามารถทำนายช่วงอายุคร่าว ๆ ได้จากจุดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของค่าความจุพลังงานและค่าความต้านทานภายในเมื่อช่วงอายุการทำงานที่มากขึ้น ซึ่งจุดนี้เรียกว่าจุดหัวเข่า (Knee point) โดยช่วงอายุการทำงานเฉลี่ยจากผลของค่าความจุพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงประมาณ 70-80% มีค่าประมาณ 6-12 ปี (Llcu et al., 2019) ซึ่งผลจากปริมาณค่าความจุพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงส่งผลให้ขนาดของแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่มีขนาดเพิ่มมากขึ้นประมาณ 20-22% (Andoni et al., 2015; Engy et al., 2019; Graber et al., 2019)

แต่ถึงแม้การนำแบตเตอรี่กลับมาใช้งานใหม่เป็นครั้งที่สอง ยังมีข้อเสียในประเด็นต่าง ๆ ดังที่กล่าวมา แต่ก็มีงานวิจัยต่าง ๆ ทดลองและแสดงให้เห็นว่าการนำแบตเตอรี่จากรถยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่เป็นครั้งที่สองมีศักยภาพเพียงพอ (Jason and Lukas, 2012; Catherine et al., 2014; Shijie et al., 2017; Eklas et al., 2019) ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงศักยภาพและแนวทางของประเทศไทยในการนำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจากรถยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่เป็นระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา โดยทำการประเมินความเป็นไปได้ในมิติต่างๆ 4 ด้านคือการประเมินทางด้านเทคนิค, สิ่งแวดล้อม, การเงิน, และสังคม

อุปกรณ์และวิธีการ

การประเมินความเป็นไปได้ในแต่ละด้านมีวิธีในการพิจารณาหาความเป็นไปได้ที่แตกต่างกันดังแสดงใน Table 1

Table 1 The methodology to use for evaluation in each factor

The feasibility assessment	Methodology
1. Technical feasibility	Forecasting tendency by using decomposition method and regression analysis (Data from May 2021 until the year of 2036)
2. Environmental feasibility	Calculation of carbon emission and carbon price
3. Financial feasibility	Considering net present values (NPV), internal rate of return (IRR), and payback period (PB)
4. Social feasibility	Analyzing questionnaires from a sample group of 400 people by using the house of quality in Quality Function Deployment (QFD)

การประเมินทางด้านเทคนิค (Technical feasibility)

การประเมินทางด้านเทคนิคพิจารณาความสอดคล้องของจำนวนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจากรถยนต์ไฟฟ้าและจากครัวเรือนที่ติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา โดยทำนายแนวโน้มของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าและจำนวนครัวเรือนที่ติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งประยุกต์ใช้วิธีในการทำนายอนุกรมเวลาแบบแยกตัวประกอบ (Decomposition method) และการวิเคราะห์หาค่าการถดถอย (Regression analysis) โดยข้อมูลตั้งต้นในการทำนายแบ่งพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ

กรณีฐาน: คือข้อมูลที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลทางสถิติย้อนหลังของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดสะสมที่จดทะเบียนในประเภท รย.1 (รถยนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 คน) จากกรมการขนส่งทางบก (2020) และข้อมูลทางสถิติย้อนหลังของจำนวนผู้ติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ (kWp) ที่ขึ้นทะเบียนในโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ภาคประชาชน (การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.), 2021; การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.), 2021) โดยมีขั้นตอนในการทำนายข้อมูล (Equation 1–8) แสดงใน Table 2

กรณีส่งเสริม: คือข้อมูลการทำนายแนวโน้มจากวิสัยทัศน์ขององค์กรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าอ้างอิงข้อมูลจากคณะกรรมการนโยบายยานยนต์พลังงานไฟฟ้าแห่งชาติ (2021) และจำนวนผู้ติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ (kWp) พิจารณาจากการทำนายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ในแผน PDP 2018 ของกระทรวงพลังงาน (2019)

โดยการประเมินด้านเทคนิคจะมีความเป็นไปได้เมื่อจำนวนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสะสมจากรถยนต์ไฟฟ้ามีมากเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นระบบกักเก็บพลังงานให้กับครัวเรือนที่มีการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

Table 2 The process of forecasting by using decomposition method and regression analysis

The process of forecasting	Input / Equation
1. Accumulative data for the basic forecasting	- Electric cars from past to May 2021 - Households that installed solar rooftops (10 kWp) from past to May 2021
2. Find moving averages (MA _t) and centered moving average (CMA _t)	$MA_t = \frac{Y_{t-2} + Y_{t-1} + Y_t + Y_{t+1}}{4^{**}} \quad (1)$ $CMA_t = \frac{MA_t + MA_{t+1}}{2} \quad (2)$
	When Y _t is accumulative data in each month (Actual data) ** The forecasting of electric cars is divided by 5.
3. Find the seasonal (S _t) and irregular variation (I _t)	$S_t \times I_t = \left(\frac{Y_t}{CMA_t} \right) \quad (3)$
4. Find average seasonal variation by using Microsoft excel	$S_{t,avg} = AVERAGEIF(X_t, \text{Quarter 1}, S_t \times I_t) \quad (4)$ When X _t is the number of data in one quarter (X ₁ , X ₂ , X ₃ , and X ₄)
6. Deseasonalized (DS _t)	$DS_t = \left(\frac{Y_t}{S_t} \right) \quad (5)$
7. Find tendency of data (T _{DS_t})	$T_{DS_t} = a + bt_t \quad (6)$ When a, b are coefficients to do a forecast t _t is an integer number from 1, 2, 3, ...
8. The forecasting data (F _t)	$F_t = T_{DS_t} \times S_t \quad (7)$
9. Considering error by using SMAPE (Symmetric Mean Absolute Percentage Error)	$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{ Y_t - \hat{Y}_t }{(Y_t + \hat{Y}_t)/2} \quad (8)$ When Y _t is actual data Ŷ _t is forecasting data n is a number of data

การประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental feasibility)

การประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมพิจารณาจากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจากการใช้แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่นำกลับมาใช้ใหม่เป็นระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ในการจ่ายโหลดทางไฟฟ้าทั้งหมดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบกริด สมมติฐานการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อครัวเรือนภายในหนึ่งวันจากการคำนวณคือ 50.64 กิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) และพิจารณาการใช้โหลดแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือการใช้โหลดเต็มพิกัด (100%) และการใช้โหลดบางส่วน (50%) โดยสามารถคำนวณปริมาณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากสมการ (Equation 9):

$$\text{Reducing CO}_2 \text{ emission [kgCO}_2\text{e]} = \text{Saving energy [kWh]} \times \text{Emission factor} \quad (9)$$

ค่า Emission factor ในสมการที่ 9 คือค่าคงที่ที่ใช้เปลี่ยนค่าการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง เป็นค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และสามารถคำนวณราคาซื้อขายคาร์บอนตามข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2021) ซึ่งได้ระบุราคาซื้อขายเฉลี่ยต่อตันของพลังงานแสงอาทิตย์คือ 100 บาท (100 THB/ tCO₂e) โดยการประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมจะมีความเป็นไปได้เมื่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มีการปลดปล่อยที่ลดลง

การประเมินทางการเงิน (Financial feasibility)

การประเมินทางการเงินพิจารณาการลงทุนและผลประโยชน์ต่อครัวเรือนที่มีการใช้แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้านำกลับมาใช้ใหม่ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดถูกจ่ายจากระบบนี้เท่านั้น การวิเคราะห์พิจารณาดัชนีชี้วัดทางการเงิน 3 ตัว คือ NPV, IRR, และ PB ดังแสดงใน Table 3 และมีสมมติฐานในการประเมินดังแสดงใน Table 4 (Equation 10–12):

Table 3 Three indicators for considering financial feasibility

Indicators	Equation
1. Net Present Value: NPV	$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{NCF_n}{(1+i)^n} \quad (10)$ <p>When NCF is net cash flow at year n i is discount rate N is second life batteries lifespan [years] If NPV > 0, it is feasible to invest.</p>
2. Internal Rate of Return: IRR	$\sum_{n=0}^N \frac{NCF_n}{(1+IRR)^n} = 0 \quad (11)$ <p>If IRR > i (discount rate), it is feasible to invest.</p>
3. Payback Period: PB	$PB = \text{Years before full recovery} + \frac{\text{Unrecoverd cost at start of the year}}{\text{cash flow during the year}} \quad (12)$ <p>If PB > second life batteries lifespan, it is feasible to invest.</p>

Table 4 Assumed parameters for considering financial feasibility

Parameters	Values	Parameters	Values
1. Specification of battery**	48 V, 100 Ah per unit	7. price of new battery**	45,000 THB/ unit
2. Inverter efficiency	90%	8. price of repurposing battery	~ 55% of new battery
3. DOD of battery	30%	9. Installation/ service cost **	10,000 THB
4. Energy consumption	~50.64 kWh/ day/ household	10. Value added tax (Vat)	7%
5. Discount rate	6%	11. Maintenance cost**	1% per year
6. Electricity price	Based on data of MEA (residential type1, 150 units up)	12. second life batteries lifespan	6–12 years

**The data from a private company, the second-life batteries have capacity about 70–80% of new batteries.

แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่นำกลับมาใช้ใหม่พิจารณาว่าความจุพลังงานไฟฟ้าเป็น 70–80% ของแบตเตอรี่ใหม่ (Llcu et al., 2019; Elisa et al., 2020) และราคาของแบตเตอรี่คิดเป็น 55% ของแบตเตอรี่ใหม่ (Shijie et al., 2017; Engy, 2019; Graber et al., 2019) ดังแสดงใน Table 4 เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังศึกษาวิจัยถึงความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการใช้งาน ดังนั้นจึงไม่มีข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับค่าความจุพลังงานไฟฟ้าและราคาของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่นำกลับมาใช้ใหม่

การประเมินทางด้านสังคม (Social feasibility)

ในการประเมินทางด้านสังคมพิจารณาข้อมูลที่ได้จากแบบสำรวจจากกลุ่มตัวอย่าง 400 คน โดยแบบสำรวจถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ คำถามทั่วไปเพื่อประเมินความสนใจต่อเทคโนโลยี และคำถามในการเรียงลำดับความสำคัญที่ผู้ตอบแบบสำรวจมีความต้องการให้เทคโนโลยีถูกพัฒนาเพื่อตอบโจทย์ผู้ใช้งานมากที่สุด ในประเด็นหลังได้มีการประยุกต์ใช้บ้านแห่งคุณภาพ (House of quality) ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของเทคนิค QFD (Quality Function Deployment) มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การประเมินทางด้านเทคนิค (Technical feasibility)

ผลการประเมินจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่สะสมและจำนวนครัวเรือนที่ติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยโดยการทำนายแนวโน้มแสดงใน Fig. 1 ค่าข้อมูลเชิงตัวเลขและค่าความคลาดเคลื่อนแสดงใน Table 5

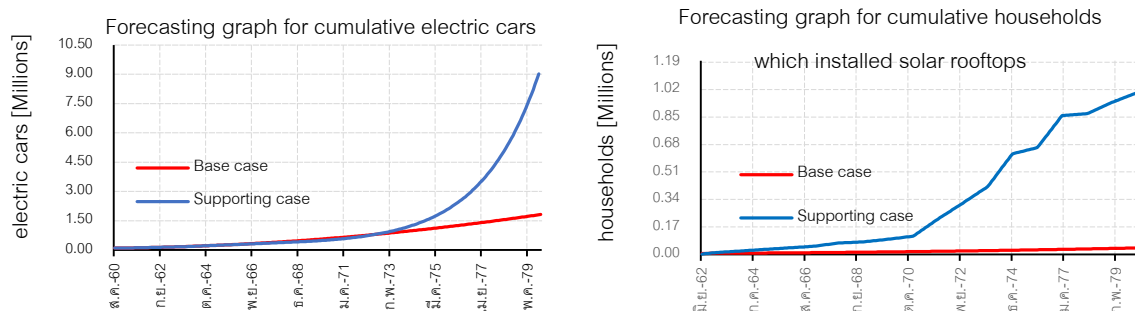


Fig. 1 Forecasting graph for cumulative electric cars (Left), Forecasting graph for cumulative households which installed solar rooftops (Right)

Table 5 The numerical data and error from forecasting electric cars and households which installed solar rooftop

The considered data	Number of cumulative electric cars [cars]		Number of cumulative households which installed solar rooftops [households]	
	Base case	Supporting case	Base case	Supporting case
	Past until May 2021	200,529	200,529	7,542
Future (December 2036)	1,821,707	9,302,668	39,558	1,000,000
Error (SMAPE)	19%	-	46%	-
The difference of the cumulative data $ \sum Actual - \sum forecast $	0.0106%	-	0.447%	-

Table 6 The power capacity of second-life batteries from forecasting electric cars and households which installed solar rooftop

The considered data	Power capacity of cumulative electric cars [MWh]		Power capacity of cumulative households which installed solar rooftops [MWh]	
	Base case	Supporting case	Base case	Supporting case
	Past until May 2021	14,037	14,037	1,414
Future (December 2036)	127,519	651,187	7,420	187,574

จากข้อมูลใน Table 5 พบว่าจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าสะสมมีปริมาณที่มากกว่าจำนวนครัวเรือนสะสมที่มีการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยข้อมูลจากการทำนายจนถึงปี ค.ศ. 2036 ในกรณีฐานมีจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่มากกว่าประมาณ 46 เท่า และกรณีส่งเสริมมีจำนวนที่มากกว่าประมาณ 9 เท่า ในส่วนของค่าความจุพลังงานไฟฟ้าจากข้อมูลใน Table 6 ค่าความจุพลังงานไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าสะสมในกรณีฐานมีค่ามากกว่าประมาณ 17 เท่า และกรณีส่งเสริมมีค่ามากกว่าประมาณ 3 เท่า ดังนั้นการนำแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่จึงมีความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิค

การประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental feasibility)

ผลการประเมินปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงและผลกำไรจากการขายปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงใน Table 7

Table 7 The quantities and profits of reducing carbon dioxide emission

The considered data	The quantities of reducing carbon dioxide emission [tCO ₂ e/ year]		The profits from reducing carbon dioxide emission [THB/ year]	
	Energy consumption (100%)	Energy consumption (50%)	Energy consumption (100%)	Energy consumption (50%)
	Past until May 2021	78,213	39,106	7,821,298
Future (December 2036)				
- Base case	410,229	205,115	41,022,925	20,511,463
- Supporting case	10,370,323	5,185,162	1,037,032,343	518,516,171
**Considering per household	10.228	5.114	10,22.83	511.41

**This data is used in financial feasibility.

จากข้อมูลใน Table 7 พบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีจำนวนที่ลดลง โดยในปี ค.ศ. 2036 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีฐานที่ใช้โหลด 100% ลดลง 410,229 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี และในกรณีส่งเสริมที่ใช้โหลด 100% ลดลง 10,370,323 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยปริมาณเหล่านี้ถูกนำไปซื้อขายสร้างกำไรและผลประโยชน์ต่าง ๆ ดังนั้นการประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมจึงมีความเป็นไปได้

การประเมินทางการเงิน (Financial feasibility)

ผลการประเมินทางการเงินโดยใช้สมมติฐานตาม Table 4 พบว่าดัชนีการประเมินทั้ง 3 แบบไม่ผ่านเกณฑ์ความคุ้มค่าที่จะลงทุน (NPV < 0, IRR < 6% และ PB > 6 ปี) ดังแสดงใน Table 8 จากการวิเคราะห์พบว่า มี 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความคุ้มค่าในการลงทุน คือราคาที่สูงและค่า DOD ที่ต่ำของแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ เมื่อทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยการปรับค่าของ 2 ตัวแปรนี้ ส่งผลทำให้ค่าดัชนีทั้ง 3 แบบมีค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากการประเมินพบว่าเมื่อพิจารณาราคาของแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ลดลงเท่ากับหรือน้อยกว่า 33% ของแบตเตอรี่ใหม่และเพิ่มค่า DOD ของแบตเตอรี่เป็น 50% ส่งผลทำให้ค่าดัชนีในการประเมินทางการเงินทั้ง 3 แบบผ่านเกณฑ์ความคุ้มค่าที่จะลงทุน ดังนั้นภาพรวมของการนำแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่อีกครั้งจึงมีความเป็นไปได้ทางการเงินบนเงื่อนไขการพิจารณาเรื่องราคาและค่า DOD ของแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่อย่างเหมาะสม

Table 8 The financial evaluation (NPV, IRR, PB) and considering sensitivity analysis

Indicators	Base case	Sensitivity analysis				
		Cost 45%	Cost 35%	DOD 40%	Cost 35%, DOD 40%	Cost 33%, DOD 50%
1. NPV [THB]	-692,180.69	-495,161.69	-298,142.69	-414,333.39	-121,330.77	7,994.52
2. IRR [%]	-21	-16	-10	-14	-2	7
3. PB [years]	14.61	11.67	8.88	10.51	6.5	4.81

การประเมินทางด้านสังคม (Social feasibility)

ผลการประเมินทางด้านสังคมแสดงใน Fig. 2 การวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าผู้ตอบแบบสำรวจมีความเห็นจำนวน 351 คน ในเรื่องของการลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้จริง แต่ผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 274 คน ยังตัดสินใจที่จะใช้แบตเตอรี่ใหม่มากกว่า เป็นผลมาจากผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ไม่มีความรู้เชิงลึกและไม่ได้ให้ความสนใจในการใช้เทคโนโลยีนี้ แต่อย่างไรก็ตามในการสำรวจประเด็นลำดับความสำคัญที่ผู้ตอบแบบสำรวจต้องการมากที่สุดในการพัฒนาระบบคือเรื่องความปลอดภัย โดยเน้นไปที่การรักษาสมดุลของโมดูลแบตเตอรี่ที่นำมาต่อกันเป็นหลัก ดังนั้นการประเมินทางด้านสังคมจึงมีความเป็นไปได้บนเงื่อนไขของการให้ความรู้และให้ความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีให้ตอบสนองต่อความต้องการผู้ใช้งานมากที่สุด

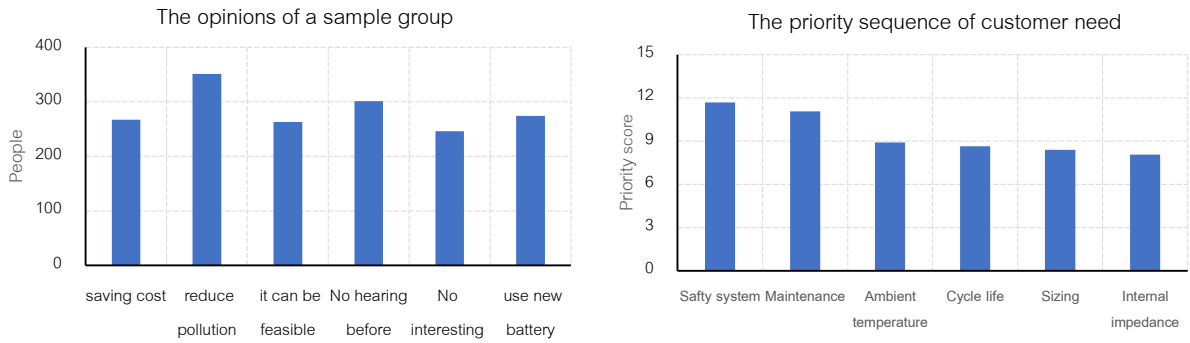


Fig. 2 The graph of the opinions of a sample group (Left) and the priority sequence of a customer need (Right)

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจากรถยนต์ไฟฟ้า นำกลับมาใช้ใหม่เป็นระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา โดยการประเมินได้ทำการพิจารณาในมิติต่าง ๆ ทั้ง 4 ด้านคือ ทางด้านเทคนิค, ด้านสิ่งแวดล้อม, ด้านการเงิน, และด้านสังคม ผลจากงานวิจัยสรุปได้ว่าการประเมินทางด้านเทคนิคมีความเป็นไปได้เนื่องจากการทำนายแนวโน้มจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าสะสมมีปริมาณที่มากพอต่อจำนวนครัวเรือนที่ติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ ในส่วนการประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมมีความเป็นไปได้เนื่องจากปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณที่ลดลง นอกจากนี้ยังมีข้อมูลจากแบบสำรวจที่สนับสนุนปัจจัยนี้จากผู้ตอบแบบสำรวจ ในส่วนการประเมินทางการเงินพบว่า เมื่อพิจารณาข้อมูลจากสมมติฐาน ส่งผลทำให้การพิจารณาค่า NPV, IRR, และ PB อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่คุ้มทุนที่จะลงทุน แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของข้อมูลโดยปรับราคาของแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ลดลงเท่ากับหรือน้อยกว่า 33% ของแบตเตอรี่ใหม่ และเพิ่มค่า DOD ของแบตเตอรี่เป็น 50% พบว่าการประเมินดัชนีทั้ง 3 แบบอยู่ในเกณฑ์ที่มีความเป็นไปได้ที่จะลงทุน แต่อย่างไรก็ตามการปรับค่า DOD ของแบตเตอรี่ส่งผลทำให้ช่วงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงและอาจจะไม่เป็นไปตามข้อมูลที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับช่วงอายุการทำงานในครั้งที่สอง ซึ่งประเด็นนี้ยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้อย่างชัดเจนว่าจำนวนช่วงชีวิตที่สองของแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่จะมีค่าการใช้งานมากน้อยเพียงใด และประเด็นสุดท้ายคือการประเมินทางด้านสังคม ซึ่งผลจากการรวบรวมแบบสำรวจพบว่าผู้ตอบแบบสำรวจส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะซื้อแบตเตอรี่ใหม่เนื่องจากยังขาดความรู้เชิงลึกและความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยี แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการให้ข้อมูลข่าวสาร, ความรู้และพัฒนาเทคโนโลยีให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของความปลอดภัยก็จะส่งผลทำให้เทคโนโลยีนี้มีความเป็นไปได้ในประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ หลักสูตรสาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำปรึกษาและข้อคิดต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

กรมการขนส่งทางบก. 2563. จำนวนรถจดทะเบียนสะสม จำแนกตามชนิดเชื้อเพลิง (รายปี). <https://web.dlt.go.th>

/statistics/, 18 กันยายน 2563.

กระทรวงพลังงาน. 2562. แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580 (PDP 2018).

- <http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/PDP2018.pdf>, 29 พฤศจิกายน 2564.
- การไฟฟ้านครหลวง. 2564. ประกาศรายชื่อโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์. <https://www.me.a.or.th/minisite/vspp/download/841/?page=1>, 29 พฤศจิกายน 2564.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2564. รายชื่อผู้ผ่านการคัดเลือกการจัดหาไฟฟ้า โครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา สำหรับภาคประชาชนประเภทบ้านอยู่อาศัย. <https://ppim.pea.co.th/project/solar/VSP-RT1/result>, 29 พฤศจิกายน 2564.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2564. ราคาคาร์บอนเครดิต. <http://carbonmarket.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=aG9tZQ==>, 29 พฤศจิกายน 2564.
- Andoni, S.D.I., Egoitz, M.L., Daniel, I.S., Maciej, S., Pedro, R. 2015. Sizing study of second life Li-ion batteries for enhancing renewable energy grid Integration. IEEE Industry Application Society.
- Catherine, H., Sean, B.W., Steven, B.Y., Michael, F. 2014. Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling. *Energy Policy* 71: 22–30.
- Elisa, B., Idoia San, M., Alberto, B., Pablo, S., Alfredo, U. 2020. Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles. *J. Energy Storage* 32: 101695.
- Engy, A.M.M.H. 2019. Impact of second-life batteries on enhancing the Integration of renewable energy Resources. M.Sc. thesis, The University of Waterloo. Ontario, Canada. pp. 46–78.
- Graber, G., Calderaro, V., Galdi, V., Piccolo, A. 2019. Sizing of II-Life Batteries for Grid Support Applications and Economic Evaluations. In *Proceeding of the 8th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*. pp. 80–88.
- Jason, L., Lukas, S. 2012. Battery storage for residential electricity peak demand shaving. *Energy Build.* 55: 685–692.
- Lluc, C.C., Amante, B., Camille, C. 2019. Second life batteries lifespan: rest of useful life and environmental analysis. *J. Environ. Manage.* 232: 354–363.
- Maria Anna, C., Francesco, G., Sonia, L., Marco, F., Maurizio, C. 2019. Energy and environmental benefits of circular economy strategies: The case study of reusing used batteries from electric vehicles. *J. Energy Storage* 25: 100845.
- Rallo, H., Benveniste, G., Gestoso, I., Amante, B. 2020. Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries. *Resour. Conserv. Recy.* 159: 104785.
- Shijie, T., Tsz, F., Matthew, P.K., David, A.W., Jae, W.P. 2017. Demonstration of reusing electric vehicle battery for solar energy storage and demand side management. *J. Energy Storage* 11: 200–210.

ออกแบบโปรแกรมแบบจับต้องสำหรับหุ่นยนต์แขนกลชนิด 6 แกนด้วยรหัสแท่งแบบ 2 มิติชนิด Apriltag

Design tangible programming by apriltag for 6 axis robot arm

วัชรินทร์ ขาวบุบผา*, ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว

Watchrin Kaobuppa*, Natavut Kwankeo

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

* Corresponding author; e-mail address: watchrin.ka@ku.th

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์แขนกลเป็นเครื่องจักรสำคัญในอุตสาหกรรมยุค 4.0 ที่จะเข้ามาทดแทนแรงงานมนุษย์การเรียนรู้เกี่ยวกับแขนกลจึงเป็นเรื่องสำคัญ การนำเอาเทคนิคการโปรแกรมแบบจับต้องได้มาใช้ในการศึกษาการทำงานของหุ่นยนต์ทำให้สามารถเรียนรู้ได้ง่าย และรับรู้ถึงการตอบสนองต่อคำสั่งได้ในทันทีโดยวิธีการที่ใช้ในการโปรแกรมหุ่นยนต์คือการใช้รหัสแท่งแบบ 2 มิติชนิด Apriltag ร่วมกับการประมวลผลภาพจากเทคโนโลยี OpenMV ร่วมกับภาษาไมโครไพทอนซึ่งทำงานได้บนระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นจะมีส่วนของแขนกลชนิด 6 แกนที่ประกอบไปด้วย ฐาน หัวไหล่ ข้อศอก และมือจับ และอุปกรณ์รับคำสั่งอยู่ในตัวเดียวกัน และสามารถควบคุมได้ทั้งจากการโปรแกรมด้วยภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้ และภาษาไมโครไพทอนโดยการควบคุมทำได้ทั้งรูปแบบการควบคุมที่ละมอเตอร์ไปจนถึงสั่งงานควบคุมระยะทางที่แขนกลจะต้องเคลื่อนที่ไปในพื้นที่ทำงานซึ่งในการทำงานในแต่ละรอบจะใช้เวลาในการทำงานเฉลี่ย 3 วินาทีตั้งแต่การอ่านจนจบคำสั่งด้วยความถูกต้องในการรับคำสั่งมีค่าอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของแขนกลจะอยู่ที่ $\pm 1-2$ เซนติเมตร

คำสำคัญ: โปรแกรมแบบจับต้องได้, หุ่นยนต์แขนกล, Apriltag

Abstract

Industrial 4.0 is a trend of technology to replace human workers with the robot arm. Workers have to know about robot arms. Tangible programming is an easy learning method to know how to control a robot because it uses a physical command to control and receive respond from the robot currently. A tangible programming use Apriltag, which is a 2-dimension barcode, and OpenMV with micro-python to input command to a microcontroller. A robot in this project has a robot arm 6 axis that it has base, shoulder, elbow, wrist and gripper. It on top of a microcontroller with a camera therefore robot can un-plug programming. The robot control method has directly controlled motor and distance between reference points. Respond per command is 3 second and respond commands correctly has 100 percent. Tolerant of position of robot is ± 1 to 2 centimeters

Keywords: Apriltag, Robot arm, Tangible programming

คำนำ

อุตสาหกรรม 4.0 คือการพัฒนาระบบการทำงานโดยการนำระบบอัตโนมัติ ระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องจักรและเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเข้ามาใช้งานเพื่อทำให้สามารถผลิตสินค้าได้อย่างแม่นยำ และมีจำนวนมากยิ่งขึ้น (วิกิพีเดีย, 2556) โดยแขนกลอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อทดแทนแรงงานมนุษย์ ซึ่งในระบบการศึกษาได้เพิ่มการเรียนรู้เกี่ยวกับแขนกลไปในระดับชั้นต่างๆ และตั้งพื้นที่สำหรับศึกษาเรียนรู้เกี่ยวกับหุ่นยนต์แขนกลเพิ่มมากขึ้น (ผู้จัดการออนไลน์, 2562) โดยการสั่งงานควบคุมแขนกลนั้นอยู่ในรูปแบบการใช้ภาษาโปรแกรมแบบอักขระหรือภาษาโปรแกรมในรูปแบบบล็อก (Weintrop et al., 2018) โดยในปัจจุบันวิธีการโปรแกรมที่ได้รับความนิยมสำหรับการใช้กับผู้เริ่มต้นการเรียนรู้เกี่ยวกับการโปรแกรมคอมพิวเตอร์คือภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้ด้วยการทำให้คำสั่งในการโปรแกรมสามารถเข้าใจได้ง่ายโดยการใช้อักษรระดับสูง และทำให้การตอบสนองต่อคำสั่งของผู้ใช้งานสามารถรับรู้ได้โดยตรง (Sapounidis and Demetriadis, 2017) ซึ่งภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้จึงเป็นวิธีการที่งานวิจัยนี้นำเสนอมาใช้ในการควบคุมสั่งงานหุ่นยนต์แขนกลเพื่อพัฒนาให้หุ่นยนต์แขนกลสามารถเรียนรู้ได้ง่ายยิ่งขึ้นกว่าวิธีการแบบเดิมที่เป็นภาษาโปรแกรมแบบอักขระ และภาษาโปรแกรมแบบบล็อก (Bravo et al., 2017) โดยภาษาที่ใช้ในการสร้างวิธีการโปรแกรมภายในหุ่นยนต์นั้นคือภาษาที่มีชื่อว่า ภาษาไมโครไพทอน (Micro-python) เป็นภาษาที่มีพื้นฐานมาจากภาษาไพทอนซึ่งเป็นภาษาที่ได้รับความนิยมในการใช้งานสูงเป็นอันดับต้นของโลก (Cass, 2020) และเป็นภาษาที่ประเทศไทยนำมาใช้ในการสอนในวิชาเทคโนโลยีวิทยาการคำนวณในระดับชั้นมัธยมศึกษา (ศรีคำเวียง, 2561) โดยภาษาไมโครไพทอนนั้นสามารถเขียนลงบนระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญที่ทำให้งานวิจัยเลือกมาใช้งานโดยในภาษาไมโครไพทอนนั้นมีการพัฒนาให้สามารถใช้งานระบบการประมวลผลภาพที่มีชื่อว่า OpenMV ที่เป็นแพลตฟอร์มที่มีฟังก์ชันในการประมวลผลรหัสแท่งแบบ 2 มิติชนิด Apriltag ซึ่งเป็นรหัสที่ใช้งานได้ในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์โดย Apriltag นั้นมีจุดเด่นอยู่ที่การอ่านได้ง่าย และอ่านได้ทุกทิศทางซึ่งทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายในสภาพแวดล้อมต่างๆ (Olson, 2011; Wang and Olson, 2016) เพื่อทำให้การเรียนรู้เกี่ยวกับแขนกลครบถ้วนคำสั่งที่ได้จากป้ายคำสั่งจะมีความสามารถเทียบเท่ากับการโปรแกรมด้วยภาษาโปรแกรมแบบอักขระ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสามารถควบคุมหุ่นยนต์แขนกลได้ทั้งรูปแบบของการโปรแกรมด้วยภาษาไพทอน และภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้โดยใช้การสั่งงานผ่าน Apriltag ซึ่งทำให้สามารถต่อยอดการเรียนรู้จากการโปรแกรมแบบจับต้องได้ไปสู่การโปรแกรมแบบอักขระ จนนำไปสู่การพัฒนาทักษะความเข้าใจเกี่ยวกับแขนกลมากยิ่งขึ้นซึ่งก่อให้เกิดทักษะทางอาชีพในการทำงานในยุคอุตสาหกรรมแบบ 4.0

อุปกรณ์และ วิธีการ

ออกแบบหุ่นยนต์แขนกล และอุปกรณ์รับคำสั่ง

หุ่นยนต์แขนกลที่ใช้เป็นหุ่นยนต์ชนิด 6 แกน และใช้มอเตอร์ประเภทเซอร์โวชนิด SG90 และ MG996R ซึ่งทำหน้าที่ในการหมุนส่วนข้อต่อต่างๆ ของแขนกลโดยการสั่งงานจะได้รับมาจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น weact stm32h743 ที่ทำการติดตั้งระบบ OpenMV เพื่อใช้ในการอ่าน Apriltag โดยเมื่อทำการทดสอบพบว่าการทำงานของมอเตอร์นั้นสามารถสั่งงานได้ด้วยสัญญาณ Duty cycle ที่มีคาบขนาด 20 มิลลิวินาทีได้ตั้งแต่ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของ duty cycle โดยหากสั่งเกินจะเกิดสภาวะทำงานผิดปกติที่ตัวมอเตอร์ขึ้นเพื่อป้องกันในการสั่งงานจะไม่สามารถสั่งงานได้เกินช่วงทำงานที่ปลอดภัย และเมื่อนำไปประกอบร่วมกับหุ่นยนต์โดยอ้างอิงสัดส่วนของแขนคนจะประกอบไปด้วย ฐาน (Base) หัวไหล่ (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) ข้อมือส่วนแนวตั้ง (Wrist vertical) ข้อมือส่วนหมุน (Wrist rotation) มือจับ (Gripper) ดัง Fig. 1 โดยการเคลื่อนที่ของกลไกจะเกิดการติดขัด (Dead point) ได้เมื่อเคลื่อนที่ไปเกินขอบเขตของการ

ทำงานโดยที่มือจับจะสามารถเคลื่อนที่ได้อยู่ระหว่างค่า duty cycle ระหว่าง 7 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์ส่วนที่ข้อต่ออื่นสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดทั้งช่วงของมอเตอร์

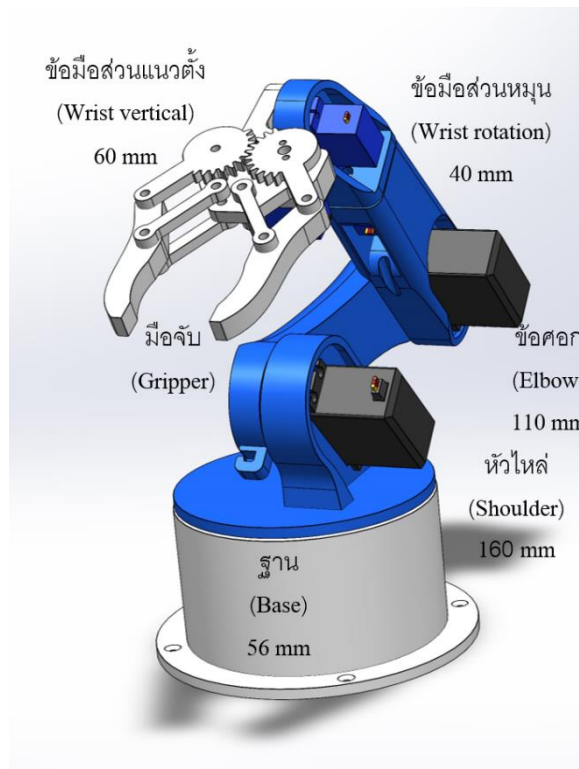


Fig. 1 Part of Robot Arm

แขนกลทำการติดตั้งอยู่ส่วนบนของฐานสำหรับวางหุ่นยนต์ และกล่องสำหรับรับภาพอยู่ด้านหน้าของหุ่นยนต์ เพื่อใช้สำหรับรับภาพจากป้ายคำสั่งซึ่งทำให้อุปกรณ์รับคำสั่ง และแขนกลสามารถเคลื่อนย้ายไปได้พร้อมกัน (Fig 2) โดยพื้นที่การทำงานของแขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้รอบตัว และลงต่ำได้มากกว่าฐานของตัวแขนกลโดยการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในหุ่นประกอบไปด้วยส่วนของแหล่งพลังงานรับจากแบตเตอรี่ขนาด 1000 มิลลิแอมป์ชั่วโมงขนาดแรงดัน 11.1 โวลต์ต่อเข้ากับวงจรปรับแรงดันเพื่อลดแรงดันลงเหลือ 5 โวลต์ และจ่ายพลังงานไปยังบอร์ดเชื่อมต่อกกลางของหุ่นยนต์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับบอร์ดคอนโทรลเลอร์ และชุดมอเตอร์แขนกลโดยบอร์ดเชื่อมต่อกกลางจะทำหน้าที่เชื่อมต่อกับทั้งมอเตอร์ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และอุปกรณ์ปรับระดับแรงดันเพื่อปรับแรงดันจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จาก 3.3 โวลต์เป็น 5 โวลต์เพื่อให้เหมาะกับการสั่งงานมอเตอร์ดัง Fig. 3



Fig. 2 Robot Arm 6 axis with OpenMV Camera

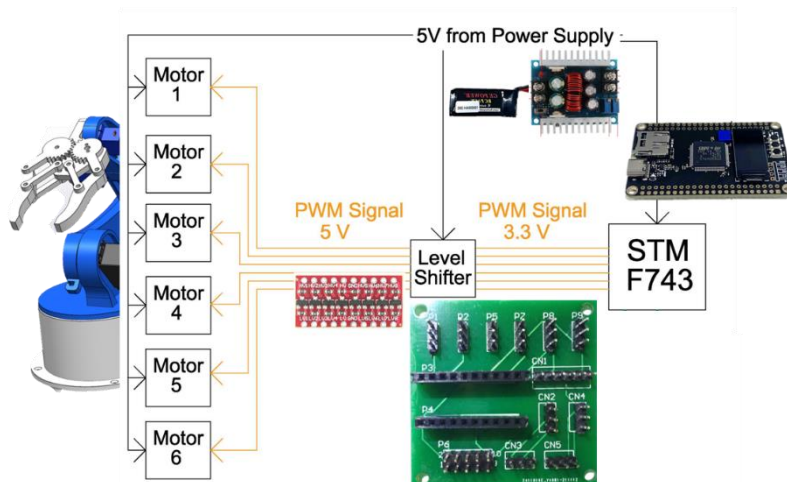


Fig. 3 Connection of Robot Diagram

การออกแบบคำสั่งในการสั่งงาน

การสั่งงานหุ่นยนต์แขนกลนั้นจะทำการสั่งงานร่วมกับแผ่นป้าย Apriltag โดยแต่ละคำสั่งจะถูกแทนด้วยรหัสจำนวน 1 รหัสโดยคำสั่งที่ใช้ในแขนกลจะถูกกำหนดขึ้นจากคำสั่งที่ใช้ในการสั่งงานหุ่นยนต์แขนกลทั้งรูปแบบพื้นฐาน เช่น การขยับที่มีมอเตอร์เพียง 1 ตัวไปจนถึงคำสั่งรูปแบบประยุกต์ที่สั่งงานโดยกำหนดจุดเป้าหมายให้กับหุ่นยนต์แขนกลเมื่อทำการกำหนดจำนวนคำสั่งแล้วก็ทำการนำไปรวมกับรหัสแล้วทำออกมาเป็นแผ่นป้ายคำสั่งเพื่อใช้ในการบ้อนเข้าสู่กล้องที่อยู่บนไมโครคอนโทรลเลอร์โดยอ้างอิงคำสั่งมาจากการระบบสั่งงานจริงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่เรียกว่า Robot Pendant เพื่อให้ตรงกับการใช้งานของหุ่นยนต์จริง ซึ่งสามารถแบ่งการควบคุมได้เป็นการควบคุมที่ละมอเตอร์ เรียกว่า Joint Mode การควบคุมทิศทางในแกนต่างๆทั้งแกนอนทางขวาง (x-axis) แกนนอนทางยาว (y-axis) และแกนตั้ง (z-axis) โดยมีจุดอ้างอิงอยู่ที่ฐานหุ่นเรียกว่า World Mode และรูปแบบสุดท้ายที่ให้จุดอ้างอิงอยู่ที่มือจับเรียกว่า Tool Mode โดยในการสั่งงานสามารถปรับรูปแบบการตั้งค่าพื้นฐานได้ทั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ ระยะการเคลื่อนที่ต่อ 1 ก้าว (Step) โดย

รูปแบบวิธีการสั่งงานทั้งหมดตาม Table 1 ซึ่งจากกลุ่มคำสั่งพื้นฐานจะถูกนำไปใช้ในการทำป้ายคำสั่งในการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและสามารถใช้งานได้ง่ายกับผู้ใช้งาน

Table 1 Command functions of robot arm

Mode	Command Functions	Descriptions
Joint Mode	Rotation(Joint,Step)	Control motor to rotate by step value. (If Value < 0; rotate = CCW)
World Mode	WorldX(Step)	Move wrist along X axis by step value. ((If Value < 0; Move backward)
	WorldY(Step)	Move wrist along Y axis by step value. ((If Value < 0; Move backward)
	WorldZ(Step)	Move wrist along Z axis by step value. ((If Value < 0; Move backward)
	WorldYaw(Step)	Rotate wrist in Yall axis by step value. ((If Value < 0; rotate = CCW)
	WorldRoll(Step)	Rotate wrist in Roll axis by step value. ((If Value < 0; rotate = CCW)
Config etc.	Pick(), Place()	Pick and place object.
	SetSpeed(Speed)	Set speed from point A to B. Value is between 1 – 100%
	SetStep(Step)	Set distance of one step. Value is between 1 – 10% of max distance
	Capture()	Save all position of motor.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ป้ายคำสั่ง Apriltag

การใช้งานคำสั่ง Apriltag จะอยู่ในรูปของแผ่นป้ายที่คำสั่ง 1 คำสั่งสามารถสั่งการวัตถุได้ทันทีหรือคือการประกอบไปด้วยตัวแปรทั้งหมดที่ต้องการในการสั่งงานพร้อมแล้วสำหรับการสั่งงานโดยการประยุกต์มาจากฟังก์ชันการสั่งงานพื้นฐานใน Table 1 โดยรหัสแผ่นป้ายมีได้ทั้งสิ้น 587 รหัสเมื่อนำไปสร้างแล้วออกแบบตามกลุ่มคำสั่งแล้วในกลุ่ม Joint Mode เป็นการสั่งให้มอเตอร์ใดๆเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และข้างหลังทั้งหมด 3 ระดับคือระดับ L 1 เปอร์เซ็นต์ของระยะทั้งหมดระดับ M 5 เปอร์เซ็นต์ของระยะทั้งหมด และระดับ H 10 เปอร์เซ็นต์ของระยะทั้งหมด และในกลุ่ม World Mode เป็นการสั่งงานให้ปลายข้อมือเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ บนปริภูมิที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ฐานของหุ่นยนต์โดยระยะเคลื่อนที่ในแนวแกนต่างๆสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 ระดับคือ 1, 5 และ 10 เซนติเมตร และในการหมุนอยู่ที่ 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ของการหมุนในทิศต่างๆ และในคำสั่งอื่นๆเพื่อใช้ประกอบวิธีการควบคุมคือคำสั่งจดจำตำแหน่งที่หุ่นยนต์อยู่เพื่อให้สามารถกลับมาอยู่ที่เดิมได้โดยบันทึกใส่แผ่นป้ายรหัสที่มีอยู่และสามารถทำการวนรอบการทำงานของแขนกลได้โดยตัวอย่างแผ่นป้ายด้านหนึ่งเป็นสัญลักษณ์คำสั่ง และด้านตรงข้ามเป็นรหัส Apriltag โดยตัวอย่างแผ่นป้ายเป็นดัง Fig. 4 และ Fig. 5

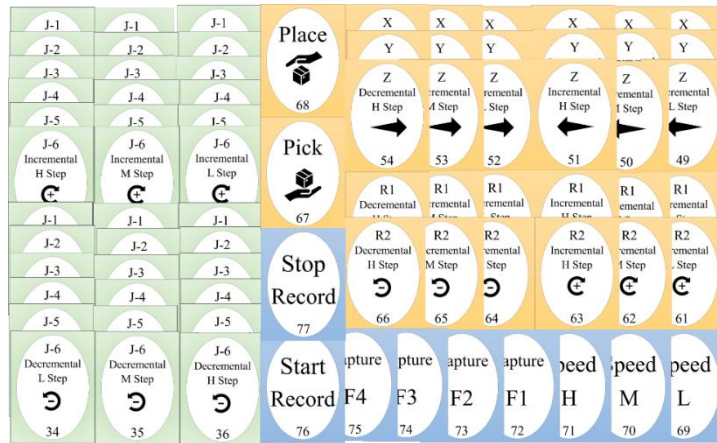


Fig. 4 Example command card for control robot

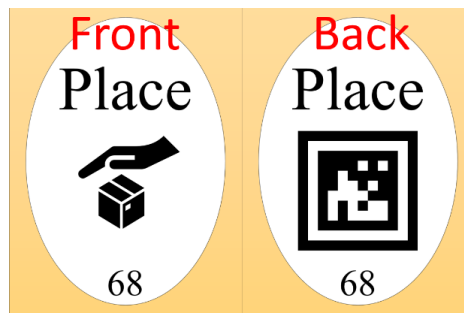


Fig. 5 Front view and back view of command card

วิธีการสั่งงานหุ่นยนต์

การสั่งงานทำโดยการป้อนคำสั่งสองรูปแบบคือคำสั่งที่สามารถตอบสนองได้ทันที และคำสั่งที่มีการป้อนคำสั่งและทำอย่างต่อเนื่องเป็นชุดคำสั่งโดยมีแผ่นป้ายเสริมในการจดจำคำสั่งคือแผ่นป้ายเริ่มบันทึก และจบในการสั่งเริ่มทำงาน โดยสามารถแยกบันทึกเป็นฟังก์ชันได้โดยใช้แผ่นป้ายเริ่มบันทึกฟังก์ชันในการสั่งงาน และจบเพื่อบันทึกฟังก์ชันในการทำงานโดยแสดงวิธีการออกเป็นรายละเอียดตาม Fig 6

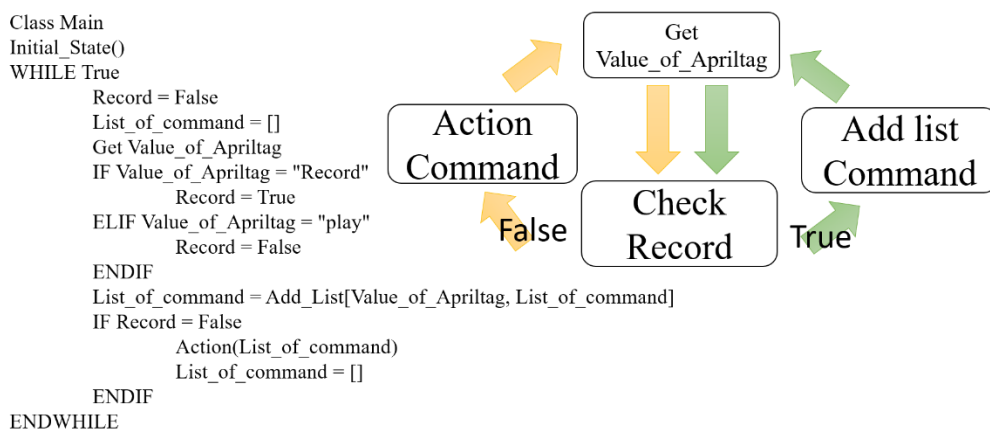


Fig. 6 Command flow

ประสิทธิภาพในการทำงานของหุ่นยนต์

การรับคำสั่งแต่ละคำสั่งจะใช้เวลาในการรับที่ 1 วินาทีต่อคำสั่งเพื่อให้สามารถรับคำสั่งได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยการทำงานหลังจากได้รับคำสั่งแล้วนั้นจะใช้เวลาในการแสดงผลตั้งแต่ 1 วินาทีไปจนถึง 2 วินาทีต่อคำสั่ง ขึ้นอยู่กับระยะทางในการเคลื่อนที่ และเป็นการลดแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแขนเพื่อป้องกัน โดยในการเคลื่อนที่นั้นการขยับของแต่ละมอเตอร์สามารถทำได้ถูกต้องตามการสั่งงาน และในส่วนของการทำงานไปยังจุดที่ต้องการนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนอันเกิดมาจากน้ำหนักที่ส่งไปยังแต่ละมอเตอร์ ทำให้มุมของมอเตอร์ขยับไปในช่วงบวกลบไม่เกิน 5 องศาตามผลกระทบจากน้ำหนัก และเมื่อวัดจากจุดปลายทำให้เคลื่อนจากจุดเป้าหมายที่ 1 ถึง 2 เซนติเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการทำงานของแขนกลนั้นมีความเที่ยงตรงที่สูง

สรุป

วิธีการโปรแกรมแบบจับต้องได้โดยการอ่านรหัสจาก Apriltag สามารถควบคุมได้ทั้งแบบ 1 มอเตอร์ และการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้จุดอ้างอิงเป็นตัวบอกการเคลื่อนที่เพื่อขยับมอเตอร์หลายๆตัวพร้อมกันซึ่งความแม่นยำในการอ่านเป็นไปได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ และมีการคลาดเคลื่อนจากเป้าหมายที่ต่ำโดยการควบคุมสามารถทำได้ในรูปแบบที่ไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และสามารถเชื่อมต่อเพื่อใช้ฟังก์ชันคำสั่งในการสร้างการทำงานในรูปแบบต่างได้เช่นกัน และการโปรแกรมหุ่นยนต์แบบจับต้องได้สามารถเรียนรู้ง่ายเพราะการสั่งงานสามารถตอบสนองกันได้อย่างชัดเจน เห็นได้ถึงการผิดพลาดของคำสั่งที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์แขนกลทำให้สามารถเรียนรู้การสั่งงาน และข้อจำกัดในการทำงานของหุ่นยนต์ได้โดยไม่ต้องมีพื้นฐานภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสามารถต่อยอดการใช้งานจากภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้ไปสู่การโปรแกรมด้วยภาษาแบบอักขระเนื่องจากภาษาที่ใช้ในการโปรแกรมหุ่นยนต์คือภาษาไพทอนที่มีการสอนเป็นทั่วไปในการศึกษาภาคบังคับในไทย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆการนำแขนกลมาใช้เป็นการทำให้การสั่งงานเป็นรูปแบบที่สามารถทำได้ซับซ้อนขึ้นมากกว่าการสั่งงานการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพราะรูปแบบทิศทางที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้มีสูงกว่า โดยความง่ายในการสั่งงานยังคงลักษณะที่สามารถสั่งงานได้ง่ายเหมือนง่ายวิจัยอื่นที่สื่อที่เข้าใจได้ง่ายในการสั่งงาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ. ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาในการทำงาน และคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนพัฒนานวัตกรรมของนิสิตระดับปริญญาโท ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ตามวัตถุประสงค์อย่างครบถ้วน

เอกสารอ้างอิง

ผู้จัดการออนไลน์. 2562. อย่างล้ำ!! สอนเด็กด้วย “หุ่นยนต์แขนกล” หลักสูตร ม.อันดับ 1 ของโลก [มีคลิป].

<https://mgronline.com/live/detail/9620000018762>, 10 ธันวาคม 2563

วิกิพีเดีย. 2556. อุตสาหกรรม 4.0. Retrieved from https://th.wikipedia.org/wiki/อุตสาหกรรม_4.0, 20 มีนาคม 2563

ศรีคำเวียง, ว. 2561. วิทยาการคำนวณ (Computing Science). <https://www.scimath.org/lesson-technology/item/8808-computing-science>, 5 ธันวาคม 2563

- Bravo, F.A., González, A.M., González, E. 2017. A review of intuitive robot programming environments for educational purposes. Paper presented at the 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), 18–20 October 2017, Cartagena, Colombia.
- Cass, S. 2020. Top Programming Languages 2020, <https://spectrum.ieee.org/at-work/tech-careers/top-programming-language-2020>, 22 July 2020.
- Olson, E. 2011. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. Paper presented at the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 9–13 May 2011, Shanghai, China.
- Sapounidis, T., Demetriadis, S. 2017. Educational robots driven by tangible programming languages: A review on the field. In: Alimisis D., Moro M., Menegatti E. (Eds.) Educational Robotics in the Makers Era. Edurobotics 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 560. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-319-55553-9_16
- Wang, J., Olson, E. 2016. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection. Paper presented at the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 9–14 October 2016, Daejeon, Korea (South).
- Weintrop, D., Afzal, A., Salac, J., Francis, P., Li, B., Shepherd, D.C., Franklin, D. 2018. Evaluating CoBlox: A comparative study of robotics programming environments for adult novices. In: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, pp. 366.

แบบจำลองการพยากรณ์ต้นทุนของโครงการอาคารเขียว โดยพิจารณาการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น ภายใต้สถานการณ์โควิด-19

Cost forecasting simulation in green building project considering flexible work arrangement during COVID-19

กณณิการ์ บรรจงรักษา^{a,*}, กณิศา รุ่งแจ้ง^b, พงษ์ศักดิ์ สุริยวานากุล^c

Kannika Banjongraksa^{a,*}, Kanisa Rungjang^b, Pongsak Suriyawanakul^c

^a นิสิตปริญญาโท วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^b ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^c รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^a Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

^b Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

^c Associate professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: kannika.ba@ku.th

บทคัดย่อ

ภายใต้สถานการณ์แพร่ระบาดของโควิด-19 ซึ่งมีความจำเป็นต้องปรับตารางเวลาทำงาน และการใช้งานอาคารตามนโยบายสาธารณสุข ทำให้เกิดผลกระทบต่อความผันแปรต้นทุน และความคุ้มค่าของการพัฒนาโครงการเป็นอาคารเขียว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองการพยากรณ์ต้นทุนของโครงการอาคารเขียว เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการลงทุนก่อสร้างอาคารสำนักงานของกรุงเทพมหานคร ต้นทุนที่พิจารณาเป็นผลรวมของ ค่าก่อสร้างอาคาร ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาเป็นอาคารเขียว และค่าสาธารณูปโภค แบบจำลองที่วิเคราะห์มี 3 กรณี คือ แบบจำลองสำนักงานธรรมดาที่ไม่ใช่อาคารเขียว แบบจำลองสำนักงานอาคารเขียวระดับ Certified และ Platinum การวิเคราะห์ได้พิจารณาปรับตารางงานแบบยืดหยุ่นให้ผันแปรตั้งแต่การใช้งานอาคารแบบที่ให้บริการประชาชนออนไลน์จนถึงแบบที่ให้บริการประชาชนในสถานการณ์ปกติ ผลงานวิจัยพบว่าสภาพการณ์ใช้งานอาคารที่น้อยลง ส่งผลให้การลงทุนโครงการอาคารเขียวมีความเสี่ยงต่อความไม่คุ้มค่า เนื่องจากต้นทุนในการพัฒนาอาคารเขียวในระดับมาตรฐานที่สูงขึ้นจะมีมูลค่าสูงกว่าการประหยัดได้ของค่าสาธารณูปโภคสำหรับโครงการลงทุนที่มีอายุ 20 ปี ดังนั้นแผนการลงทุนควรกำหนดแผนระยะสั้น กลาง และยาวให้สอดคล้องกับแผนการใช้งานอาคารภายใต้สภาพการณ์ที่ผันแปร จนสามารถพัฒนาเป็นอาคารเขียวได้

คำสำคัญ: การลงทุน, สำนักงาน, อาคารเขียว

Abstract

Flexible work arrangement and building use during COVID-19 affect the cost and break-even of green building investment. This research proposed cost forecasting simulation in green building project considering flexible work arrangement of Bangkok office building. According to the analysis, three main cost items of construction cost, the investment of green building project and operating cost are simulated into the three models including the existing office building (not green building), the "Certified" green building, and the "Platinum" green building. Wide ranges of the flexible work arrangement from the full online working to the full-time office work are analyzed. The forecasting simulations of 20-years service life show that the investment of improving building to the high level of Green standard is high risk since the project cost of the high-level standard cannot be covered by its saving of operating cost. Therefore, the green building design and planning during uncertain condition should be classified into short-, medium-, and long-term plan until the situation improves.

Keywords: Green building, Investment, Office building

คำนำ

อาคารเขียวเป็นอาคารที่ประหยัดพลังงาน ประหยัดการใช้น้ำ ใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยให้ผู้ใช้อาคารมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น มีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น และเกิดการเจ็บป่วยหรือขาดงานลดลง อาคารเขียวจึงเป็นอาคารที่มีความรับผิดชอบต่อการรักษาสิ่งแวดล้อมและใช้ทรัพยากรต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพตลอดอายุอาคาร แต่การดำเนินการตามมาตรฐานอาคารเขียวต้องเพิ่มเงินลงทุนในการก่อสร้าง หรือมีค่าใช้จ่ายในการออกแบบ และการก่อสร้างที่เพิ่มขึ้น กมลทิพย์ (2556)

ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561–2580 มีเป้าหมายการพัฒนาประเทศไทยให้ประเทศไทยมีความมั่นคง มั่งคั่ง ยั่งยืน เป็นประเทศพัฒนาแล้ว ด้วยการพัฒนาตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งกรุงเทพมหานคร สามารถถ่ายทอดยุทธศาสตร์ชาติไปสู่การปฏิบัติด้วยการจัดทำแผนพัฒนากรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2561–2580 ให้มีความสอดคล้องและเชื่อมโยงกับยุทธศาสตร์ชาติของรัฐบาล ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ด้วยการสนับสนุนให้สร้างอาคารสำนักงานต่างๆ ในลักษณะอาคารเขียว แต่ในยุทธศาสตร์ชาติด้านการปรับสมดุลและพัฒนาระบบบริหารจัดการภาครัฐ ส่งผลให้กรุงเทพมหานครต้องพัฒนาบุคลากรให้มีประสิทธิภาพ นำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการให้บริการประชาชน ลดจำนวนบุคลากร สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล (2560) จึงทำให้ในอนาคตบุคลากรผู้ให้บริการภาครัฐ และประชาชนผู้ที่มาใช้บริการอาคารสำนักงานต่างๆ จะมีจำนวนที่ลดลง ประกอบกับสถานการณ์แพร่ระบาดของโควิด-19 ปีพ.ศ. 2562–2564 ต้องจัดตารางเวลาทำงาน และการใช้งานอาคารตามนโยบายสาธารณสุข ตามคำสั่งกรุงเทพมหานครที่ กท 0303/ว 191 ลงวันที่ 23 กรกฎาคม 2564 เรื่องการปฏิบัติงานที่บ้านและเหลือเวลาปฏิบัติงานเพื่อรองรับสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อ จึงทำให้เกิดความไม่แน่นอนของปริมาณผู้ใช้อาคาร ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุน และความคุ้มค่าในการลงทุนการก่อสร้างสำนักงานอาคารเขียวของกรุงเทพมหานคร

การออกแบบอาคารสำนักงานในรูปแบบอาคารเขียว อาจไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในระยะสั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำลองพฤติกรรมการลงทุนการก่อสร้างอาคารเขียวในระยะยาว ประกอบกับภายใต้สถานการณ์จำลองความไม่แน่นอนของปริมาณผู้ใช้อาคาร แล้วจึงเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลงทุนตลอดอายุอาคาร ซึ่งจะช่วยให้การลงทุนของภาครัฐเกิดประโยชน์สูงสุด งานวิจัยนี้จึงสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ต้นทุนของโครงการอาคารเขียว โดยวิเคราะห์รูปแบบการลงทุนการก่อสร้างอาคารสำนักงาน 8 ชั้น ของสำนักงานออกแบบ สำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นอาคารสำนักงานธรรมดา พื้นที่ใช้สอย ประมาณ 8,200 ตร.ม. ในบริเวณพื้นที่ศูนย์ก่อสร้างและบูรณะ ถนนมิตรไมตรี เขตดินแดง ซึ่งใช้เป็นอาคารทำงานและทดสอบวัสดุ ให้กับศูนย์เครื่องมือกล, ศูนย์ก่อสร้างและบูรณะถนน, กลุ่มงานวิเคราะห์วิจัย, และกลุ่มงานตกแต่ง สังกัดสำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร งบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561–2564 อายุการใช้งาน 20 ปี เริ่มใช้งาน ปี พ.ศ. 2565–2585

ทั้งนี้การเลือกอาคารสำนักงานของสำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร เป็นตัวแทนในการศึกษา เนื่องจากเป็นหน่วยงานที่มีกลยุทธ์ และยุทธศาสตร์ในการพัฒนาเป็นอาคารอัจฉริยะ (Smart Building) ซึ่งเป็นหนึ่งในแปดหมวดองค์ประกอบของเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ที่อาศัยประโยชน์จากหลักการธรรมชาติร่วมกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่ออำนวยความสะดวก พร้อมลดการใช้พลังงาน ลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ตามเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับเมืองอัจฉริยะของสถาบันอาคารเขียวไทย (2561) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาอาคารของจังหวัดต่างๆ และหน่วยงานท้องถิ่นได้ต่อไป โดยพิจารณาต้นทุนที่เป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของอาคาร ในรูปของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ประกอบด้วยต้นทุนค่าก่อสร้างอาคาร และค่าใช้จ่ายของการพัฒนาเป็นอาคารเขียวตามมาตรฐานอาคารเขียวไทย และค่าสาธารณูปโภค แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นแบ่งเป็น 3 กรณี คือ แบบจำลองสำหรับอาคารสำนักงานธรรมดาที่ไม่ใช่อาคารเขียว แบบจำลองสำหรับสำนักงานอาคาร

เขียวระดับ Certified และแบบจำลองสำหรับสำนักงานอาคารเขียวระดับ Platinum และพิจารณาปรับการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น ให้มีความผันแปรตั้งแต่การใช้งานแบบการให้บริการประชาชนออนไลน์ ไปจนถึงการใช้งานแบบให้บริการประชาชนในสถานการณ์ปกติ แล้วประเมินรูปแบบอาคารสำนักงานที่มีความคุ้มค่าในการลงทุน

อุปกรณ์และวิธีการ

การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ต้นทุนโครงการอาคารเขียว และการวิเคราะห์ความคุ้มค่า ใช้การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ และแผนภูมิต้นไม้ (Decision Tree) ของความน่าจะเป็นของการผันแปรในการใช้งานอาคารเขียว จากการจัดตารางงานภายใต้สถานการณ์ต่างๆ

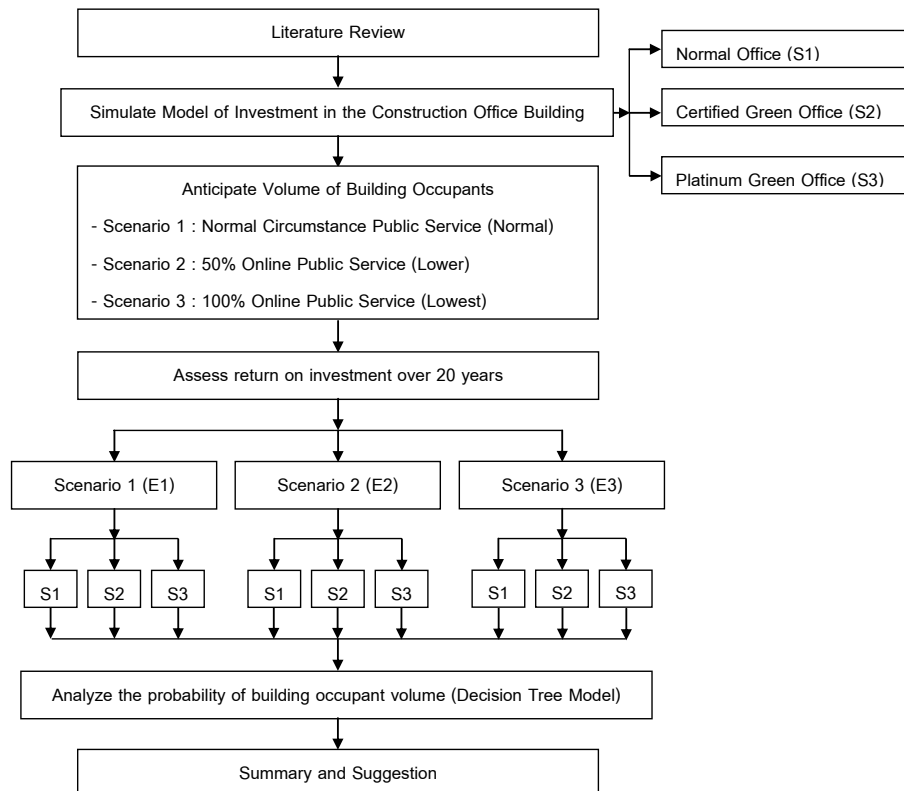


Fig. 1 Simulation modeling and analysis

1. ทบทวนเอกสาร ประกอบด้วย การออกแบบอาคารสำนักงานปกติอาคารธรรมดา และการออกแบบสำนักงานอาคารเขียวตามมาตรฐานอาคารเขียวไทย (TREES) ซึ่งจะใกล้เคียงกับมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา (LEED) มี 8 หมวดหลัก ได้แก่ 1. การบริหารจัดการโครงการ 2. ฝั่งบริเวณและภูมิทัศน์ 3. การประหยัดน้ำ 4. พลังงานและบรรยากาศ 5. วัสดุและทรัพยากรในการก่อสร้าง 6. คุณภาพของสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร 7. การป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และ 8. นวัตกรรม ลักษณะการประเมินประกอบด้วย 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือหัวข้อบังคับ 9 ข้อ ซึ่งต้องผ่านการประเมินทุกหัวข้อ หากไม่ผ่านเกณฑ์ข้อใดข้อหนึ่งในกลุ่มนี้จะไม่ผ่านเกณฑ์ และกลุ่มที่สองประเมินใน 8 หมวดหลัก คะแนนรวม 85 คะแนน ซึ่งจะกำหนดคะแนนในแต่ละหัวข้อให้มีค่าน้อยต่างกันตามลำดับความสำคัญ การทำคะแนนได้มากน้อยจะได้รับรางวัลที่ต่างกัน 4 ระดับ ดังต่อไปนี้

Table 1 Award level of the thai green building institute

Level	Point
Platinum	61 up
Gold	46 – 60
Silver	38 – 45
Certified	30 – 37

ที่มา: คู่มือสำหรับเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สถาบันอาคารเขียวไทย (2555)

การวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุอาคาร (Life Cycle Cost Analysis, LCCA) ด้วยการแปลงค่าใช้จ่ายในเวลาที่แตกต่างกันเป็นมูลค่าปัจจุบัน (Present Value) ต้นทุนตลอดอายุอาคาร ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นครั้งเดียว เช่น ค่าลงทุนครั้งแรก (Initial Investment Cost) ค่าซ่อม (Present Value Repair Cost) ค่ากำจัด (Present Value Residual Less Disposal Cost) และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นประจำปีด้วยปริมาณที่ใกล้เคียงกันในแต่ละปี เช่น ค่าใช้งาน (Present Value Operating Cost) ค่าบำรุงรักษา (Present Value Maintenance Cost) และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นประจำปีด้วยปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปี เช่น ค่าไฟฟ้าที่มีการปรับราคาขึ้นทุกปี (Present Value Energy Cost) ชนิกันต์ (2558)

หลักเกณฑ์การตัดสินใจว่าโครงการที่พิจารณามีความเหมาะสมคุ้มค่าแก่การลงทุน มีหลายแบบ ซึ่งจะอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับค่าใช้จ่าย และผลประโยชน์ของโครงการเป็นหลัก ผลการวิเคราะห์จะพิจารณาว่าผลประโยชน์มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าใช้จ่าย ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อทุน (Benefit – cost ratio: BCR) และระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback Period) หุทัย (2550)

อัตราคิดลดเป็นอัตราผลตอบแทนที่จะได้รับการเสียโอกาสที่จะนำเงินไปลงทุนในโครงการอื่น สำหรับกรณีที่ธนาคารโลกให้ความช่วยเหลือประเทศกำลังพัฒนา กำหนดอัตราคิดลดที่ร้อยละ 12 ต่อปี ธนาคารโลก (2008)

2. นำผลการศึกษามาสร้างแบบจำลองอาคาร 3 กรณี ดังนี้



1) Normal Office (S1)

2) Certified Green Office (S2)

3) Platinum Green Office (S3)

Fig. 2 Model of investment in the construction office building

2.1 อาคารสำนักงานธรรมดา (S1) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น

2.2 สำนักงานอาคารเขียวระดับ Certified (S2) ปรับปรุงเพิ่มเติมจากอาคารธรรมดา (S1) ดังนี้

ระบบไฟฟ้า 1. การปิด-เปิดของหลอดไฟที่อยู่มุมหน้าต่าง 2. มาตรฐานไฟฟ้าย่อยแยกตามประเภทใช้งาน

ระบบปรับอากาศ 1. ประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ 2. การออกแบบห้องที่มีมลพิษให้มีความดันเป็นลบ

ระบบสุขาภิบาล 1. มาตรฐานน้ำประจําอาคาร 2. มาตรฐานน้ำย่อยประจําอาคาร

2.3 สำนักงานอาคารเขียวระดับ Platinum (S3) ดังนี้

ระบบไฟฟ้า 1. การปิด-เปิดของหลอดไฟที่อยู่มุมหน้าต่าง 2. มาตรฐานไฟฟ้าย่อยแยกตามประเภทใช้งาน

3. การควบคุมการปิด-เปิดของโคม แบ่งเป็น 3 ระดับ 4. การควบคุมความส่องสว่างโดยใช้ระบบอัตโนมัติ (Sensor)

ระบบปรับอากาศ 1. ประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ 2. การออกแบบห้องที่มีมลพิษให้มีความดันเป็นลบ 3. ประสิทธิภาพแผ่นกรองอากาศ 4. การใช้ระบบ UVGI

ระบบระบายอากาศ 1. อัตราการระบายอากาศ 2. การใช้ระบบตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Sensor) ควบคุมปริมาณอากาศนำเข้า 3. ระบบเติมอากาศแบบอิสระและประหยัดพลังงาน

ระบบจัดการพลังงาน 1. ระบบควบคุมอัตโนมัติ (BMS)

ระบบสุขาภิบาล 1. มาตรฐานน้ำประจําอาคาร 2. มาตรฐานน้ำย่อยประจําอาคาร 3. เก็บน้ำฝนเพื่อใช้งานเป็น ปริมาตรร้อยละ 5 3.1 บ่อและท่อรวบรวมน้ำฝน 3.2 เครื่องสูบน้ำรดน้ำต้นไม้และสายส่งน้ำ

3. รวบรวมข้อมูล และประเมินค่าใช้จ่ายตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของอาคารทั้ง 3 กรณี คือ 1) สำนักงานอาคาร ธรรมดา 2) สำนักงานอาคารเขียวระดับ Certified และ 3) สำนักงานอาคารเขียวระดับ Platinum ได้แก่

3.1 ค่าก่อสร้างตัวอาคารสำนักงาน ถอดปริมาณวัสดุก่อสร้าง หาค่าก่อสร้าง โดยราคาอ้างอิงจาก กรมบัญชีกลาง: บัญชีค่าก่อสร้างและค่าแรง ปิงบประมาณ พ.ศ. 2564

3.2 ค่าลงทุนองค์ประกอบอื่นๆ เพื่อให้ได้เกณฑ์อาคารเขียวระดับ Certified และระดับ Platinum

3.3 ประเมินค่าใช้จ่ายของอาคาร ได้แก่ ค่าไฟฟ้า และค่าน้ำ เป็นระยะเวลา 20 ปี แล้วแปลงเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ของโครงการ (Net Present Value: NPV) ด้วยอัตราคิดลดร้อยละ 12 ได้ค่าใช้จ่ายตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของอาคาร ดังนี้

Table 2 Net present value of life cycle cost office building 3 office cases

		Total			Total
1	Normal Office (S1)	20 Years	3	Platinum Green Office (S3)	20 Years
1.1	office building construction cost	315,645,296	3.1	office building construction cost	340,321,292
1.2	facilities' cost	2,129,162	3.2	facilities' cost	35,880,130
1.3	building expenses	237,910,250	Power System		
	power (kWh)	42,649,400	1.	Lighting Switch: Window Area	596,459
	Value (Baht)	230,733,254	2.	Meter	477,318
	water (Cum.)	329,220	3.	Lighting Switch in 3 Level	886,649
	Value (Baht)	7,176,996	4.	Lighting SENSOR	129,715
	Total	555,684,708	Aircondition System		
	Total: Net Present Value	406,368,686	1.	Efficiency	17,705,328
			2.	Negative Pressure Room	1,040,000
			3.	Filter	3,556,969
			4.	UVGI	994,800
			Ventilation System		
2	Certified Green Office (S2)	20 Years	1.	Ventilation Rate	8,461
2.1	office building construction cost	320,007,055	2.	CO2 SENSOR Control Inlet Air	1,947,000
2.2	facilities' cost	19,941,829	3.	Ventilation: Safe Energy	5,866,462
	Power System		Energy Management System		
	1.Lighting Switch: Window Area	596,459	1.	BMS System	2,283,000
	2.Meter	477,318	Sanitary System		
	Aircondition System		1.	Meter	68,508
	1.Efficiency	17,705,328	2.	Sub Meter	54,216
	2.Negative Pressure Room	1,040,000	3.Rainfall Storage for using 5%		
	Sanitary System		3.1	Sump and Pipe Collection	244,592
	1.Meter	68,508	3.2	Pump and Piping	20,653
	2.Sub Meter	54,216	3.3	building expenses	179,779,746
2.3	building expenses	185,835,646		power (kWh)	32,180,980
	power (kWh)	33,023,780		Value (Baht)	174,099,102
	Value (Baht)	178,658,650		water (Cum.)	260,580
	water (Cum.)	329,220		Value (Baht)	5,680,644
	Value (Baht)	7,176,996		Total	555,981,168
	Total	525,784,530		Total: Net Present Value	439,471,970
	Total: Net Present Value	409,353,328			

3.4 จากการออกแบบอาคารสำนักงานรองรับปริมาณผู้ใช้อาคารในปัจจุบัน และคาดการณ์ปริมาณผู้ใช้อาคาร สำนักงานที่มีแนวโน้มที่จะลดลงเนื่องจากการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของภาครัฐ การลดจำนวนบุคลากร และปรับปรุงให้บริการประชาชนออนไลน์ ประกอบกับสถานการณ์แพร่ระบาดของโควิด-19 ปีพ.ศ. 2562 – 2564 ต้องจัด

ตารางเวลาทำงาน และการใช้งานอาคารตามนโยบายสาธารณสุข พิจารณาปรับการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น ให้มีความผันแปรตั้งแต่การใช้งานแบบการให้บริการประชาชนออนไลน์ ไปจนถึงการใช้งานแบบให้บริการประชาชนในสถานการณืปกติ ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของปริมาณผู้ใช้อาคาร จึงได้ทำการจำลองสถานการณ์ปริมาณผู้ใช้อาคาร ดังนี้

1. สถานการณ์ที่ 1 กรณีปกติ ปริมาณผู้ใช้อาคารตามที่คาดการณ์ (Event 1: E1)
2. สถานการณ์ที่ 2 กรณีให้บริการประชาชนออนไลน์ร้อยละ 50 ปริมาณผู้ใช้อาคารลดลง (Event 2: E2)
3. สถานการณ์ที่ 3 กรณีให้บริการประชาชนออนไลน์ร้อยละ 100 ปริมาณผู้ใช้อาคารลดต่ำที่สุด (Event 3: E3) ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดที่หน่วยงานราชการในสังกัดสำนักการโยธา กรุงเทพมหานครยังคงสามารถให้บริการประชาชนได้ จากข้อมูลจริงในช่วงสถานการณ์โรคระบาด พ.ศ.2564 เมื่อปริมาณผู้ใช้อาคารเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าใช้จ่ายของอาคาร ได้แก่ ค่าไฟฟ้า และค่าน้ำ ระยะเวลา 20 ปี ลดลง ส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของอาคารสำนักงาน สถานการณ์ที่ 2 และ 3 เปลี่ยนแปลง ดังนี้

Table 3 Net present value 3 office cases vary in occupants' volume

Occupants Volume		Normal E1	Lower E2	Lowest E3
Case		NPV	NPV	NPV
Normal Office	S1	406,368,686	361,942,256	339,729,041
Certified Green Office	S2	409,353,328	374,651,106	357,299,995
Platinum Green Office	S3	439,471,970	405,900,603	389,114,919

4. วิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องมือความน่าจะเป็นทางสถิติ โดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การตัดสินใจ (Decision Analysis Model) ด้วยการสร้างแบบจำลองแผนภูมิต้นไม้ (Decision Tree Model) เริ่มจากนำมูลค่าปัจจุบันสุทธิของอาคารสำนักงานที่ได้จากการคำนวณโดยจำลองสถานการณ์ปริมาณผู้ใช้อาคาร ระดับ ปกติ ลดลง และลดต่ำที่สุด มาทำการทดลอง โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นแบบสุ่มจากการกระจายตัวปกติ (Normal Distribution) ดัง Table 4 ทำการทดลองครั้งที่ 1 ด้วยแบบจำลองแผนภูมิต้นไม้ได้ผลการทดลอง ดัง Fig. 3 ทำการทดลอง 10 ครั้ง ได้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของอาคารสำนักงาน ดัง Table 5 จากการพิจารณาความคุ้มค่าของโครงการลงทุนของรัฐบาลที่กำหนดให้ใช้อัตราคิดลดร้อยละ 12 แล้ว ได้ทดลองผันแปรอัตราคิดลดร้อยละ 8, 10 และ 14 เพิ่มเติม พบว่าอาคารสำนักงานธรรมดาที่ไม่ใช่อาคารเขียวยังมีความคุ้มค่าเป็นลำดับแรก ดัง Table 6

5. สรุปผลและเสนอแนะ ตัดสินใจเลือกการลงทุนก่อสร้างสำนักงานอาคารเขียวการที่เหมาะสม พิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานของภาครัฐ จากตัวชี้วัดการลงทุนแบบปรับค่าของเวลาเป็นหลัก โดยใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นเกณฑ์การตัดสินใจ ในงานวิจัยนี้พิจารณาจากค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ต่ำสุด

Table 4 Random probability

Try	Random Probability		
	1 (E1)	2 (E2)	3 (E3)
1	0.05	0.9	0.05
2	0.3	0.3	0.4
3	0.25	0.15	0.6
4	0.05	0.25	0.7
5	0.5	0.25	0.25
6	0.8	0.15	0.05
7	0.45	0.35	0.2
8	0.85	0.05	0.1
9	0.05	0.75	0.2
10	0.1	0.25	0.65

Table 5 Net present value of total expense

Net present value of office building total expenses			
Try	Normal	Certified	Platinum
	S1	S2	S3
1	363,052,917	375,518,662	406,739,887
2	366,384,899	378,121,328	409,257,740
3	359,720,935	372,915,995	404,222,034
4	348,614,327	364,240,439	395,829,193
5	378,602,167	387,664,439	418,489,866
6	396,372,739	401,545,328	431,918,412
7	377,491,507	386,796,884	417,650,581
8	397,483,400	402,412,884	432,757,697
9	359,720,935	372,915,995	404,222,035
10	351,946,309	366,843,106	398,347,045
Average	369,939,013	380,897,506	411,943,449

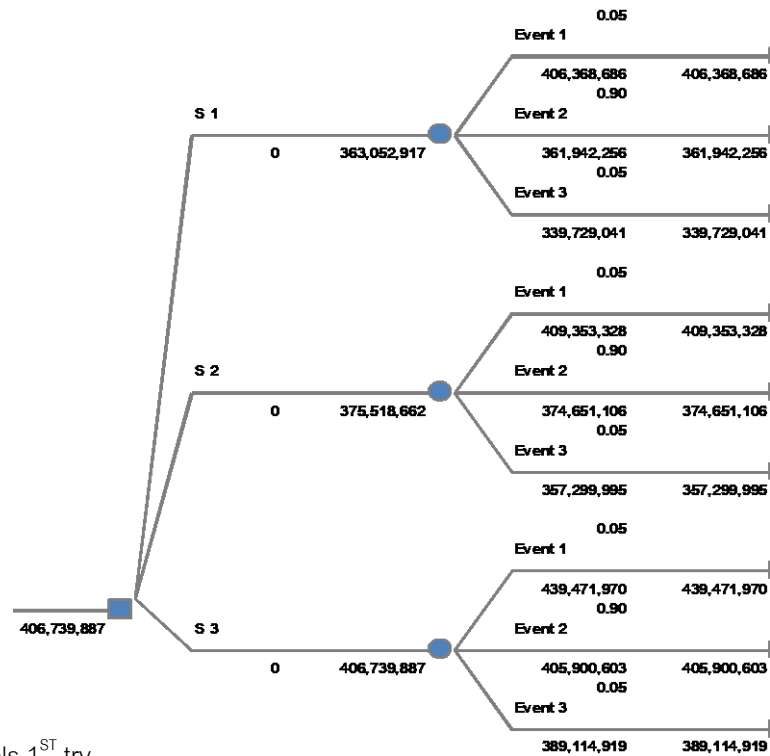
Fig. 3 Decision tree models 1ST try

Table 6 Average net present value of total expenses

Discount Rate	Average net present value of office building total expenses		
	Normal (S1)	Certified (S2)	Platinum (S3)
8%	386,467,688	393,773,456	425,037,993
10%	377,286,565	386,621,531	417,757,462
12%	369,939,013	380,897,506	411,943,449
14%	363,983,841	376,257,890	407,240,779

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลอง

ผลงานวิจัยนี้ได้แบบทางเลือกการลงทุนก่อสร้างสำนักงาน 3 แบบ คือ สำนักงานอาคารธรรมดา สำนักงานอาคารเขียวระดับ Certified และระดับ Platinum ตามมาตรฐานอาคารเขียวไทย และวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของอาคารสำนักงาน ระยะเวลา 20 ปี แปลงเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการด้วยอัตราคิดลด ร้อยละ 12 และได้จำลองสถานการณ์ปริมาณผู้ใช้อาคาร 3 สถานการณ์ คือ ปริมาณปกติตามการออกแบบอาคารสำนักงาน ปริมาณผู้ใช้อาคารลดลงกรณีให้บริการประชาชนออนไลน์ร้อยละ 50 และร้อยละ 100 เมื่อปริมาณผู้ใช้อาคารลดลงจากคาดการณ์ ส่งผลให้ค่าสาธารณูปโภคของอาคาร ได้แก่ ค่าไฟฟ้า และค่าน้ำ ระยะเวลา 20 ปี ลดลงด้วย ได้ค่าใช้จ่ายตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของอาคารสำนักงาน 3 แบบ ดังแสดงใน Table 3 ภายใต้สภาวะการณ์ความผันแปรของปริมาณผู้ใช้อาคาร จึงต้องวิเคราะห์ความน่าจะเป็นในทางสถิติ แบบสุ่ม 10 ครั้ง ด้วยแบบจำลองแผนภูมิต้นไม้ ได้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเฉลี่ยของอาคารสำนักงาน ดัง Table 5 เมื่อผันแปรอัตราคิดลด ร้อยละ 8, 10, และ 14 เพิ่มเติม พบว่าสำนักงานอาคารเขียวระดับ Platinum มีค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่สูงสุด รองลงมาเป็นสำนักงานอาคารเขียวระดับ Certified และสำนักงานอาคารธรรมดา มีค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ต่ำสุด

วิจารณ์ผลการทดลอง

ปริมาณผู้ใช้อาคารที่แปรผันเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์การลงทุนของโครงการ หากคาดการณ์ปริมาณผู้ใช้อาคารได้หลายสถานการณ์ และนำมาหาความน่าจะเป็น จะได้ปริมาณผู้ใช้อาคารใกล้เคียงกับความจริงมากขึ้น การวิเคราะห์โครงการภายใต้ความเสี่ยงและตัวแปรความไม่แน่นอน ที่เป็นปริมาณผู้ใช้อาคาร ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางการเงินเป็นค่าใช้จ่าย คือ ค่าไฟฟ้า และค่าน้ำ และใช้การแทนค่าร้อยละความน่าจะเป็นที่กำหนดน้ำหนักโดยผู้วิจัยแบบสุ่ม (Trial and error) การทดลอง 10 ครั้ง จากการกระจายตัวปกติ ซึ่งการประยุกต์ใช้แบบจำลองภายใต้สถานการณ์ความผันแปรของตัวแปรอื่นๆ อาจมีการพิจารณาปรับเปลี่ยนการกระจายตัวของตัวแปรสุ่มให้มีความแตกต่างกันออกไปเพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ความผันแปรต่างๆ ได้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อผลที่แม่นยำขึ้น

สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการพยากรณ์ต้นทุนของโครงการอาคารเขียว โดยพิจารณาปรับการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น ภายใต้สถานการณ์โควิด-19 ให้มีความผันแปรตั้งแต่การใช้งานแบบการให้บริการประชาชนออนไลน์ไปจนถึงการใช้งานแบบให้บริการประชาชนในสถานการณปกติ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองต้นทุนแสดงให้เห็นว่า ภายใต้สถานการณ์โควิด-19 หรือสภาวะการณ์อื่น ๆ ที่มีการใช้งานอาคารน้อยลง จะมีผลให้การลงทุนในโครงการพัฒนาอาคารเขียวมีความเสี่ยงต่อความไม่คุ้มค่า ทั้งนี้เนื่องมาจากต้นทุนในการพัฒนาเป็นอาคารเขียวในระดับมาตรฐานที่สูงขึ้นจะมีมูลค่าสูงกว่าการประหยัดได้ของค่าใช้จ่ายด้านสาธารณูปโภคของอาคารสำหรับโครงการที่มีอายุ 20 ปี ดังนั้นผู้รับผิดชอบโครงการอาคารเขียวจึงต้องพิจารณาแผนการลงทุนให้สอดคล้องกับแผนการใช้งานอาคารภายใต้สภาวะการณ์ที่ผันแปร โดยอาจแบ่งการลงทุนเป็นระยะสั้น กลาง และยาว ไปจนกว่าจะสามารถพัฒนาเป็นอาคารเขียวได้อย่างสมบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วย การสนับสนุนจากสำนักงานออกแบบ สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร, กรมโยธาธิการและผังเมือง และบริษัท คอนซัลแทนท์ ออฟ เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล คำแนะนำ และความรู้ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณหน่วยงานดังกล่าว ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กมลทิพย์ เพียรพิกุล. 2556. ประเด็นเศรษฐศาสตร์สำนักงานเขียวในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,

สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ชนิกานต์ ยิ้มประยูร. 2558. การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางการเงินสำหรับอาคารที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดี (Financial Analysis for Energy Efficient Buildings). ใน: การฝึกอบรมหลักสูตรการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารธุรกิจ. โรงแรมสวิสโซเทล, กรุงเทพฯ.

ชลธิชา ปิยะศิริศิลป์. 2562. การจำลองการลงทุนพื้นที่จอดรถแล้วจบโดยพิจารณาความผันแปรของผู้โดยสารรถไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐฐา คณาฤทธิ์. 2560. การจำลองความเสี่ยงของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำโดยวิธีมอดติคาลิ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันอาคารเขียวไทย. 2561. เกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับเมืองอัจฉริยะ. สถาบันอาคารเขียวไทย, กรุงเทพฯ.

สถาบันอาคารเขียวไทย. 2555. คู่มือสำหรับเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับการก่อสร้างและปรับปรุงโครงการใหม่. สถาบันอาคารเขียวไทย, กรุงเทพฯ.

สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล. 2560. แผนพัฒนากรุงเทพมหานคร ระยะ 20 ปี. <https://webportal.bangkok.go.th>, 20 December 2021.

หฤทัย มีนะพันธ์. 2550. หลักการวิเคราะห์โครงการ: ทฤษฎีและวิธีปฏิบัติเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

Hartman, C.J. 2007. Engineering Economic and Decision-Making Process. Pearson Education, Inc., London.

Japan Research Institute. 2000. Guidelines for the Evaluation of Road Investment Project. Study Group on Road Investment Evaluation, Japan.

การประยุกต์ใช้กล้อง 360 องศาควบคุมงานก่อสร้างในสถานการณ์โควิด-19

Application of 360-degree cameras for construction control in the situation of COVID-19

ชันทน์พัฒน์ อินทร*, มานพ แก้วโมราเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chananpat_i@cmu.ac.th.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้กล้อง 360 องศาควบคุมงานก่อสร้างในสถานการณ์โควิด-19 โดยการเก็บข้อมูลการดำเนินงานในรูปแบบของภาพถ่ายพาโนรามา 360 องศา จากกล้อง Ricoh theta SC2 ในการควบคุมงาน และทำแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจเฉพาะผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการควบคุมงานก่อสร้าง จากการศึกษาพบว่า การควบคุมงานก่อสร้างผ่านภาพถ่ายพาโนรามา 360 องศา ภาพรวมอยู่ในระดับมาก ที่ค่าเฉลี่ย 3.48 รายการประเมินที่มีคะแนนการประเมินอยู่ในระดับมากที่สุด คือ แนวโน้มที่จะนำไปใช้ในอนาคต ค่าเฉลี่ย 4.83 และความสะดวกในการใช้งาน ค่าเฉลี่ย 4.33 และรายการประเมินที่มีคะแนนการประเมินอยู่ในระดับน้อย คือ ตรวจสอบศูนย์เสา ระยะระหว่างเสา ระยะรวมทั้งหมด ค่าเฉลี่ย 2.47

คำสำคัญ: กล้อง 360 องศา, การควบคุมงานก่อสร้าง, โควิด-19

Abstract

This study looks at how 360-degree cameras can be used to control construction in the COVID-19 circumstance. In the construction supervision, gathering operational data in the form of 360-degree panoramic photographs from the Ricoh theta SC2 camera and completing the satisfaction rating questionnaire exclusively for those involved in the construction supervision. According to the findings of the research construction oversight using 360-degree panoramic photographs was high level with an average of 3.48. The assessment items with the greatest evaluation ratings are future trends with an average of 4.83 and convenience in implementing with an average of 4.33, while the assessment items with the low evaluation ratings is examine the pole's core, distance between poles, total distance with an average of 2.47

Keywords: 360-degree camera, Construction supervision, Covid-19

คำนำ

เนื่องจากสถานการณ์ปัจจุบันมีการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 ทำให้รูปแบบแนวทางการปฏิบัติตัวในสังคมเปลี่ยนแปลงไป การพบปะพูดคุย การสนทนาเลือกใช้ช่องทางการใช้วีดิทัศน์ออนไลน์มากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการตระหนักถึงอันตราย การป้องกันและการอยู่ร่วมกับโรคไวรัสโควิด-19 โดยการนำหลักการเรื่องระยะห่างทางสังคมเข้ามาใช้ (Warabamrungkul et al., 2021) การนำกล้อง 360 องศามาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยเรื่องการเว้นระยะห่างทางสังคม เนื่องจากผู้ควบคุมงานสามารถติดตาม ควบคุมและตรวจสอบงานก่อสร้างจากการนำภาพถ่ายพาโนรามาผนวกกับการถ่ายภาพแบบรายละเอียดสูง เพื่อทำให้เกิดการแสดงผลภาพสภาพแวดล้อมที่เสมือนจริงแบบ 360 องศา (Kumpala and Srisamran, 2019) และให้ความรู้สึกราวกับถูกส่งไปยังสถานที่แห่งนั้น (Eiris Pereira and Gheisari, 2019) อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการฝึกอบรมด้านความปลอดภัย (Eiris et al., 2018) การจำลองสถานการณ์ที่ปลอดภัยและการควบคุมสถานการณ์ที่ไม่ปลอดภัย เพื่อถ่ายทอดความรู้ด้านความปลอดภัยและเพิ่มการตระหนักถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น (Eiris et al., 2020) และการแสดงผลภาพสภาพแวดล้อมของงานก่อสร้างที่มีความซับซ้อนหรือสถานที่ที่อันตรายได้ผ่านการแสดงผลภาพสภาพแวดล้อมที่เสมือนจริงแบบพาโนรามา 360 องศา (Pereira et al., 2017)

วิธีการ

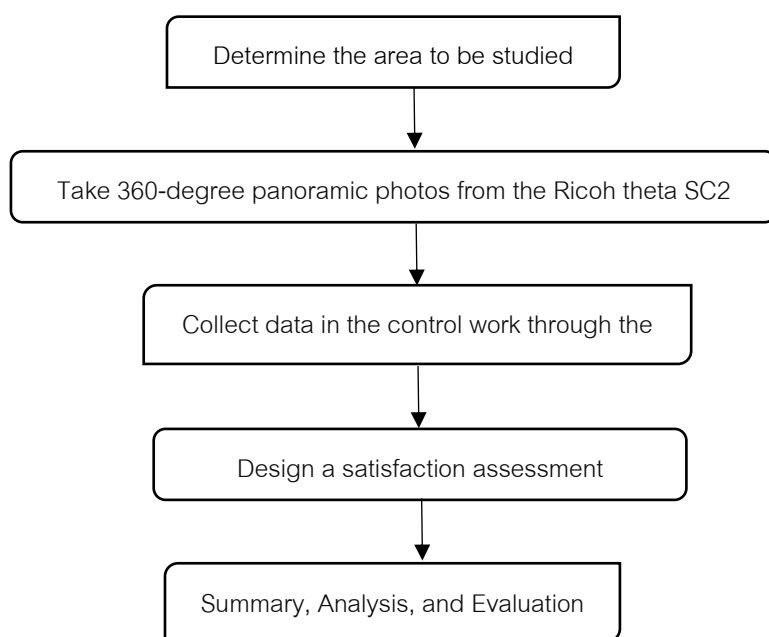


Fig.1 Implement

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่ที่จะทำการศึกษา สถานที่ตั้ง ประเภทของอาคาร และขนาดของโครงการก่อสร้าง โดยพื้นที่ทำการศึกษามีลักษณะดังนี้ การก่อสร้างในส่วนงานวางผังบ้านพักอาศัย คสล. 2 ชั้น ขนาด 204 ตารางเมตร



Fig. 2 House

ขั้นตอนที่ 2 ถ่ายภาพพาโนรามา 360 องศา จากกล้อง Ricoh theta SC2 เพื่อจับภาพการดำเนินการก่อสร้างในส่วนของงานงานวางผังบ้านพักอาศัย คสล. 2 ชั้น ขนาด 204 ตารางเมตร

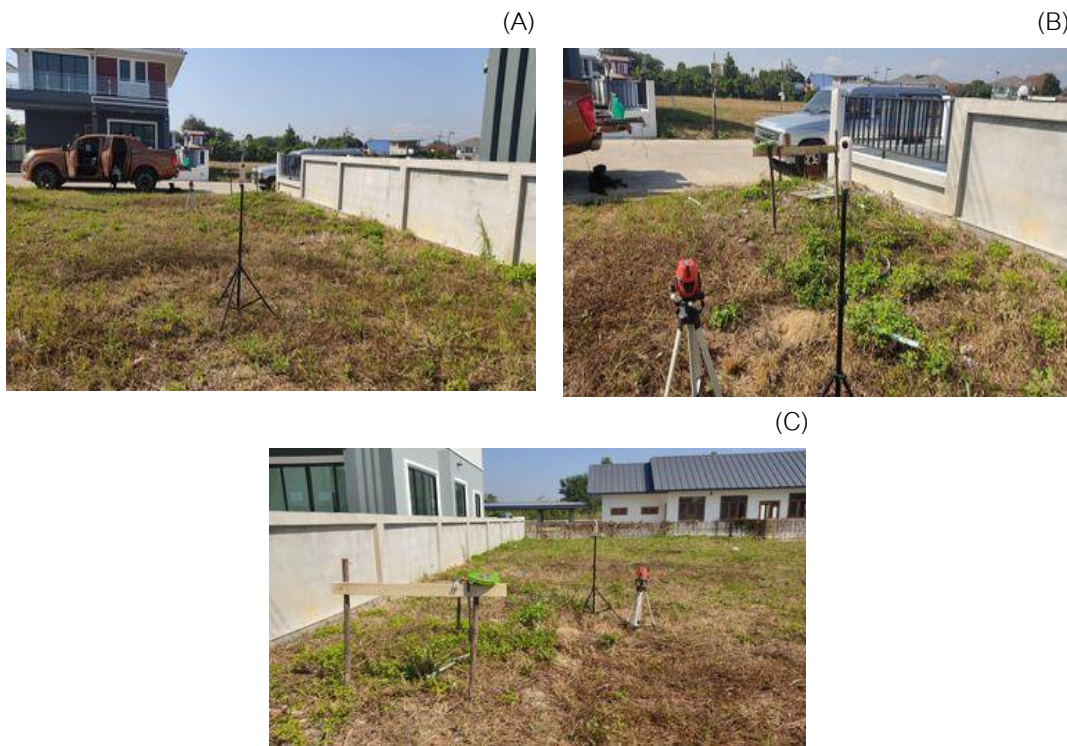


Fig. 3 Pictures have taken from the actual site.

ขั้นตอนที่ 3 เก็บข้อมูลในการควบคุมงานจากภาพพาโนรามา 360 องศา โดยการตั้งกล้อง 360 ตามมุมต่างๆ ที่ต้องการจะถ่ายภาพ จากนั้นทำการเก็บรวบรวมภาพถ่ายตามมุมต่างๆ ไปด้วยกัน เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทำแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจในขั้นตอนถัดไป



Fig. 4 360-degree panorama

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจ โดยเลือกแบบเจาะจง เฉพาะผู้มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมงานก่อสร้าง ประเมินคุณภาพของงาน ความสามารถในการตรวจสอบงาน ความยุ่งยากในการใช้งาน และแนวโน้มในการนำไปใช้ในอนาคตจำนวน 30 คน ที่มีประสบการณ์การควบคุมงานก่อสร้างไม่ต่ำกว่า 3 ปี ซึ่งการประเมินมีเกณฑ์พิจารณาจำนวน 1 ชุดประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ 1. แบบประเมินข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม 2. แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถามในการควบคุมงานก่อสร้างผ่านภาพพาโนรามา 360 องศา

ขั้นตอนที่ 5 สรุป วิเคราะห์ และประเมินผลจากแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบสอบถาม ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลและแสดงผลออกมาเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ โดยนำคะแนนของแบบสอบถามมาวิเคราะห์ผลด้วยใช้วิธีการวิเคราะห์โดยการนำผล สถิติ หาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แล้วนำมาแปลผลตามระดับความพึงพอใจจากเกณฑ์ประเมิน โดยแบ่งออกเป็น 5 ระดับดังนี้ ***

ระดับ 5 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.21 – 5.00 หมายความว่า ระดับมากที่สุด

ระดับ 4 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.41 – 4.20 หมายความว่า ระดับมาก

ระดับ 3 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.61 – 3.40 หมายความว่า ระดับปานกลาง

ระดับ 2 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.81 – 2.60 หมายความว่า ระดับน้อย

ระดับ 1 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.80 – 1.00 หมายความว่า ระดับน้อยที่สุด

ความกว้างของอัตรภาคชั้นของค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งได้ค่ามาจากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ (Equation 1) ดังนี้ (ซีซวาลย์, 2539, หน้า 15)”

$$\text{ความกว้างของอัตรภาคชั้น} = \frac{\text{คะแนนสูงสุด} - \text{คะแนนต่ำสุด}}{\text{จำนวนชั้น}} \quad (1)$$

โดยใช้วิธีการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยตามสมการ (Equation 2)

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (2)$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

Table 1 Demographics of participants.

Variables	Categories	Frequency	Percentage
Gender	1) Male	26	86.67%
	2) Female	4	13.33%
Age	1) 21-30 years	10	33.33%
	2) 31-40 years	15	50%
	3) 41 years up	5	16.67%
Educational background	1) Architects, Engineers	13	43.34%
	2) Business owner, Construction contractor	3	10%
	3) Government authorities, Employees of state-owned enterprises	7	23.33%
	4) Private personnel, General contractors	7	23.33%
	5) Others	0	0%
Academic rank	1) <i>lower than bachelor's degree.</i>	10	33.3%3
	2) Bachelors degree.	15	50%
	3) Higher than <i>bachelor's degree.</i>	5	16.67%

จากตารางที่ 1 (Table 1) สรุปได้ดังนี้ กลุ่มตัวอย่างที่เข้าร่วมทำแบบสอบถามส่วนใหญ่คือเพศชาย, ช่วงอายุระหว่าง 31-40 ปี, ประกอบอาชีพสถาปนิก, วิศวกร และมีระดับการศึกษาอยู่ที่ระดับปริญญาตรี

จากตารางที่ 2 สรุปได้ดังนี้ ความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถามในการควบคุมงานก่อสร้างผ่านภาพพานอรามา 360 องศาภาพรวมอยู่ในระดับมาก ที่ค่าเฉลี่ย 3.48 รายการประเมินการควบคุมงานก่อสร้างผ่านภาพพานอรามา 360 องศาอยู่ในระดับที่มากที่สุดคือ แนวนอนที่จะนำไปใช้ในอนาคต ความสะดวกในการใช้งาน ที่ค่าเฉลี่ย 4.83 และ 4.33 ตามลำดับ และรายการประเมินในระดับที่น้อยที่สุดคือ ตรวจสอบศูนย์เสา ระยะระหว่างเสา ระยะรวมทั้งหมด ค่าเฉลี่ย 2.47

สรุป

จากการศึกษาทดลองงานวิจัยพบว่า การนำกล้อง 360 องศา มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมงานก่อสร้างในสถานการณ์โควิด-19 โดยการนำกล้อง 360 องศา มาถ่ายภาพการดำเนินการก่อสร้างในส่วนของงานงานวางผังบ้านพักอาศัย คสล. 2 ชั้น ขนาด 204 ตารางเมตร จากแบบประเมินความพึงพอใจในการควบคุมงานก่อสร้างผ่านภาพพานอรามา 360 องศา ภาพรวมอยู่ในระดับมาก ที่ค่าเฉลี่ย 3.48 รายการประเมินที่มีคะแนนการประเมินอยู่ในระดับมากที่สุด คือ แนวนอน

ที่จะนำไปใช้ในอนาคต ค่าเฉลี่ย 4.83 และความสะดวกในการใช้งาน ค่าเฉลี่ย 4.33 และรายการประเมินที่มีคะแนนการประเมินอยู่ในระดับน้อย คือ ตรวจสอบศูนย์เสา ระยะระหว่างเสา ระยะรวมทั้งหมด ค่าเฉลี่ย 2.47

Table 2 Form for evaluating the satisfaction of respondents 360-degree panoramic photos were used to control the construction.

No.	Categories	\bar{x}	S.D.	Result
1	Land boundary markers and title deeds are inspected.	3.30	0.47	Moderate level
2	Examine the construction plan, including its position, direction, and perpendicularity, In comparison to the REFERENCE LINE	3.27	0.45	Moderate level
3	Examine the building elements' overhangs in accordance with the designs with regard to land boundaries.	3.6	0.50	High level
4	Examine the pole's core, distance between poles, total distance	2.47	0.57	Low level
5	Examine the pile position compared to the plan.	3.03	0.56	Moderate level
6	Compare the given Zero Zero Level to the actual location.	2.97	0.41	Moderate level
7	Inspect the level pins for stability.	2.97	0.49	Moderate level
8	The ability to look over the job description.	4.03	0.61	High level
9	Convenience in implementing.	4.33	0.55	Very high level
10	Future trends.	4.83	0.38	Very high level
Average		3.48	0.50	High level

ข้อเสนอแนะ

การตรวจสอบศูนย์เสา ระยะระหว่างเสา ระยะรวมทั้งหมด ยังไม่เหมาะสำหรับการใช้ระยะงานละเอียด แต่เหมาะสำหรับการตรวจงานในภาพรวม

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณโครงการ Northville ต.สันผักหวาน อ.หางดง จ.เชียงใหม่ เชื้อเพื่อสถานที่และทุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. 2559. ขอบเขตและหน้าที่การให้บริการวิชาชีพการบริหารงานก่อสร้าง (พิมพ์ครั้งที่ 4). สำนักพิมพ์วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

- ชัชวาลย์ เรื่องประพันธ์. 2539. สถิติพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 2, โรงพิมพ์คลังนานาวิทยาหน้าเสาวรส, ขอนแก่น.
- วรรณวรงค์ รัตนานิคม, สยาม ยิ้มศิริ. 2564. ปัญหาการควบคุมงานก่อสร้างประเภทงานทางขององค์ประกอบของส่วน
ท้องถิ่น. ใน: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25. ชลบุรี, CEM35, หน้า 1–6
- ปิยาภัทร สุวรรณปรีดี, อารีย์ญา ศรีสมบุญ, กรพงศ์ ไชยานุพัทกุล. 2561. การประสานงานระหว่างผู้ควบคุมงานและ
ผู้รับเหมาหลักกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียมในกรุงเทพมหานคร. วารสารวิชาการบัณฑิตวิทยาลัย
สวนดุสิต 14: 55–70.
- สิทธิโชค สุนทรโอภาส, ทวีศักดิ์ วงศ์เย็น. 2564. ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารสูงในเขต
กรุงเทพมหานคร: กรณีศึกษาเขตห้วยขวาง. ใน: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 26, การประชุม
รูปแบบออนไลน์, CEM07, หน้า 1–7
- Eiris Pereira, R., Gheisari, M. 2019. 360-Degree Panoramas as a reality capturing technique in construction
domain: Applications and limitations. 55th ASC Annual International Conference Proceedings, Denver,
CO, USA, pp. 435–442
- Eiris, R., Gheisari, M., Esmaeili, B. 2018. PARS: Using augmented 360-degree panoramas of reality for construction
safety training. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15: 2452. doi.org/10.3390/ijerph15112452
- Eiris, R., Gheisari, M., Esmaeili, B. 2020. Desktop-based safety training using 360-degree panorama and static
virtual reality techniques: A comparative experimental study. *Autom. Constr.* 109: 102969.
- Kumpala, I., Srisamran, W. 2019. Development of websites in the 360 environment temple tourism in the old
city of Nakhon Ratchasima. *J. Assoc. Inf. Sci. Technol.* 9: 71–80.
- Pereira, R.E., Moud, H.I., Gheisari, M. 2017. Using 360-Degree Interactive Panoramas to Develop Virtual
Representation of Construction Sites. In: *Lean and Computing in Construction Congress (LC3): Volume
I D Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction (JC3), 4–7 July 2017, Heraklion,
Greece*, pp. 775–782. doi.org/10.24928/JC3-2017/0122
- Shojaei, A., Rokooei, S., Mahdavian, A., Carson, L., Ford, G. 2021. Using immersive video technology for
construction management content delivery: A pilot study. *J. Inf. Technol. Constr.* 26: 886-901.
- Boonloy, W., Warabamrunkul, T., Wichaiwong, M., Nilkote, R. 2021. The Covid-19 with Changing of Education
and Society. *CMU Journal of Education* 5: 44–57.

การพัฒนาแบบจำลองอ้างอิงความแข็งสำหรับทำนายกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย พอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา

Development of stiffness-based model for prediction of confined-concrete with jute fiber reinforced polymer

ทวีภัทร หอเหมรัตน์^a, ทิดารัตน์ จิระวัฒนาสมกุล^{a,*}, สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง^{b,*}

Tawipat Horhemrat^a, Tidarut Jirawattanasomkil^{a,*}, Suched Likitlersuang^{b,*}

^aภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^aDepartment of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bDepartment of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: tidarut.j@ku.th, fceslk@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองอ้างอิงความแข็งสำหรับทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา โดยศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองตั้งต้นที่เสนอโดย Bai และคณะ โดยพิจารณาความแม่นยำการทำนายด้วยตัวชี้วัด RMSE (Root Mean Square Error) และเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่กับผลการทดสอบคอนกรีตในอดีตโดยเฉพาะค่าความเค้นสูงสุด และค่าความเครียดสูงสุด ในแบบจำลองปรับปรุงใหม่ ได้ทำการปรับเงื่อนไขค่าอัตราส่วนความแข็งในการโอบรัดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ ρ ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองใหม่นี้ทำนายผลได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำนายพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าความเค้นสูงสุด มีความแม่นยำมาก ทั้งนี้ยังสามารถทำนายค่าความเครียดได้รับการปรับปรุงให้แม่นยำขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: การโอบรัดคอนกรีต, แบบจำลองอ้างอิงความแข็ง, ปอกระเจา, พอลิเมอร์เสริมเส้นใย, เส้นใยธรรมชาติ

Abstract

This research focuses on development of a stiffness-based model for predicting confined-concrete with jute fiber reinforced polymer. Based on the Bai et al.'s model, the proposed model was modified to achieve better accuracy by considering the Root Mean Square Error (RMSE) values. Then, the predicted results from the modified model were compared with the experimental results, especially the peak axial stress and strain. In the modified model, the ratio of the confinement stiffness of the FRP jacket to the compressive strength of unconfined concrete denoted by the parameter ρ was modified to improve the predicting results, in particular to hardening and softening behavior. In addition, the predicted axial strain was significantly improved through the modified model.

Keywords: Concrete confinement, FRP, Jute, Natural fibre, Stiffness-based model

คำนำ

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหรือ Fiber Reinforced Polymer (FRP) ในการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่วัสดุ FRP ที่ใช้จะเป็นเส้นใยสังเคราะห์ เช่น คาร์บอน (Carbon) แก้ว (Glass) อะรามิด (Aramid) เป็นต้น โดยมีคุณสมบัติเชิงกลเด่นคือ น้ำหนักเบา และต้านทานแรงดึงได้สูง แต่การใช้วัสดุ FRP ทั่วไปในการเสริมกำลังจะมีราคาที่สูง ทำให้ผู้วิจัยส่วนใหญ่หันมาศึกษาวัสดุทางเลือกที่ราคาต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งเส้นใยธรรมชาติเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน แล้วยังพบว่ามิงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเส้นใยปอกระเจา (Jute) มาใช้เสริมกำลังคอนกรีตโดยพบว่ามีความสมบัติเชิงกลเด่น คือ น้ำหนักเบา สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ มีราคาต่ำ และสามารถต้านทานแรงดึงที่สูง จากนั้นการนำเส้นใยปอกระเจามาโอบรัด คอนกรีตจะช่วยให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักในตามแนวแกนได้เพิ่มขึ้น และสามารถลดการเสียรูปของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับแบบจำลองใช้ออกแบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโอบรัดคอนกรีตจะมีมาตรฐานการออกแบบอยู่ใน American Concrete Institute (ACI) 440.2R-08 แต่แบบจำลองนี้ส่วนใหญ่มีพื้นฐานการพัฒนาจากการทดลองเส้นใยคาร์บอนเป็นหลัก ในขณะที่การศึกษานี้จะมุ่งเน้นในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับออกแบบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจาหรือเส้นใยธรรมชาติให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยการนำแบบจำลองอ้างอิงความแข็ง (Stiffness-based Model) มาใช้เป็นพื้นฐานเพื่อใช้ทำนายผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา (Jute Fiber Reinforced Polymer, JFRP) (มาตรฐาน ACI 440.2R-08, 2008; Bai et al., 2019; Jirawattanasomkul et al., 2019)

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและการพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองด้วยวิธี Stiffness-based method เสนอโดย Bai et al. (2019) ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายโดยแบบจำลองจะเป็นผลการทดลองคอนกรีตที่โอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา หรือ วัสดุ JFRP ภายใต้อาณัติตามแนวแกนจากการศึกษาของ Jirawattanasomkul et al. (2019)

การวิเคราะห์ Stiffness-based Model ใช้กับวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา (JFRP)

จากการศึกษาแบบจำลองด้วยวิธี Stiffness-based method ของ Bai et al. (2019) พบว่า แบบจำลองดั้งเดิมสามารถใช้ทำนายวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีพฤติกรรมเป็นแบบเส้นตรงมีสองความชัน (Bilinear) ได้ ดังนั้นจากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุ JFRP โดย Jirawattanasomkul et al. (2019) จะพบว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดของวัสดุ JFRP จะเป็นแบบเส้นตรงมีสองความชัน (Bilinear) ซึ่งมีความแตกต่างจากพฤติกรรมของ FRP ทั่วไป เช่น CFRP ที่มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงเส้นเดียว (Linear) ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของ JFRP สามารถวิเคราะห์ได้ดังแสดงใน Fig. 1

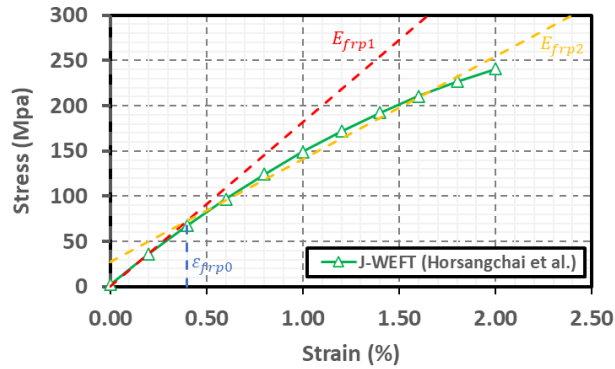


Fig. 1 Define parameter on stress-strain curve of JFRP

จากความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดของวัสดุ JFRP ดังแสดงใน Fig. 1 จะสามารถสรุปเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ (Equation 1):

$$\begin{cases} \sigma_f = E_{frp1} \varepsilon_{frp} & \varepsilon_{frp} \leq \varepsilon_{frp0} \\ \sigma_f = E_{frp2} \varepsilon_{frp} + C & \varepsilon_{frp} > \varepsilon_{frp0} \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ E_{frp1} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นส่วนแรก

E_{frp2} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นส่วนที่สอง

ε_{frp0} คือ ความเครียดที่จุดตัดกันระหว่างกราฟสองเส้น

C คือ ค่ากำลังคงที่โดยเส้นส่วนที่สองตัดกับแกน σ_f

จากการศึกษาของ Lam and Teng et al. (2009) จะพบว่าค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของการถูกโอบรัดสามารถแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนความแข็งในการโอบรัดของ FRP ($E_{frp} t_{frp} / R$) ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตไม่ถูกโอบรัด f'_{co} โดยค่าอัตราส่วนดังกล่าว จะใช้สัญลักษณ์ ρ และสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Equation 2):

$$\rho = \frac{2E_{frp} t_{frp}}{Df'_{co}} \quad (2)$$

โดยที่ E_{frp} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP

t_{frp} คือ ความหนาของ FRP

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของคอนกรีต

และ f_l คือ แรงดันด้านข้างที่เกิดการแตกร้าวของ FRP กำหนดโดย (Equation 3):

$$f_l = \frac{E_{frp} t_{frp} \varepsilon_{h,rupt}}{R} \quad (3)$$

โดยที่ $\varepsilon_{h,rupt}$ คือ ความเครียดแตกร้าวตามแนวเส้นรอบวง (Hoop Rupture Strain) ของ FRP

R คือ รัศมีของคอนกรีต

σ_l คือ แรงดันด้านข้างขณะที่ถูกโอบรัดโดย FRP (Equation 4):

$$\sigma_l = \frac{2E_{frp}t_{frp}(-\varepsilon_l)}{D} \tag{4}$$

ในส่วนของค่า ε_{co} ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่าทางทฤษฎีที่ความเค้นตามแนวแกนสูงสุดของเส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียดแบบพาราโบลาสำหรับคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ซึ่งกำหนดโดย (Equation 5):

$$\varepsilon_{co} = \frac{2f'_{co}}{E_i} \tag{5}$$

ซึ่ง E_i คือค่าโมดูลัสเริ่มต้นของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด และนำมาเป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต E_c ถูกกำหนดสมการโดย American Concrete Institute (ACI) (Equation 6):

$$(E_c = 4700\sqrt{f'_{co}}) \tag{6}$$

แบบจำลองปรับปรุงใหม่ (Equation 7) โดย Bai et al. (2019) ซึ่งพัฒนามาจากการศึกษาของ Dai et al. (2011) โดยได้กำหนดค่าไว้ดังนี้

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} = \left(1.0 + 8.0 \frac{\sigma_l}{f'_{co}}\right) \cdot \left[0.970 \left(\frac{-\varepsilon_l}{\varepsilon_{co}}\right)^{0.431} + 0.067 \left(\frac{-\varepsilon_l}{\varepsilon_{co}}\right)\right] \tag{7}$$

ความแข็งตามแนวแกนของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย FRP มีพฤติกรรมแข็งขึ้นหรืออ่อนลง สำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย JFRP ความชันของส่วนที่สามตาม Fig. 2 ถูกกำหนดโดย E_2^* เพื่อแยกความแตกต่างจากความชันของส่วนที่สอง E_2 โดยมี $(\varepsilon_l, \sigma_l)$ เป็นจุดเปลี่ยนผ่านครั้งที่ 1 และมี $(\varepsilon_l^*, \sigma_l^*)$ เป็นจุดเปลี่ยนผ่านครั้งที่ 2 โดยที่ σ_l^* คือความเค้นตามแนวแกนที่ ε_l^* จาก Fig. 3 ความแกร่งจากการโอบรัดในส่วนที่สามถูกแสดงโดย ρ^* และส่วนที่สองถูกแสดงโดย ρ ซึ่ง Equation 2 ใช้ในการหาค่า ρ และ ρ^* โดยแทน E_{frp1} และ E_{frp2} ตามลำดับ

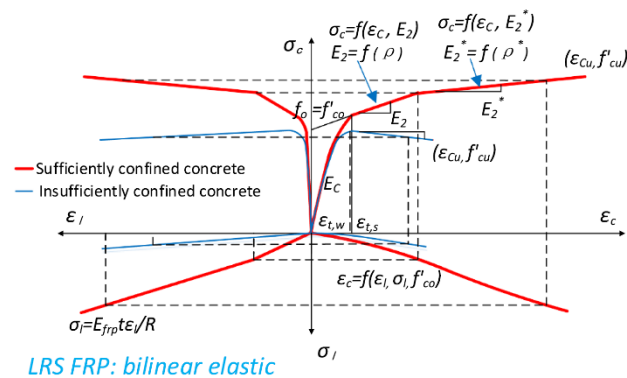


Fig. 2 Stiffness-based design-oriented model for FRP-confined concrete

สำหรับค่า E_2 (Equation 8) และ E_2^* (Equation 9) ได้รับการปรับปรุงใหม่โดย Bai et al. (2019) ถูกกำหนดดังนี้:

$$\frac{E_2}{f'_{co}} = -259.8\rho^{-0.5} + 108.5 \tag{8}$$

$$\frac{E_2^*}{f'_{co}} = -57.7(\rho^*)^{-0.5} + 38.1 \tag{9}$$

Stiffness-based design model สำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย JFRP โดย Bai et al. (2019)

ค่าความเครียดที่จุดเปลี่ยน ϵ_t (Equation 10–11) ได้ดังนี้

$$\epsilon_t = \frac{2f'_{co}}{E_c - E_2} \quad (E_2 \geq 0) \tag{10}$$

$$\epsilon_t = \frac{2f'_{co}(E_c - E_2)}{E_c^2} \quad (E_2 < 0) \tag{11}$$

นอกจากนี้ค่าความเค้นที่จุดเปลี่ยน σ_t (Equation 12–13) ได้ดังนี้

$$\sigma_t = f'_{co} + E_2\epsilon_t \quad (E_2 \geq 0) \tag{12}$$

$$\sigma_t = E_c\epsilon_t - \frac{E_c^2}{4f'_{co}}\epsilon_t^2 \quad (E_2 < 0) \tag{13}$$

กรณีนี้ที่คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย JFRP กรณีที่ถูกโอบรัดอย่างเพียงพอ (Equation 14) ถูกกำหนดดังนี้

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c\epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}}\epsilon_c^2 & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t \\ f'_{co} + E_2\epsilon_c & \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t^* \\ \sigma_t^* + E_2^*(\epsilon_c - \epsilon_t^*) & \epsilon_t^* \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \tag{14}$$

นอกจากนี้สำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย JFRP กรณีที่ถูกโอบรัดอย่างไม่เพียงพอ (Equation 15) ถูกกำหนดดังนี้

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c\epsilon_c - \frac{E_c^2}{4f'_{co}}\epsilon_c^2 & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t \\ f'_{co} + E_2(\epsilon_c - \epsilon_t) & \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t^* \\ \sigma_t^* + E_2^*(\epsilon_c - \epsilon_t^*) & \epsilon_t^* \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \tag{15}$$

กระบวนการทำงานของแบบจำลองนำเสนอตามแบบฉบับ Bai et al. (2019) ดังแสดงใน Fig. 3

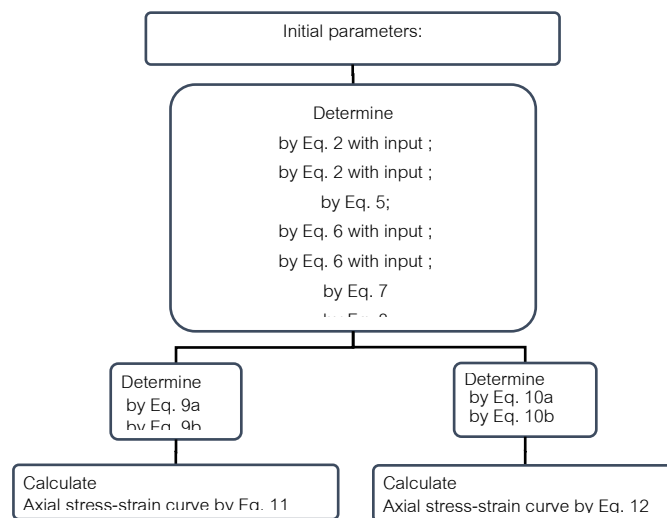


Fig. 3 Flowchart for the stress-strain curves by stiffness-based model of Bai et al. (2019)

ในส่วนของการแทนค่าในพหามิตอร์ที่ตั้งต้นใน Fig. 3 สามารถใช้ตาม Table 1 ได้

Table 1 The value used from Jirawatanasomkul et al. 2019 to update this study.

No	Ref.	FRP Type	D/h (mm)	f'_{co} (Mpa)	t_{frp} (mm)	E_{frp1} (Gpa)	E_{frp2} (Gpa)	$\epsilon_{h,rup}$ (%)	ϵ_{frp0} (%)	ρ	ρ^*
Jirawatta											
1	nasomkul et al.	Jute	100/200	20.06	0.18	16.35	11.83	1.27	0.40	2.93	2.12
2	(2019)			20.06	0.36	16.35	11.83	1.27	0.40	5.87	4.25
3				20.06	0.53	16.35	11.83	1.27	0.40	8.64	6.25
4				20.06	0.71	16.35	11.83	1.27	0.40	11.57	8.38
5				20.06	0.89	16.35	11.83	1.27	0.40	14.51	10.50
6				20.06	1.07	16.35	11.83	1.27	0.40	17.44	12.62

การพัฒนา Stiffness-based Model ใช้กับ JFRP

การพัฒนาปรับปรุง Stiffness-based Model ให้สอดคล้องกับผลการทดสอบ JFRP ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์โดยใช้ Stiffness-based Model แบบต้นฉบับของ Bai et al. (2019) พบว่าแบบจำลองที่ใช้ทำนายสถานะการแข็งขึ้นหรืออ่อนลงได้ไม่ดี ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไข การแข็งขึ้นหรืออ่อนลงนั้นถูกกำหนดโดยอัตราส่วนความแข็งในการโอบรัดของ FRP jacket ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตไม่ถูกโอบรัดในรูปของค่า ρ และ ρ^* เท่ากับ 11.5 และ 6.5 แล้วหลังจากการปรับแก้เงื่อนไขค่า ρ และ ρ^* มีแนวโน้มที่ดีขึ้น แต่พบว่าค่า σ_c ของผลการทดสอบมีค่าที่สูงกว่า และ ϵ_c ของผลการทดสอบมีค่าที่มากกว่าเช่นเดียวกัน แล้วถ้าเป็นไปตาม Equation 11 และ 12 จะสรุปได้ว่า ถ้าค่า ϵ_c มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่า σ_c เพิ่มขึ้นตามด้วย และสามารถปรับค่า ϵ_c ได้ใน Equation 6 ซึ่งหลังจากปรับปรุงแล้วทำให้ได้ผลที่ดีขึ้น และการปรับปรุงเป็นไปตามขั้นตอนดัง Fig. 4

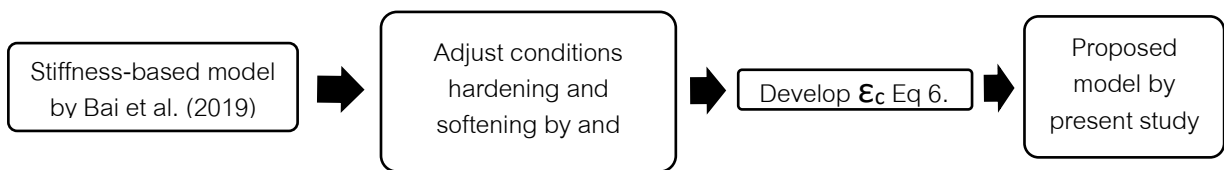


Fig. 4 Development stress-strain curves by proposed model

ในลำดับต่อมาจะเป็นการปรับปรุง Equation 6 ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วย JFRP ซึ่งมีตัวชี้วัดคือ RMSE จะต้องมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด และปรับปรุงเฉพาะค่าคงที่ภายใน Equation 6 ซึ่งมีอยู่ 5 ตำแหน่งที่เป็นค่าคงที่ และปรับปรุงใหม่ได้ตามสมการ (Equation 16) ดังนี้

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} = \left(1.25 + 3.0 \frac{\sigma_l}{f'_{co}} \right) \cdot \left[0.50 \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right)^{0.537} + 0.237 \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right) \right] \tag{16}$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาที่พบว่า Stiffness-based model มีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งสำหรับการใช้ทำนายผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา (JFRP) โดยเฉพาะแบบจำลองนี้สามารถทำนายได้ทั้งพฤติกรรม การแข็งขึ้นและอ่อนลง ซึ่งผลการทดลองของคอนกรีตโอบรัดด้วยวัสดุ JFRP บางส่วนจะมีพฤติกรรมเป็นแบบอ่อนลง เมื่อทำการปรับปรุงตามกระบวนการที่กล่าวมา ทำให้ได้ผลตาม Fig. 5 ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบอ่อนลงในการโอบรัดที่ 1 ถึง 3 รอบ และรอบที่ 4 ถึง 6 จะมีพฤติกรรมเป็นแบบแข็งขึ้น โดยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาจะทำนายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดนั้นจะมีกำลังเท่ากับกำลังของคอนกรีตเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีการโอบรัดอย่างไม่เพียงพอ ทำให้การโอบรัดไม่ส่งผลต่อการเสริมกำลังของคอนกรีตได้

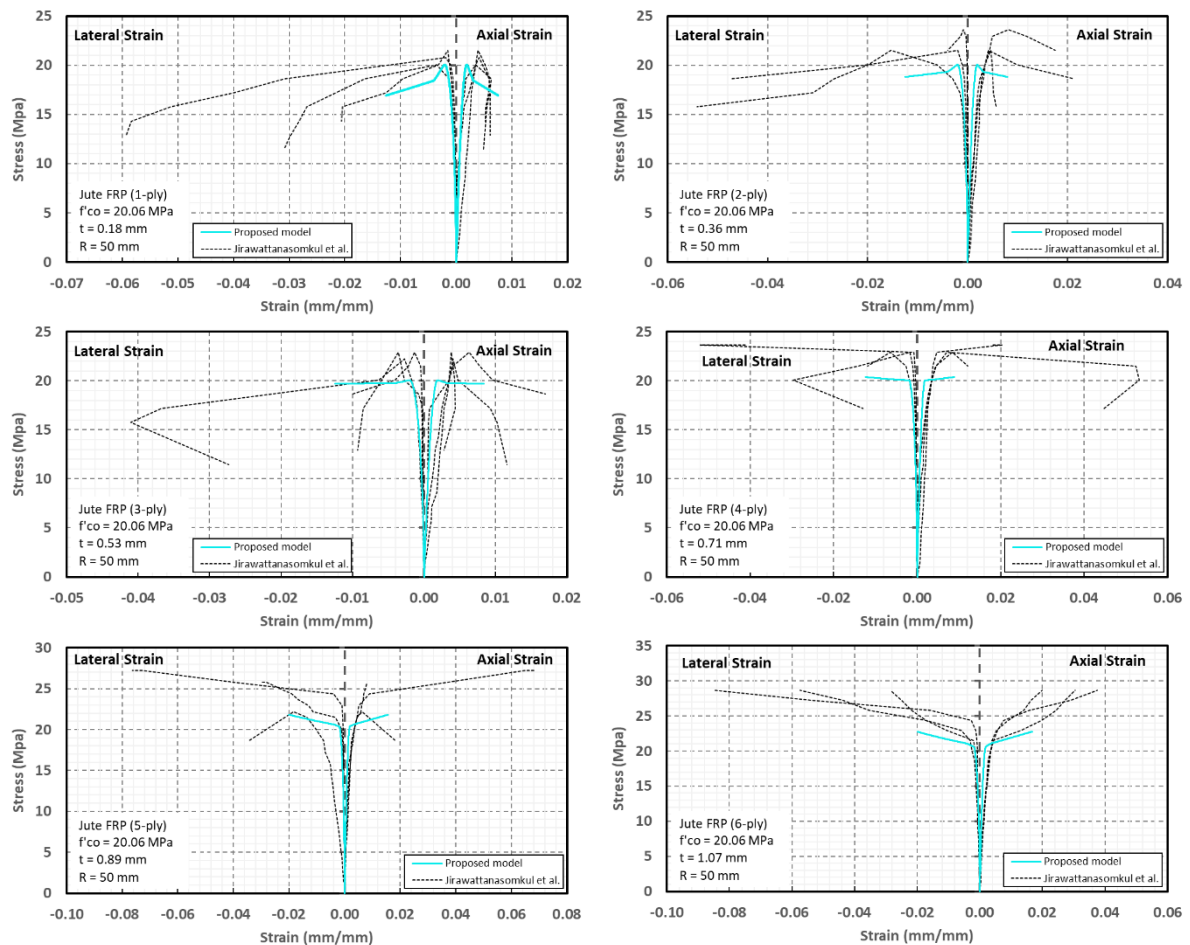


Fig. 5 Performance of the proposed model for JFRP-confined concrete.

ในส่วนการทำนายค่า ϵ_c ที่ตำแหน่ง σ_c สูงสุด และค่า σ_c สูงสุดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบโดยใช้ RMSE วัดความแม่นยำของแบบจำลอง หลังจากเปรียบเทียบดัง Fig. 6 แสดงความเครียดตามแนวแกนสูงสุดและความเค้นตามแนวแกนสูงสุดที่ทำนายได้สำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความเค้นสูงสุดที่ทำนายไว้ต่อผลการทดลองสำหรับคือ 0.955 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.087 และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความเครียดสูงที่ทำนายได้ต่อผลจากการทดลองคือ 1.291 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 1.081 จะสังเกตเห็นได้ว่าหลังจากปรับปรุงแบบจำลองแล้วส่งผลให้การทำนายค่า σ_c ไม่แม่นยำขึ้น เนื่องจาก RMSE = 3.673 เมื่อเทียบกับ Stiffness-based Model ต้นฉบับที่ RMSE = 1.255 แต่ในทางกลับกันการทำนายค่า ϵ_c มีความแม่นยำขึ้นโดย RMSE = 0.205 ซึ่งน้อยกว่าแบบจำลองที่เหลือ

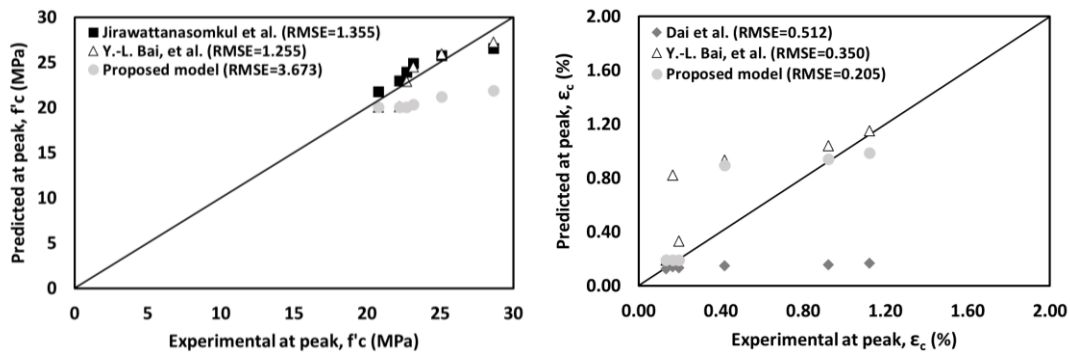


Fig. 6 Prediction of the stress strain values for peak point for JFRP-confined concrete.

สรุป

จากการศึกษาเรื่องการพัฒนา Stiffness-based Model เพื่อใช้ทำนายผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) แบบจำลองที่นำเสนอใหม่สามารถทำนายพฤติกรรมความแข็งแรงของคอนกรีตโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจาได้แม่นยำขึ้น เมื่อเทียบกับแบบจำลองตั้งต้น
- 2) การทำนายความเครียดตามแนวแกนหลังถูกพัฒนาก็สามารถทำนายได้แม่นยำมากขึ้นด้วยแบบจำลองที่นำเสนอใหม่ แต่ในทางกลับกันแบบจำลองปรับปรุงใหม่นี้ทำนายความเค้นตามแนวแกนได้ไม่ดี ซึ่งแบบจำลองตั้งต้นสามารถทำนายได้ดีกว่ามาก
- 3) จากผลลัพธ์เห็นได้ชัดว่าแบบจำลองปรับปรุงใหม่นี้ทำนายความเค้นได้น้อยกว่าความเป็นจริงค่อนข้างมาก ซึ่งอาจจะเป็นผลจากสมการหาความเค้น เพราะฉะนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการปรับปรุงสมการหาค่าความเค้นนี้
- 4) ปัจจุบัน สามารถนำแบบจำลองที่มีอยู่สามารถนำมาปรับปรุงพัฒนา เพื่อทำนายผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา แต่อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากธรรมชาติมักมีคุณสมบัติต่างๆที่หลากหลายเป็นอย่างมาก ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ดังนั้นพฤติกรรมการโอบรัดในคอนกรีตจึงอาจเกิดความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลให้การพัฒนาแบบจำลองคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากธรรมชาติชนิดอื่นๆจึงเป็นประเด็นสำคัญสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต
- 5) จากงานวิจัยที่ผ่านมาเส้นใยปอกระเจามีความสามารถในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และเพิ่มความเหนียวได้ 42% และเส้นใยปอกระเจามีความแข็งแรงรับแรงดึงที่ 2.94 จิกะปาสคาล-มิลลิเมตร โดยงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทำนายผลซึ่งเส้นใยปอกระเจามีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอนาคตมากกว่าเส้นใยธรรมชาติประเภทอื่น

ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็น

เส้นใยปอกระเจาในปัจจุบันมีการนำมาถักทอผ้า และเป็นพืชที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น ถ้ามีการนำมาแปรรูปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างก็สามารถทำได้ง่าย และเนื่องด้วยการโอบรัดด้วยเส้นใยปอกระเจามีการเชื่อมติดกับคอนกรีตโดยวัสดุเชื่อมประสาน เช่น อีพ็อกซีเรซิน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี และยังสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 250 องศา จึงทำให้วัสดุเชื่อมประสานช่วยป้องกันไม่ให้เส้นใยปอกระเจารับอิทธิพลจากธรรมชาติ

โดยตรง แต่ทั้งนี้ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำเส้นใยปอกระเจาหรือเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ มาเสริมโครงสร้างสำหรับภายนอกโดยตรงด้วยเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านทั้งภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นอย่างยิ่ง ที่มีส่วนช่วยให้คำปรึกษา และเวลาในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งผู้เขียนได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีตลอดการทำงานวิจัย รวมถึงทุนในการเสนอผลงานจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ผู้เขียนยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ทางคณะสนับสนุนสำหรับการเสนอผลงานในการประชุมวิชาการในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- American Concrete Institute (ACI), 2008. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI-440 2R., Farmington Hills, Mich, U.S.A.
- Bai, Y.-L., Dai, J.-G., Mohammadi, M., Linb, G., Meia, S.-J. 2019. Stiffness-based design-oriented compressive stress-strain model for large rupture-strain (LRS) FRP-confined concrete. Compos. Struct. 223: doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110953
- Dai, J.-G., Bai, Y.-L., J. G. Teng. 2011. Behavior and modeling of concrete confined with frp composites of large deformability. J. Compos. Constr. 15: 963–973.
- Jirawattanasomkul, T., Ueda, T., Likitlersuang, S., Zhang, D., Hanwiboonwat, N., Wuttiwannasak, N., Horsangchai, K. 2019. Effect of natural fibre reinforced polymers on confined compressive strength of concrete. Constr. Build Mater. 223: 156–164.
- Lam, L., Teng, J.G. 2009. Stress–strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression. Eng. Struct. 31: 308–321.

การเสริมกำลังจุดต่อเสา-คานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยใช้ระบบแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง

Deficient External RC Beam-Column joints with low compressive strength concrete using prestressed metal strapping

สรายุทธ สำราญบึงแก^{a,*}, อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ^a, ทนงศักดิ์ อิมใจ^b

Sarayut Samranbungkae^{a,*}, Udomwit Chaisakulkiat^a, Thanongsak Imjai^b

^aคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73170

^bสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ นครศรีธรรมราช 80160

^aFaculty of Engineering Rajamangala University of Technology Rattanakosin , Nakhon Pathom 73170, Thailand

^bSchool of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

*Correspond author. E-mail address: satm300937@gmail.com

บทคัดย่อ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างโดยไม่ได้ออกแบบรับแผ่นดินไหวจะมีความอ่อนแอและเกิดความเสียหายที่จุดต่อหรือชิ้นส่วนเสา-คาน บทความนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาการเสริมกำลังจุดต่อเสา-คานที่มีคอนกรีตกำลังอัดต่ำ จำนวน 1 ตัวอย่าง คือ JC-1 โดยใช้ระบบแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง ในการออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องรับแรงบิดที่อาจเกิดจากแผ่นดินไหว หรือการรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง ซึ่งการวิบัติของอาคารจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงทั้งชีวิตและทรัพย์สิน โดยส่วนใหญ่มักจะพบว่า เสากับคาน ที่เป็นองค์ประกอบหลักมักจะเกิดการวิบัติก่อน ผลการทดสอบระบุได้ว่าเทคนิค Post-Tensioned Metal Strapping มีประสิทธิภาพมากในการเสริมแรงคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้นทุนต่ำ มีความสะดวกและความรวดเร็วในการใช้งาน เทคนิคนี้จึงมีความสามารถในการซ่อมแซมและสร้างความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยเฉพาะในโครงสร้างที่ไม่ได้มาตรฐานของประเทศที่กำลังพัฒนาได้

คำสำคัญ: จุดต่อเสา-คาน, แผ่นเหล็กอัดแรงรัดรอบภายหลัง, เสริมกำลัง, แผ่นดินไหว

Abstract

Reinforced concrete buildings constructed without seismic design are subject to susceptibility and damage to joints or column-beam parts. This article aims to study the reinforcement of column-beam joints with low compressive strength concrete, 1 examples, JC-1 by using a pre-stressed steel plate system for later tightening. In structural design, it is necessary to bear the torque that may be caused by earthquakes, or receiving the force acting off-center. The collapse of the building will cause severe damage to both life and property. Most often, it is found that the pillars and beams that are the main components tend to be catastrophic first. The test results indicated that the technique Post-Tensioned Metal Strapping is very effective in reinforced concrete, low cost, convenient and quick to use. This technique is therefore capable of repairing and building structural strength, especially in non-standard structures of developing countries.

Keywords: Column-Beam joint, Earthquake, Post-Tensioned Metal Strapping, Reinforcement,

คำนำ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมสูงสุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่นๆ อย่างไรก็ตาม อาคารที่ก่อสร้างแล้วหลายๆ อาคารค้ำถั่งถึงเพียงแค่การออกแบบเพื่อรองรับแรงกระทำจากน้ำหนักในแนวตั้งเท่านั้น โดยมิได้ค้ำถั่งถึงผลจากแรงด้านข้าง ซึ่งมีพฤติกรรมชั้นที่อ่อนแอและพฤติกรรมของโครงสร้างมีลักษณะ “เสาอ่อน-คานแข็ง” ซึ่งเมื่ออาคารลักษณะนี้ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว มีความเสี่ยงที่จะเกิดการวิบัติ เนื่องจากแรงเฉือนที่เสาและจุดต่อคาน-เสาดังตัวอย่างเช่น จากในเหตุการณ์แผ่นดินไหว 6.3 ริคเตอร์ ที่ อ.พาน จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ที่ผ่านมาก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างบ้านเรือนอย่างมากมาย เหตุการณ์แผ่นดินไหวในครั้งนี้ ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเสาเป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุดของอาคาร เพราะเสาเป็นโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักของอาคารทั้งหลัง ดังนั้นความแข็งแรงของเสาจึงเป็นเรื่องที่สำคัญที่สุดของอาคารในการต้านแผ่นดินไหว แต่สำหรับอาคารเก่าที่ก่อสร้างมานานแล้ว เสาอาจจะมีกำลังรับน้ำหนักไม่พอ จึงต้องหาแนวทางเสริมความแข็งแรงให้แก่เสาอาคารต่อไป (Frangou, 1996) โครงสร้างคอนกรีตและโครงสร้างเหล็กนั้นจะกระทำเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง) เพื่อให้แบกรับน้ำหนักได้มากขึ้นหรือเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยที่เหลืออยู่หลังรับน้ำหนัก หรือเพื่อปรับปรุงพฤติกรรมของโครงสร้าง เช่น ลดการแอ่นตัว, ลดการเคลื่อนหรือแกว่งตัว ซึ่งโดยทั่วไปมาตรฐานของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Structures) ในอดีตมิได้ถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ที่เรียกว่า (Substandard seismic design) ดังมีรายละเอียดเหล็กเสริม เช่นเมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหวการวิบัติก็มักเกิดที่บริเวณจุดรอยต่อระหว่างเสา และคาน ซึ่งเป็นผลทำให้ห้องค้ำอาคารโดยรวมเกิดการวิบัติได้ (Pilakoutas and Dritsos, 1992)

ในประเทศไทย คณะวิจัยโดย Imjai และคณะ (Imjai et al., 2016) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธี PTMS และ EBR และได้ทำการปรับปรุงวิธีการหุ้มรอบและอุปกรณ์จับยึด เพื่อลดปัญหาจากการคลายตัวในระยะยาว เช่น Stress relaxation โดยการเพิ่มการจับยึดด้วย Mechanical anchorage โดยการใช้ Chemical bolt ระหว่างช่วงของเหล็กพืดแล้วพิจารณาพื้นที่หน้าตัดสุทธิในการออกแบบ และทำการออกแบบ Clip lock ซึ่งเป็นเหล็ก low strength เกิดสนิมได้ง่ายจึงได้มีการเปลี่ยนมาใช้ Aluminum clip lock ซึ่งจะประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังคานสำหรับงานวิจัยนี้

งานวิจัยในต่างประเทศ Frangou และ Pilakoutas (Frangou and Pilakoutas, 1994) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของวิธี PTMS ในการเพิ่ม ความเหนียวและกำลังขององค์อาคารคอนกรีต โดยทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกขนาดหน้าตัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 100 × 100 × 100 มม. ตัวอย่างถูกรัดด้วยแถบเหล็กพืด (แผ่น โลหะอ่อนมีขนาดบางแต่กำลังดึงสูง) ที่มีความกว้าง 12.7 มม. และความหนา 0.5 มม. ใช้แถบเหล็กสองชนิดที่มีกำลัง ประลัย 490 MPa (Bryten strap) และ 770 MPa (Extratren strap) ผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดและไม่ถูกโอบรัด โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของเหล็กพืด (Bryten และ Extratren) และระยะห่างของการโอบรัด ($s' = 0, 12.7, 25.4$ มม.)

Ma et al. ได้ทดสอบเสาที่ทำจากคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 9 ต้น โดยทำการโอบรัดเสา 6 ต้นด้วยวิธี PTMS เสาเหล่านี้มีขนาดหน้าตัด 140 × 140 มม. และยาว 600 มม. เสาเหล่านี้ถูกทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกน และแรงอัดเฉียงศูนย์ ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ PTMS ที่ช่วยเพิ่มกำลังและความเหนียวให้กับเสาเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังช่วยเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของเสาจากลักษณะเปราะเป็นแบบเหนียว ส่วนกำลังรับแรงดัดของเสาเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 22 เมื่อใช้ PTMS ในการโอบรัด (Ma et al., 2016)

งานวิจัยอีกชิ้นที่ยืนยันประสิทธิภาพของ PTMS คืองานของ Holmes และคณะ (Holmes et al., 2015) ซึ่งได้ตรวจสอบการใช้ รูปแบบต่างๆ ของเทคนิค PTMS ในการปรับปรุงความสามารถในการรับน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก เทคนิคนี้ใช้แถบเหล็กอ่อนยึดรอบทรงกระบอก พบว่าค่าแรงดึงที่แตกต่างกันในแผ่นโลหะรัดรอบมีผลต่อความกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวแสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงตามขวาง (lateral stress) ที่จุดสูงสุดของกราฟจะเพิ่มขึ้น และความเหนียวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 53

จากการศึกษาต่อเนื่องโดย Garcia and Pilakoutas (2014) ได้ทำการศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังเสาด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ (EBR) และระบบแผ่นเหล็กอัดแรงรัดรอบภายหลัง (PTMS) ผลจากการศึกษาเปรียบเทียบพบว่าวัสดุใยสังเคราะห์สามารถเพิ่มกำลังอัดในแนวแกนของคอนกรีตได้ถึง 35% เมื่อค่าความเครียดของคอนกรีตถึง 0.004 และระบบ PTMS สามารถเพิ่มกำลังอัดในแนวแกนของคอนกรีตได้ถึง 40% เมื่อค่าความเครียดของคอนกรีตถึง 0.004 ซึ่งให้ข้อสรุปไปในทิศทางเดียวกับผลการศึกษาโดย Papastergiou et al., 2009

ระบบการเสริมกำลังแบบการใช้ไฟเบอร์เสริมกำลังในโครงสร้างคอนกรีต ยังต้องมีการทดสอบในระยะยาวและต้องการเทคนิคในการติดตั้งจากผู้ที่มีประสบการณ์เป็นอย่างดี เพื่อให้ผลของการติดตั้งมีคุณภาพ อีกทั้งค่าใช้จ่ายในด้านวัสดุในปัจจุบันค่อนข้างสูง Frangou and Pilakoutas (1996) มีแนวคิดในการพัฒนารูปแบบการเสริมกำลังที่คล้ายกับการประยุกต์ในวัสดุใยสังเคราะห์ แต่มีต้นทุนทางด้านวัสดุที่ต่ำกว่า ประกอบกับขั้นตอนการติดตั้งได้รวดเร็วและง่ายเหมาะกับประเทศที่กำลังพัฒนา ซึ่งมีลดการนำเข้าวัสดุจากต่างประเทศ รูปแบบการเสริมกำลังโครงสร้างเสาโดยการประยุกต์ใช้แผ่นเหล็กอัดแรงรัดรอบภายหลัง ผลจากการศึกษาวิจัยโดย Frangou and Pilakoutas (1996) พบว่าการใช้แผ่นเหล็กอัดแรงรัดรอบภายหลังสำหรับตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ 25-30% อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ติดตั้งเพื่อกันการคลายตัวของแผ่นเหล็กควรมีการศึกษาพัฒนาต่อไป

บทความนี้ นำเสนอผลการทดสอบของพฤติกรรมจุดต่อคาน-เสารูปตัวที (T) จำนวน 1 ตัวอย่าง คือ JC-1 โดยทำการทดสอบทั้งหมด 2 ระยะ ซึ่งระยะที่ 1 เป็นการทดสอบโครงสร้างที่ไม่ได้มีการเสริมกำลัง ทำการทดสอบกระทั่งเกิดรอยร้าว และระยะที่ 2 ทำการโอบรัดด้วยเหล็กอัดแรง (PTMS) ทำการทดสอบกระทั่งเหล็กคานและเกิดการวิบัติ โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังจุดต่อเสาคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธี Active Confinement

วิธีการวิจัย

ตัวอย่างในการศึกษา

ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาสำหรับการทดสอบถูกออกแบบโดยไม่ได้พิจารณาแรงแผ่นดินไหว ซึ่งมีรายละเอียดของขนาดมิติของชิ้นส่วนโครงสร้างและเหล็กเสริม และมีคุณสมบัติของเหล็กเสริมดัง Table 1 คุณสมบัติของคอนกรีตโดยที่กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (f_c) เท่ากับ 15 MPa ดัง Table 2

Table 1 Properties of reinforcing steel

Reinforcing steel	Fu (Mpa)	Fy (Mpa)	ϵ
RB6	385	235	21
DB16	560	390	15

Table 2 Concrete properties

Cement	Mix proportion (kg/m ³)			w/c ratio	Slump
	Coarse aggregates	Fine aggregates	Water		
250	1120	757.42	200	0.80.	75

การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรง

การทดสอบในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังจุดต่อเสาคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธี Active Confinement ($f'_c = 15 \text{ MPa}$) เสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง มีขนาด $0.8 \times 25 \text{ มม.}$ ($f_u = 950 \text{ MPa}$) โดยเครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันไฮดรอลิก ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องตั้งระบบไฮดรอลิก ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้ง โดยแรงลมขนาด 8 bar หรือ 116 psi ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดึงในเหล็กแผ่นประมาณ 400 kg

ตัวอย่างทดสอบ JC-1

ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา มีรายละเอียดขนาดหน้าตัดเหล็ก การเสริมเหล็กแสดงดัง Fig.1 โดยระยะที่ 1 ไม่มีการเสริมกำลังให้กับตัวอย่าง ทดสอบการทั้งตัวอย่างเกิดความเสียหายโดยการเกิดรอยร้าวที่บริเวณจุดต่อเสาคาน ระยะที่ 2 ทำการโอบรัดด้วยเหล็กพืดอัดแรง (PTMS) ทำการทดสอบกระทั่งเหล็กคานและตัวอย่างเกิดการวิบัติ

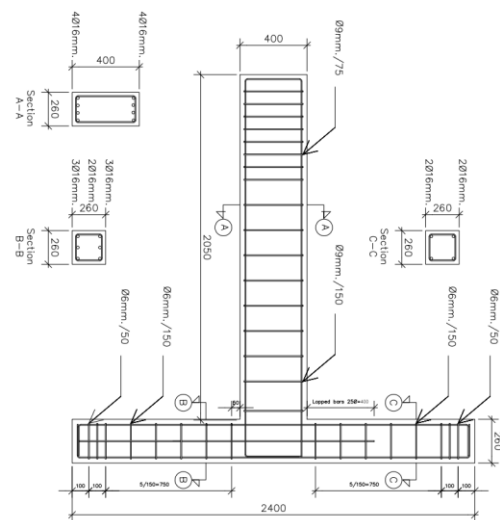


Fig. 1 Details of reinforcement in the example of the beam-column connection point reinforced concrete.

การติดตั้งและการทดสอบตัวอย่าง

การติดตั้งสำหรับการทดสอบแสดงดัง Fig. 1 โดยกำหนดสภาวะยึดรั้งแบบล้อเลื่อน (roller support) และเคลื่อนที่ได้ 1 มิติ ที่ตำแหน่งฐานเสาทั้งสองข้าง กำหนดให้มีสภาวะยึดรั้งแบบหมุด (pin support) ส่วนปลาย เสาด้านบนปล่อยให้เคลื่อนที่อิสระ (free-end) มีตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัวทั้งหมด 4 ชุด โดยทำการติดตั้งที่บริเวณปลายคาน 1 ตำแหน่ง ที่ระยะ 40 ซม. วัดจากตำแหน่งจุดต่อเสาคาน 1 ตำแหน่ง ที่ระยะ 125 ซม. วัดจากบริเวณจุดต่อเสาคาน 1 ตำแหน่ง และที่บริเวณกลางคานด้านล่าง 1 ตำแหน่ง สำหรับการทดสอบ ใช้แรงกระทำด้านข้างแบบสลับทิศที่บริเวณด้านบนของเสา โดยควบคุมการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ทุกๆ 1 มม. โดยในแต่ละการเคลื่อนที่ทำการทดสอบวนซ้ำ 2 รอบ หลังจากนั้นจึงเพิ่มระดับการเคลื่อนที่ต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์หน้าตัด

โปรแกรม Response-2000 เป็นซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์กำลังและความเหนียวของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงอัด แรงดัด และ แรงเฉือน สามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดที่คำนวณได้ยาก เช่น หน้าตัดกลมหรือ หน้าตัดรูปตัว T แสดงผลแบบกราฟฟิกและแสดงพฤติกรรมของรอยร้าวได้ พัฒนาโดย Evan C. Bentz and Michel P. Collins at University of Toronto, Canada การวิเคราะห์กำลังหน้าตัดร้าว (Cracked-sectional analysis, CSA) จะใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุ (คอนกรีตและเหล็กเสริม) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากคานตัวอย่างถูกออกแบบให้กำลังรับแรงดัดต่ำกว่ากำลังรับแรงเฉือน ดังนั้นคานตัวอย่างจะวิบัติภายใต้แรงดัด คณะวิจัยได้ทำการวิเคราะห์กำลังหน้าตัดร้าวของคาน โดยใช้โปรแกรม RESPONSE 2000 ที่พัฒนาขึ้นโดย Benz และคณะ (Benz, 2000) ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎี Modified Compressive Field Theory (Vecchio and Collins, 1986) ซึ่งต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของคอนกรีตที่ใช้จริง จึงจะสามารถวิเคราะห์กำลังหน้าตัดของคานคอนกรีตได้อย่างถูกต้อง ในช่วงน้ำหนักภาระใช้งานจนถึงช่วงวิบัติ (Vecchio and Collins, 1993)

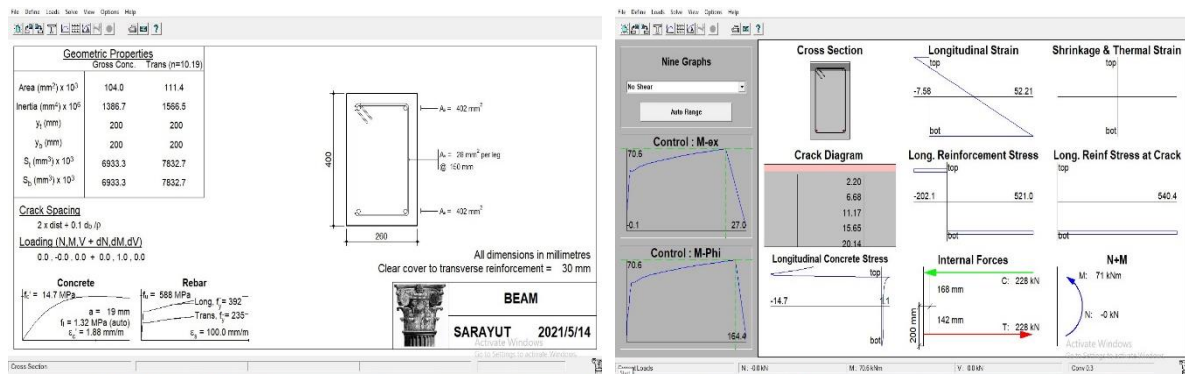


Fig. 2 Cross-sectional analysis by Response 2000 program.

ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา JC-1

ตัวอย่าง JC-1 มีพฤติกรรม hysteresis แสดงดัง Fig. 4 โดยตัวอย่างเริ่มเกิดรอยร้าวแรกเป็นแนวทแยง (diagonal crack) ที่ระยะการเคลื่อนตัว 5 มม. แต่ยังไม่เห็นรอยร้าวที่แนชัดจึงทำการเพิ่มแรงขึ้นไปเริ่มเกิดรอยร้าวเพิ่มมากขึ้นจากรอยร้าวเดิม จากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดรอยร้าวสะสมขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาเพิ่มขึ้น เมื่อการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นถึง 10 มม. ตามที่ได้กำหนดไว้ค่าแรงที่กระทำต่อตัวอย่างมีค่าเป็น 2.2 ตัน จึงหยุดทำการทดสอบ และทำการเสริมกำลังโดยการรัดรอบด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง โดยการรัดรอบจะแบ่งการรัดออกเป็น 3 ชั้น ประกอบด้วยชั้นที่ 1 ทำการโอบรัดบริเวณคานเป็นระยะ 66 ซม. วัดจากด้านล่างของเสา ชั้นที่ 2 ทำการโอบรัดตามแนวยาวของเสาเป็นระยะ 100 ซม. และชั้นที่ 3 ทำการโอบรัดรอบรอบเสาและคานเป็นช่วงดัง Fig. 3 จาก Fig. 4 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเส้นโค้งทั้งสองมีลักษณะเหมือนกันไม่มากนัก การเปลี่ยนแปลงของความแข็งเริ่มต้นเกิดขึ้นก่อนถึงความจุสูงสุด การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่โหลด 26 kN ซึ่งสอดคล้องกับ DR ที่ 8% ซึ่งตรงกับการก่อตัวของรอยแตกแรงเฉือนหลักในแกนกลางในระยะหลังพีก การเสื่อมสภาพแบบเร่งในความแข็ง (สูงถึง DR +10%) เกิดจากการไหลตัวอย่างรวดเร็วในการสลายตัว อัตราความผิดของการเสริมความแข็งแรงโดยทั่วไปแล้วสูงกว่าการไม่ได้เสริมความแข็งแรง การเสื่อมสภาพของความแข็งของหน่วย JC-1PTMS ต่อรอบจะชัดเจนว่าการเสื่อมของความแข็งจะค่อยเป็นค่อยไปจนเกิดรอยร้าวในการให้โหลดและทิศทางจะแสดงให้เห็นพฤติกรรมที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกันมีความผิดลดลง 70%

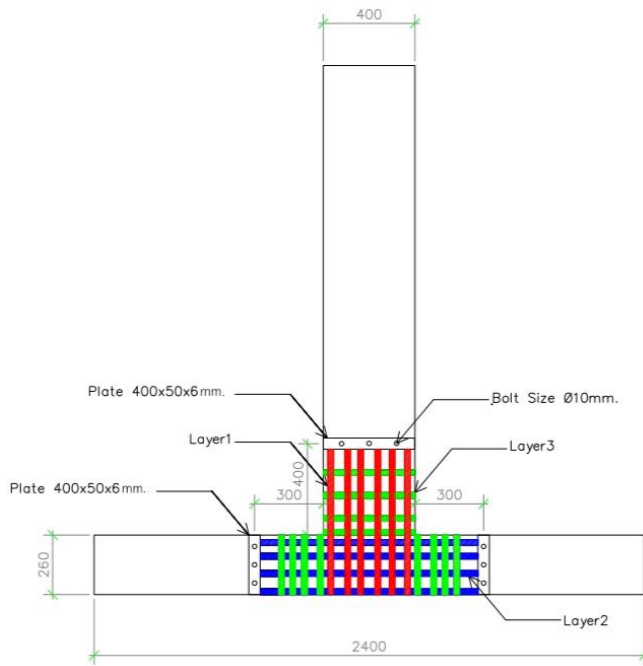


Fig. 3 Reinforcement with prestressed metal strapping.

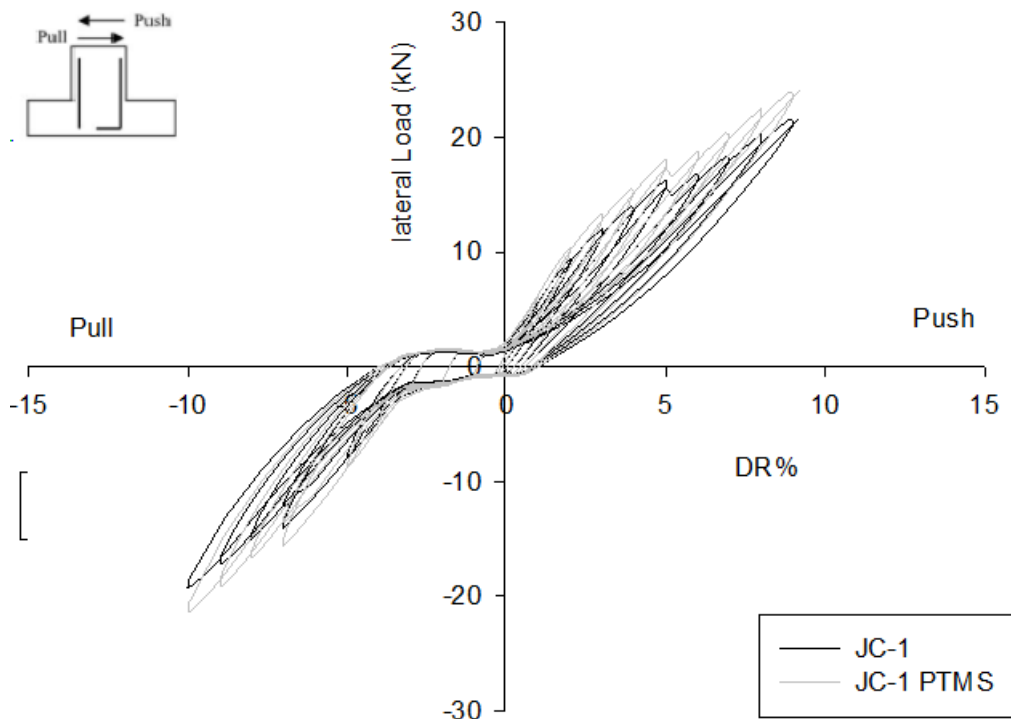


Fig. 4 The hysteresis behavior of the JC-1 and JC-1 PTMS specimen.

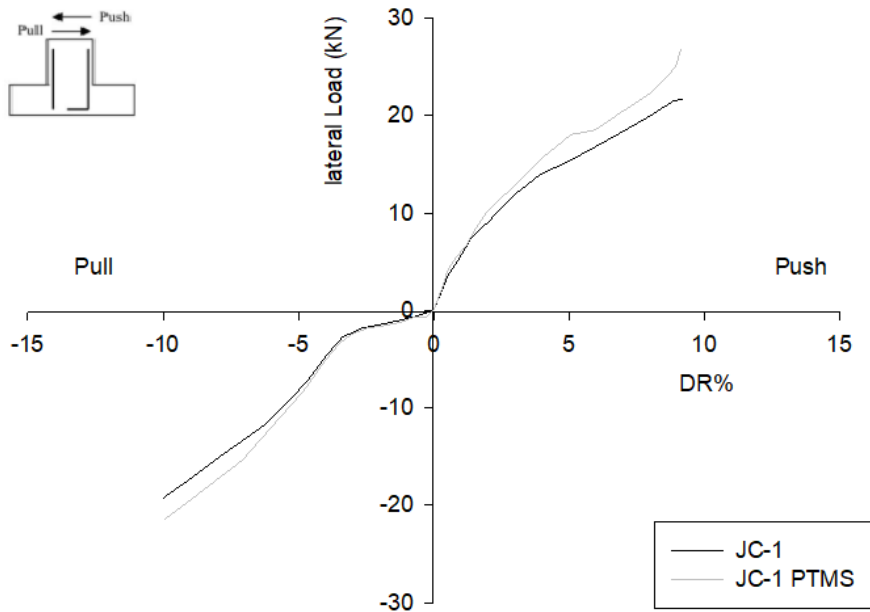


Fig. 5 Envelopes of the bare JC-1 and JC-1 PTMS strengthened.

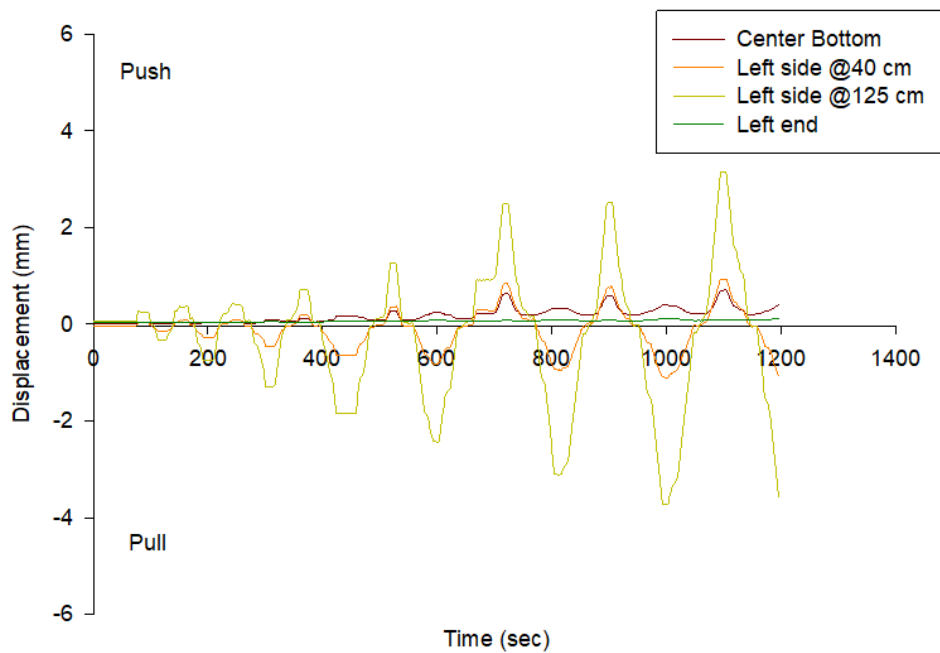


Fig. 6 Movement behavior of the sample JC-1.

ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – % Drift ratio ของตัวอย่าง JC-1 แสดงดัง Fig. 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ % Drift ratio ของ ตัวอย่าง JC-1 ตั้งแต่ % Drift ratio 0.2 หรือ 5 มม. ถึง % Drift ratio เท่ากับ 5 หรือ 125 mm โดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวกเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและความสัมพันธ์จะมีค่าเป็นลบเมื่อให้แรงกับตัวอย่างในทิศทางลง ผลจาก Fig. 4 จะพบว่าแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุดเท่ากับ 21.64 kN ที่ระยะปลายคานเท่ากับ 3.70 มม. หรือ Drift Ratio เท่ากับ 9.80% และต่ำสุดเท่ากับ -19.10 kN ที่ ระยะเคลื่อนตัวที่ปลายคานเท่ากับ -3.70 มม. ดัง Fig. 6 หรือ Drift ratio เท่ากับ -9.80 % จากรูปตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 4 หรือ %Drift Ratio ที่ 0.2 , 0.25 , 0.35 และ 0.5 จะมีลักษณะความชันของกราฟที่เป็นเส้นตรงคือแสดงถึงว่าช่วงดังกล่าว

ตัวอย่างยังคงมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติคนอกจากนั้นช่วงรูปที่แคบแสดงให้เห็นว่าการแตกร้าวและการสลายพลังงานที่น้อยในช่วงตำแหน่งที่ 4 ไปหาตำแหน่งที่ 5 พบว่าเป็นจุดที่กราฟเริ่มเปลี่ยนความชันและเป็นช่วงที่กราฟเริ่มมีรูปที่กว้างกว่ารอบก่อนหน้าแสดงถึงการแตกร้าวและการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ตำแหน่งที่ 5 ถึง ตำแหน่งที่ 8 หรือ %Drift Ratio ที่ 0.75 , 1.0 , 1.4 , 1.75 หากดูจากกราฟจะเห็นว่ารูปแต่ละรอบในช่วงดังกล่าวมีการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกันและค่อยๆแตกต่างที่ตำแหน่งที่ 8 แต่พฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันในช่วงดังกล่าวจึงทำให้กราฟในช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ตำแหน่งที่ 9 เป็นรอบที่รูปกว้างมากเมื่อเทียบกับช่วงก่อนหน้า การแตกร้าวเกิดขึ้นมากพฤติกรรมโครงสร้างมีความเป็นอีลาสติคอย่างชัดเจนรอบดังกล่าวตัวอย่างสามารถรับกำลังได้สูงสุดและเกิด plastic hinge หลังจากเกิด plastic hinge กำลังจะตกลงที่ตำแหน่ง 10 และ 11 แต่ตำแหน่งที่ 10 มีการ ลดลงของความชันที่มากกว่าทั้งนี้ทั้งนั้นรอบที่ 10 และ 11 ก็ยังคงมีรูปที่กว้างแสดงให้เห็นว่าการสลาย พลังงานยังคงเกิดขึ้นในรูปของการแตกร้าวแต่รอบที่ 12 กลับพบว่ากำลังตกอย่างมากและรูปที่เกิดขึ้นก็แคบลงเช่นกันหลังจากที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าวอย่างรุนแรงในรอบก่อนหน้า ซึ่งจาก Fig. 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวอย่างเสา-คาน ถูกรัดรอบด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลังเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้รัดรอบโหลดสูงสุดในทิศทางผลึกและดิ่ง เกิดขึ้นที่ DR% 8 และ 10 มีค่าเท่ากับ +26 kN และ -21 kN ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างในทิศทางที่ผลึกและดิ่งจึงมีค่าเท่ากับ 1.11 จะสังเกตได้ว่าอัตราส่วนจะใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ได้รัดรอบ แต่เกิดขึ้นที่คานรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเสริมความแข็งแรงมีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงถึง 30% และ 25% ในทิศทางการผลึกและการดิ่งตามลำดับ นอกจากนี้แรงกระทำสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ดริฟท์ที่สูงขึ้น การตอบสนองแบบฮิสเทติกของตัวอย่าง JC-1 PTMS แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการดัดที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง JC-1 การเสริมความแข็งแรงของจุดต่อเสา-คาน ทำให้เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและความเหนียวของจุดต่อเสา-คาน ได้ดี

จากการตรวจสอบเส้นโค้งของหน่วยเสริมกำลังพบว่ามีการบีบเล็กน้อยในการตอบสนองต่อพีค แม้ว่าบริเวณจุดต่อเสา-คาน จะเกิดการแตกร้าวแต่หลังจากนั้นรูปหลังพีคจะไม่เกิดความสูญเสียความแข็งแรงไปจนหมดเมื่อใกล้กับจุดศูนย์กลางการเคลื่อนตัวแม้จะอยู่ในระดับที่มีดริฟท์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวที่ไม่ได้เสริมกำลัง ดังนั้นวิธีการเสริมความแข็งแรงจึงทำให้ลดผลกระทบจากการบีบตัวเนื่องจากมีการป้องกันการเปิดของรอยแตกร้าวที่มากเกินไประหว่างการทดสอบ เมื่อเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงรอยร้าวมักจะเกิดขึ้นระหว่างการให้โหลดในทิศทางที่เกิดการดิ่งหรือทิศทางที่มีความอ่อนแอ เนื่องจากรอยร้าวที่มีอยู่ก่อนหน้านั้นแล้วการเสริมความแข็งแรงที่บริเวณจุดต่อเสา-คานจึงมีรอยร้าวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวที่ไม่ได้เสริมกำลัง



Fig. 7 Damage of the JC-1 and JC-1 PTMS specimen after testing.

สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบให้รองรับแรงแผ่นดินไหว โดยโดยใช้ระบบแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง จำนวน 1 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่า

1. จากตัวอย่าง JC-1 พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.16 ตัน และเมื่อตัวอย่างมีการเสริมกำลังแรงที่กระทำปลายคานมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 3.10 ตัน ที่ระยะปลายคานมีค่าการเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.70 มิลลิเมตร
2. จากตัวอย่าง JC-1 พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง แรงกระทำที่ปลายคาน (Load) ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ -1.91 ตัน และเมื่อตัวอย่างมีการเสริมกำลังแรงที่กระทำปลายคานมีค่าเพิ่มขึ้นต่ำสุดเท่ากับ 2.72 ตัน ที่ระยะปลายคานมีค่าการเคลื่อนตัวเท่ากับ -3.70 มิลลิเมตร
3. ลักษณะการเสียหายของตัวอย่าง JC-1 ณ จุดแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุด พบว่าเกิดรอยร้าวที่บริเวณข้อต่อเสาคาน (Beam-Column joint) มีความกว้างรอยร้าวประมาณ 1-2 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเมื่อมีการเสริมกำลัง พบว่ามีพฤติกรรมรอยร้าวที่มีการเสริมกำลังรอยร้าวจะเกิดน้อยกว่าและมีความกว้างรอยร้าวที่ใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร. อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ทนงศักดิ์ อิ่มใจ อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทดสอบในครั้งนี้ รวมถึงให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา ชี้แนะแนวทาง ทั้งเรื่องวิชาการ ขั้นตอนการทดสอบ ผลการทดลองและการแก้ไขรายงานในครั้งนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การอ้างอิง

- Bentz, E.C., 2000. Sectional Analysis of Reinforced Concrete, PhD thesis, University of Toronto.
- Frangou, M., Pilakoutas, K. 1994. Strengthening of RC Columns by Lateral Tensioning. ERCAD Berlin.
- Frangou, M. 1996. Strengthening of concrete by lateral confinement. Ph.D. thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, UK.
- Garcia, R., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M., et al. 2014. Full- scale shaking table tests on a substandard RC building repaired and strengthened with post-tensioned metal straps. J. Earthq. Eng. 18: 187–213.
- Holmes, N., Niall, D., OShea, C. 2015. Active confinement of weakened concrete columns. Mater. Struct. 48: 2759–2777.
- Imjai, T., Guadagnini, M., Garcia, R., Pilakoutas, K.A. 2016. Practical method for determining shear crack induced deformation in FRP RC members. Eng. Struct. 126: 253–364.
- Ma, C.K., Awang, A.Z., Omar, W., Liang, M., Jaw, S.W., Azimi, M. 2016. Flexural capacity enhancement of rectangular high-strength concrete columns confined with post-tensioned steel straps. Struct. Concr. 4: 6686-6676.
- Pilakoutas, K., Dritsos, S. 1992. Design of structural repair schemes for RC structures. In: proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, pp. 5183–5186
- Vecchio, F.J., Collins, M.P. 1986. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Journal 83: 219–231.
- Vecchio, F.J., Collins, M.P. 1993. Compression response of cracked reinforced concrete. ASCE J. Struct. Eng. 119: 3590–3610.

การศึกษาลักษณะเฉพาะของสถานีบริการรถยนต์ร่วมในกรุงเทพมหานคร

Characteristics of carsharing stations in Bangkok

สรุช บุญศิริพันธ์, กฤติน กังวาลกุลกิจ*

Saroch Boonsiripant, Krittin Kangvulkulkit*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: krittin.kan2@ku.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประชาชนมีความคุ้นเคยในการใช้บริการระบบรถยนต์ร่วมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกสบายในการเดินทาง และช่วยลดปริมาณการใช้รถส่วนบุคคล ระบบรถยนต์ร่วมมีการให้บริการในกรุงเทพมหานครตั้งแต่ พ.ศ. 2559 แต่มีงานศึกษาที่เกี่ยวกับลักษณะเฉพาะต่างๆ ของสถานีไม่มากนัก ในการศึกษาครั้งนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของสถานีบริการรถยนต์ร่วมในกรุงเทพมหานคร โดยทำการรวบรวมข้อมูลลักษณะเฉพาะต่างๆ ของสถานี ข้อมูลผู้ใช้งาน และพฤติกรรมการใช้รถยนต์ร่วม และใช้วิธีการวิเคราะห์กลุ่มในการแบ่งกลุ่มสถานีบริการรถยนต์ร่วม 153 สถานีออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) สถานีในเมือง ใกล้ระบบขนส่งมวลชน 2) สถานีในเมือง ใช้โดยคนรอบๆ สถานี 3) สถานีให้บริการรถเช่ารายวัน และ 4) สถานีชานเมือง โดยกลุ่มที่ 1, 2, และ 3 สถานีจะอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร เหมาะสำหรับผู้ให้บริการแบบรายวัน และกลุ่มที่ 4 สถานีจะอยู่ชานเมือง เหมาะสำหรับผู้ให้บริการแบบรายชั่วโมง จากผลการศึกษารังนี้ รัฐบาลสามารถนำข้อมูลไปกำหนดนโยบายเพื่อออกแบบจัดตั้งสถานีบริการรถยนต์ร่วมกับเครือข่ายการขนส่งสาธารณะอื่น ๆ ที่มีอยู่ให้ดียิ่งขึ้น และผู้ให้บริการสามารถออกแผนการตลาดให้สอดคล้องกับลูกค้าในแต่ละกลุ่มสถานีได้

คำสำคัญ: การวิเคราะห์กลุ่ม, ระบบรถยนต์ร่วม, สถานีบริการรถยนต์ร่วม

Abstract

Nowadays, people increasingly adopt the use of carsharing services because it is convenient and could potentially reduce the need of private cars. Carsharing service is available in Bangkok since 2016 but there are few studies determining the characteristics of carsharing stations in Bangkok. The objective of this study was to investigate the characteristics of carsharing stations in different areas of Bangkok. Carsharing station attributes, users' profiles and users' behaviors were analyzed using cluster analysis technique. As a result, 153 carsharing stations were categorized into four groups including 1) city stations with mass transit stations, 2) city stations, used by people around the stations, 3) traditional car rental stations, and 4) suburban stations. Carsharing stations in groups 1, 2, and 3 are located in Bangkok and mainly used by daily rent users. In addition, the stations in group 4 are located in the suburban and used by the hourly rent users. The findings in this study can help the government to set up policies to support the integration of carsharing stations with the existing mass transit stations in the city and suburban areas. Also, carsharing operators can roll out promotions tailored for each station group.

Keywords: Cluster analysis, Carsharing, Carsharing station

บทนำ

ปัญหาการจราจรที่คับคั่งในกรุงเทพมหานคร นับเป็นปัญหาที่มีความสำคัญลำดับต้น ๆ และนับวันจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นเป็นลำดับ ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล (จังหวัดปริมณฑล ได้แก่ จังหวัดนครปฐม จังหวัดนนทบุรี จังหวัดปทุมธานี จังหวัดสมุทรปราการ และจังหวัดสมุทรสาคร) มีปัญหาการจราจรติดขัดในหลายพื้นที่ เนื่องจากประชาชนนิยมเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคล ถึงแม้ว่าพฤติกรรมกรรมการเดินทางของคนเมือง โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครประชาชนมีตัวเลือกในการเดินทางที่หลากหลาย เช่น รถสาธารณะ รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน แต่ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา ผู้เดินทางยังคงไม่นิยมใช้ระบบขนส่งสาธารณะ ด้วยสาเหตุที่สำคัญเนื่องมาจาก ความไม่สะดวกในการเดินทาง ความแออัดของผู้โดยสาร รถที่ให้บริการไม่เพียงพอต่อจำนวนผู้ใช้บริการ ขาดช่วงไม่ตรงต่อเวลา และในการใช้รถโดยสารหลายครั้งอาจมีค่าใช้จ่ายรวมกันมากกว่าค่าน้ำมันในการใช้รถยนต์ส่วนตัว (สุรี และคณะ, 2558; ธนพัฒน์ และนิเทศ, 2561; กรมทางหลวง, 2564) และนอกจากนี้เหตุผลหลักที่สำคัญคือ การใช้ระบบขนส่งมวลชนบางครั้งก็ไม่สามารถเข้าถึงได้ในทุกพื้นที่ ทำให้ต้องมีระบบขนส่งสาธารณะประเภทอื่น เช่น รถแท็กซี่ รถเช่า เป็นต้น

วิธีหนึ่งที่จะเพิ่มความสะดวกรบายในการเดินทางและช่วยลดปริมาณรถยนต์ส่วนบุคคลคือ การใช้รถยนต์ร่วมกัน (Carsharing) ระบบรถยนต์ร่วม คือ “การที่มีรถจอดอยู่ในสถานที่ที่มีคนอยู่เยอะ มีความต้องการใช้รถมาก แต่ไม่สามารถมีรถเป็นของตัวเองได้ ไม่ว่าจะด้วยเหตุที่ไม่มีที่จอดรถ หรือปัญหาทางการเงินที่ไม่สามารถซื้อรถได้ก็ตาม แล้วคนเหล่านั้นมาใช้รถคันเดียวกัน เหมือนเป็นเจ้าของรถร่วมกัน หรือก็คือการแชร์รถคันเดียวกัน” ระบบรถยนต์ร่วมมีการใช้เทคโนโลยี เพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกรบายของผู้ใช้บริการ สามารถจองใช้บริการผ่านทางโทรศัพท์ อินเทอร์เน็ต หรือแอปพลิเคชัน และชำระค่าบริการผ่านแอปพลิเคชันซึ่งมีความปลอดภัยและได้มาตรฐาน (Tumlin, 2012) ระบบรถยนต์ร่วมนี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในต่างประเทศ เช่น Zipcar ในประเทศสหรัฐอเมริกา Godrive ในประเทศอังกฤษ Flinkster ในประเทศเยอรมัน Mobility ในประเทศสวีเดน Autolib ในประเทศฝรั่งเศส Cite lib by Ha:mo ในประเทศญี่ปุ่น และ Socar ในประเทศเกาหลี เป็นต้น สำหรับในประเทศไทย มีผู้ให้บริการระบบรถยนต์ร่วมในกรุงเทพมหานคร ยกตัวอย่างเช่น Ha:mo by Toyota, asap Go และ Haupcar ซึ่ง Haupcar เป็นผู้ให้บริการหลักในกรุงเทพมหานครเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 และจากฐานข้อมูลของบริษัท อ้อปคาร์ จำกัด ในปี พ.ศ. 2563 มีสถานีให้บริการรถยนต์ร่วม 249 สถานี และมีรถยนต์ให้บริการมากกว่า 460 คัน ซึ่งถ้าประชากรหันมาใช้ระบบรถยนต์ร่วมจะส่งผลดีให้กับระบบจราจร โดยจะช่วยลดจำนวนรถยนต์บนท้องถนน และยังมีส่วนช่วยลดมลภาวะทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับระบบรถยนต์ร่วมมากขึ้น เช่น ในกรุงเทพมหานครมีการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์จัดกลุ่มพฤติกรรมของผู้ใช้บริการรถยนต์ร่วม โดยใช้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้ใช้มาจัดแบ่งกลุ่มผู้ใช้ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มผู้ใช้บ่อย กลุ่มผู้ใช้แบบรถเช่าทั่วไป และกลุ่มผู้ที่มีอายุน้อย ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปส่งเสริมหรือกำหนดนโยบายเกี่ยวกับการใช้บริการรถยนต์ร่วมในอนาคต (Boonsiripant et al., 2020) นอกจากนี้มีการศึกษาระบบรถยนต์ร่วมในเมืองซูริค ประเทศสวีเดน พบว่า ตำแหน่งของสถานีมีผลต่อการใช้งานของผู้ใช้บริการ จึงเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับตำแหน่งที่เหมาะสมของสถานี โดยนำข้อมูลของผู้ใช้บริการระบบรถยนต์ร่วม กับความสามารถในการให้บริการของสถานีมาประกอบกันเป็นแนวทาง และใช้เป็นวิธีการที่เหมาะสมในการหาหรือจัดตั้งสถานีใหม่ ๆ เพื่อให้มีระบบรถยนต์ร่วมเพิ่มมากขึ้น (Ciari et al., 2016) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์การจัดกลุ่มสถานีบริการรถยนต์ร่วมในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งยังไม่มีข้อมูล และเป็นเรื่องที่น่าสนใจ โดยจะศึกษาข้อมูลแบบวงรอบของสถานีให้บริการรถยนต์ร่วม ข้อมูลผู้ใช้ และพฤติกรรมการใช้รถยนต์ร่วม ซึ่งผลการศึกษานี้ได้จะบ่งบอกถึงกลุ่มสถานีว่ามีลักษณะแบบใด เหมาะกับผู้ใช้บริการกลุ่มใด จะช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้งานและการจัดตั้งสถานีระบบรถยนต์ร่วมในพื้นที่ต่าง ๆ ของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เพื่อเป็นการเสนอแนะ แนะนำ และ

พัฒนาการออกแบบการจัดตั้งสถานี เพื่อให้ครอบคลุมการให้บริการของระบบรถโดยสารร่วมที่เหมาะสม และอาจนำไปใช้ในการส่งเสริมการใช้รถโดยสารร่วม และระบบขนส่งสาธารณะอื่น ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาจราจรต่อไปในอนาคต

ข้อมูลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ประกอบด้วย ข้อมูลสถานีให้บริการรถโดยสารร่วม ข้อมูลผู้ใช้ และพฤติกรรมการใช้รถโดยสารร่วม (ซึ่งได้รับข้อมูลการเดินทางแบบวงรอบของผู้ใช้บริการรถโดยสารร่วมในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระหว่างวันที่ 1 มกราคม ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2563 จากฐานข้อมูลการจองรถของบริษัท อี้อปคาร์ จำกัด ที่ถูกทำให้เป็นข้อมูลนิรนามแล้ว) โดยพิจารณาจากข้อมูลการจองใช้งานรถโดยสารร่วมในแต่ละสถานี ดังนี้ 1) สถานีให้บริการรถโดยสารร่วมต้องมีการใช้บริการตั้งแต่ 1 ครั้งขึ้นไป 2) สถานีให้บริการรถโดยสารร่วมต้องเปิดให้บริการมากกว่า 6 เดือน 3) ข้อมูลการจองใช้บริการต้องใช้เวลามากกว่าครึ่งชั่วโมง และมีระยะทางมากกว่า 0 กิโลเมตร และ 4) ข้อมูลการจองใช้บริการต้องมีค่าบริการมากกว่า 0 บาท จึงจะนำข้อมูลมาพิจารณาเป็นผลลัพธ์ โดยข้อมูลการจองที่ผ่านการพิจารณานี้มีทั้งหมด 7,403 ข้อมูล โดยมีผู้ใช้ 2,543 คน จำนวน 153 สถานี ยกตัวอย่างตัวแปรที่ศึกษาดัง Table 1

Table 1 Example of carsharing stations attribute

Attribute	Description	Minimum	Maximum	Average(\pm SD)
Percent male	Percent of male users at the station	0	100	71
Percent hourly reservation	Percent of hourly reservation to the total reservations at the station	0	100	37(\pm 21)
Hourly trip duration/reservation	Average duration (hours) of hourly reservations at the station	0	6.8	3.2(\pm 1.2)
Daily trip duration/reservation	Average duration (hours) of daily reservations at the station	0	83.3	32.0(\pm 10.8)
Number of mass transit accesses	Number of transit stations nearby the carsharing stations	0	5	1.5(\pm 1.1)

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับสถานีมาวิเคราะห์ดังแสดงใน Fig. 1 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ดังนี้

- ข้อมูลสถานีให้บริการรถโดยสารร่วม ได้แก่ วิธีการเข้าถึงสถานี พิจารณาว่าสถานีให้บริการรถโดยสารร่วมอยู่ใกล้กับการขนส่งสาธารณะใดบ้าง ประกอบด้วย รถไฟฟ้าบีทีเอส (BTS) รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRT) รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ (ARL) รถไฟ (SRT) ที่หยุดรถประจำทาง (Bus stop) ท่าเรือ (Port) สนามบิน (Airport) และไม่มี (None) โดยพิจารณาในระยะทาง 500 เมตรจากสถานีให้บริการรถโดยสารร่วม (Kumar and Bierlaire, 2012) ระยะห่างของสถานีให้บริการรถโดยสารร่วมจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิซึ่งเป็นศูนย์กลางของกรุงเทพมหานคร ความหลากหลายของผู้ใช้บริการในสถานีนั้น ๆ ต่อข้อมูลการจองทั้งหมด 100 ครั้ง และข้อมูลการจองต่อเดือน นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์และแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- ข้อมูลผู้ใช้ ได้แก่ อายุ และเพศ นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์และแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- พฤติกรรมการใช้รถโดยสารร่วม ได้แก่ ประเภทการใช้บริการรถโดยสารร่วม ระยะเวลาการจองใช้รถต่อการจอง ระยะทางในการขับที่ต่อการจอง และค่าใช้จ่ายต่อการจอง (โดยจะแบ่งเป็นข้อมูลรายชั่วโมง คือ ใช้บริการรถโดยสารร่วมตั้งแต่

ครึ่งชั่วโมงและไม่เกิน 8 ชั่วโมง และข้อมูลรายวัน คือ ใช้บริการรถยนต์ร่วมตั้งแต่ 8 ชั่วโมงขึ้นไป) นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์และแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

และนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาทำการปรับสัดส่วน (Normalize) (Equation 1) ด้วยโปรแกรม RStudio ดังแสดงใน Fig. 1 เพื่อให้ได้น้ำหนักของตัวแปรที่ใกล้เคียงกัน

$$\text{Normalized data} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

โดย X หมายถึง ตัวแปรที่วิเคราะห์ X_{\max} หมายถึง ค่ามากที่สุดของตัวแปรที่วิเคราะห์ และ X_{\min} หมายถึง ค่าน้อยที่สุดของตัวแปรที่วิเคราะห์

จากนั้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์การจัดกลุ่ม K -means โดยที่จำนวนสถานีให้บริการรถยนต์ร่วมจำนวน 153 สถานี จะถูกแบ่งออกเป็น K กลุ่ม โดยจะต้องพิจารณาค่า Within-Group Sum of Squares (WGSS) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยสมการ (Equation 2):

$$WGSS = \sum_{j=1}^q \sum_{l=1}^k \sum_{i \in G_l} (x_{ij} - \bar{x}_j^{(l)})^2 \quad (2)$$

โดยที่ $\bar{x}_j^{(l)} = \frac{1}{n} \sum_{i \in G_l} x_{ij}$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลรายสถานีในกลุ่ม ซึ่งแบ่งออกเป็น G_l จากจำนวนตัวแปร j ชุด (ดัดแปลงจาก Everitt and Hothorn, 2011)

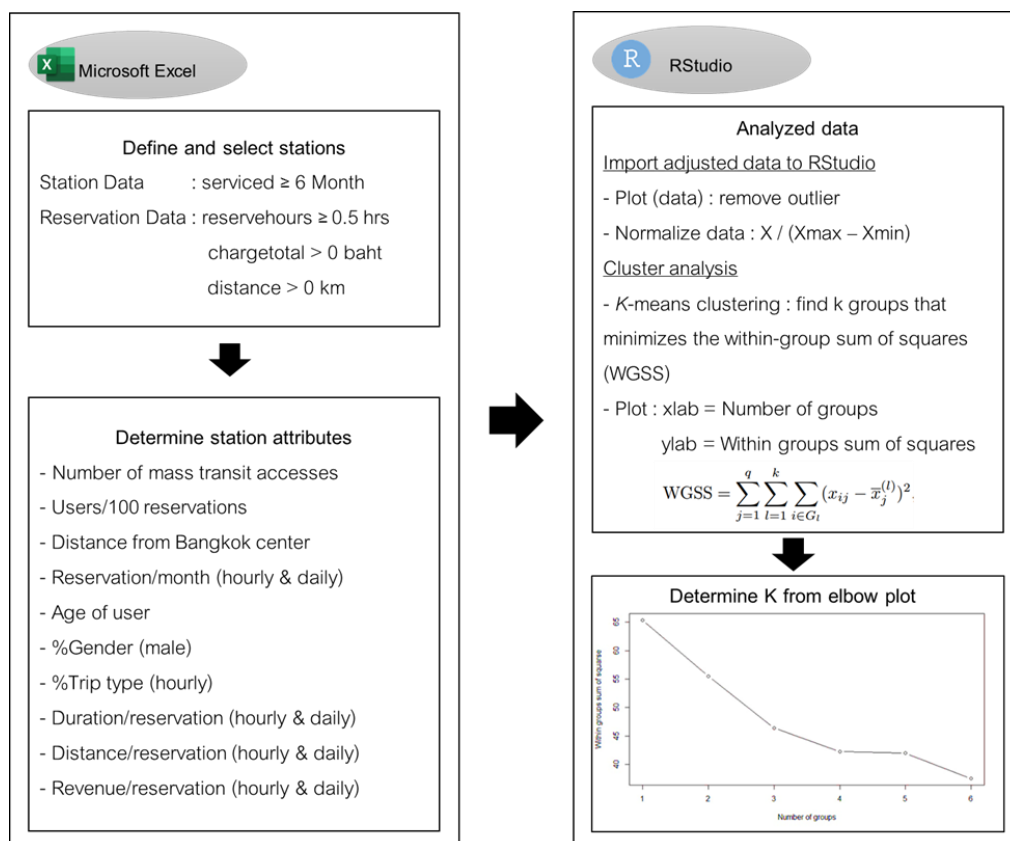


Fig. 1 Research Framework

ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์สถานีให้บริการรถยนต์ร่วมจำนวน 153 สถานีในกรุงเทพมหานคร พบว่า สถานีให้บริการรถยนต์ร่วมส่วนใหญ่มีจำนวนการเข้าถึงระบบขนส่งมวลชน 1 และ 2 จุด ร้อยละ 39 และ 32 ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 2A และเมื่อพิจารณาถึงระยะห่างของสถานีให้บริการรถยนต์ร่วมจากใจกลางกรุงเทพมหานคร พบว่า มีค่าเฉลี่ย 12 กิโลเมตร โดยระยะห่างจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิมากขึ้นจะมีจำนวนสถานีให้บริการรถยนต์ร่วมน้อยลง โดยช่วงระยะห่าง 0-5, 6-10, และ 11-15 กิโลเมตร จะมี 38, 39, และ 37 สถานี ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 2B

สำหรับความหลากหลายของผู้ใช้บริการ พบว่า มีค่าเฉลี่ย 67 คน โดยที่การจองจำนวน 100 ครั้ง จะมีความหลากหลายของผู้จอง 41-60, 61-80, และ 81-100 คน จำนวน 53, 42, และ 44 สถานี ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 2C

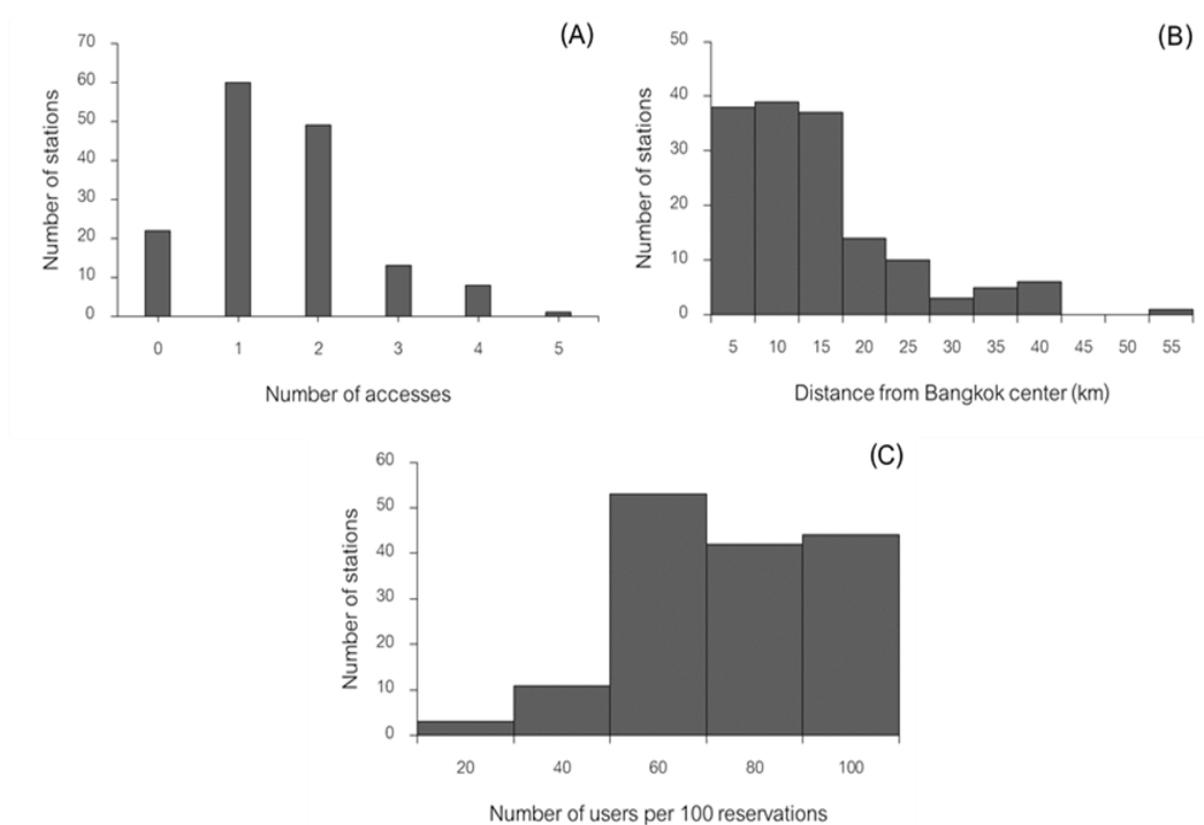


Fig. 2 Distribution of stations with various attributes. Number of stations for number of accesses; (A) distance from Bangkok center; (B) and number of users per 100 reservations; (C)

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างกราฟ WGSS สำหรับจำนวนกลุ่ม (K) ตั้งแต่ 1 ถึง 6 กลุ่ม พบว่าควรแบ่งกลุ่มสถานีออกเป็น 4 กลุ่ม เนื่องจากค่า WGSS มีค่าลดลงน้อยสุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงใช้ K-means เพื่อจัดกลุ่มสถานีออกเป็น 4 กลุ่ม ซึ่งผลลัพธ์ต่าง ๆ จะแสดงใน Table 2 ซึ่ง 4 กลุ่มสามารถอธิบายได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 สถานีในเมือง ใกล้ระบบขนส่งมวลชน

กลุ่มนี้จะเป็นกลุ่มที่มีจำนวนสถานีมากที่สุด 66 สถานี คิดเป็น 43% ของจำนวนสถานีทั้งหมด สถานีส่วนใหญ่จะอยู่ในเมือง มีระยะห่างของสถานีจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิเฉลี่ย 8 กิโลเมตร และอยู่ตามแนวรถไฟฟ้า หรือระบบขนส่ง

สาธารณชนอื่น ๆ (มีการเชื่อมต่อกับระบบขนส่งมวลชนมากที่สุด เฉลี่ย 2.2 การเชื่อมต่อต่อสถานี) มีคนจำนวนมากเดินทางมาใช้บริการรถโดยสารร่วม ทำให้มีผู้ใช้งานต่อ 100 การจอดถึง 77 บัญชี ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่ 2 ที่เป็นสถานีในเมืองเหมือนกัน แต่มีจำนวนทางเลือกในการเข้าถึงโดยระบบขนส่งสาธารณะน้อยกว่า กลุ่มสถานีในเมือง ใกล้ระบบขนส่งมวลชนมีระยะทางในการขับที่ต่อการจอดรายชั่วโมงสูงสุด โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 62 กิโลเมตรต่อการจอด ตัวอย่างสถานีที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 ได้แก่ สถานีบีทีเอสหมอชิต-มิกซ์จตุจักร สถานีบีทีเอสพร้อมพงษ์-เอสไอเทค สุขุมวิท 31 สถานีบีทีเอสอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ และสถานีบีทีเอสราชเทวี ทางออก 2 ฮอลลิวูด สตรีท เป็นต้น

กลุ่มที่ 2 สถานีในเมือง ใช้โดยคนรอบๆ สถานี

กลุ่มนี้จะเป็นกลุ่มที่มีจำนวนสถานีมากเป็นอันดับสองรองจากกลุ่มที่ 1 คือ 61 สถานี คิดเป็น 40% ของจำนวนสถานีทั้งหมด มีระยะห่างของสถานีจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิเฉลี่ย 14 กิโลเมตร โดยสถานีส่วนใหญ่อยู่ในเมืองเช่นเดียวกับกลุ่มแรก แต่มีจำนวนทางเลือกในการเข้าถึงด้วยระบบขนส่งมวลชนน้อยกว่า ซึ่งคนส่วนใหญ่ที่มาใช้จะเป็นคนที่อยู่รอบ ๆ สถานี ทำให้มีจำนวนผู้ใช้งานต่อ 100 การจอดต่ำกว่ากลุ่มที่ 1 นอกจากนี้การจอดแบบรายชั่วโมง และรายวันมีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างสถานีที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 ได้แก่ สถานีแอมพาร์ค สถานีเมเจอร์ ซินีเพล็กซ์ ปิ่นเกล้า สถานีบีทีเอสเอพีที่บีแบริ่งพาร์คกิง และสถานีบีทีเอสไอทีไอโมบี สุขุมวิท เป็นต้น

กลุ่มที่ 3 สถานีให้บริการรถเช่ารายวัน

กลุ่มนี้จะเป็นกลุ่มที่มีจำนวนสถานี 14 สถานี คิดเป็น 9% ของจำนวนสถานีทั้งหมด มีระยะห่างของสถานีจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิเฉลี่ย 12 กิโลเมตร สถานีในกลุ่มนี้อยู่ในเมืองเช่นกัน แต่มีการเชื่อมต่อกับระบบขนส่งมวลชนน้อยที่สุด เฉลี่ย 0.9 การเชื่อมต่อต่อสถานี ซึ่งผู้ที่มาใช้บริการรถโดยสารร่วมเกือบทั้งหมด (ร้อยละ 96) ใช้บริการในรูปแบบรายวัน และมีระยะทางขับที่สูงที่สุดในทั้ง 4 กลุ่ม จึงส่งผลให้มีรายได้ต่อการจอดสูงสุดที่สุดตามไปด้วย นอกจากนี้จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าผู้ใช้งานส่วนใหญ่เป็นผู้ชาย (ร้อยละ 85) เนื่องจากสถานีในกลุ่มนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับสาขาของบริษัทรถเช่า จึงมีจำนวนผู้มาใช้งานค่อนข้างมาก (91 คนต่อการจอด 100 คัน) และมักจะไม่ใช้งานซ้ำ (0 ครั้งต่อเดือน) ในช่วงที่ทำการศึกษ ตัวอย่างสถานีที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ 3 ได้แก่ สถานีห้างอมรินทร์รวมอินทรา สถานีบีทีเอสแกรนด์ สุขุมวิท โฮเต็ล สถานีไอทีไอ ไอทู บางนา ตึกบี และสถานีป.ธนาทาวเวอร์ ลาดพร้าว 60 เป็นต้น

กลุ่มที่ 4 สถานีชานเมือง

กลุ่มนี้จะเป็นกลุ่มที่มีจำนวนสถานีน้อยที่สุด 12 สถานี คิดเป็น 8% ของจำนวนสถานีทั้งหมด มีระยะห่างของสถานีจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิเฉลี่ย 24 กิโลเมตร ซึ่งเป็นกลุ่มที่สถานีตั้งอยู่ห่างจากใจกลางกรุงเทพมหานครมากที่สุด มีอายุเฉลี่ยของผู้ใช้ค่อนข้างน้อย (26 ปี) เมื่อเทียบกับสถานีในกลุ่มอื่น ๆ เนื่องจากสถานีในกลุ่มนี้ มักจะเป็นสถานีที่ตั้งอยู่ใกล้กับมหาวิทยาลัยชานเมือง เช่น สถานีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต หอพักยูเอชเอส สถานีมหาวิทยาลัยศิลปากร โรงแรมสมอลวิลด์ และสถานีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต อาคารอริการบตี เป็นต้น มีจำนวนผู้ใช้งานต่อ 100 การจอดต่ำที่สุดใน 4 กลุ่ม หมายความว่า ผู้ใช้งานที่สถานีกลุ่มที่ 4 นี้ มักจะเป็นผู้ใช้งานประจำของสถานีนั้น ๆ สัดส่วนการจอดเป็นรายชั่วโมงสูงถึงร้อยละ 60 ซึ่งสูงที่สุดใน 4 กลุ่ม เนื่องจากการใช้รถโดยสารร่วมในพื้นที่ชานเมือง อาจจะมีความสะดวกมากกว่าการใช้ระบบขนส่งสาธารณะประเภทอื่น ๆ เช่น แท็กซี่ เป็นต้น

ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้ง 4 กลุ่ม จะแสดงให้เห็นว่า การใช้บริการระบบรถโดยสารร่วม ส่วนใหญ่ผู้ใช้บริการจะเป็นเพศชาย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Boonsiripant et al. (2020) ที่ทำการศึกษากาการวิเคราะห์การจัดกลุ่มพฤติกรรมของ

ผู้ใช้บริการรถยนต์ร่วมในกรุงเทพมหานคร โดยใช้ข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2018–2019 ซึ่งผลการศึกษาค้นพบว่า ผู้ใช้บริการมีอายุเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน และพฤติกรรมการใช้บริการจะเป็นแบบรายวัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ที่พบว่า มีประเภทการใช้บริการเป็นแบบรายวัน ซึ่งพฤติกรรมของผู้ใช้บริการไม่เปลี่ยนแปลงไปจากปี ค.ศ. 2018–2019 อาจเนื่องมาจากการจัดตั้งสถานี โดยการใช้งานจะสอดคล้องกับตำแหน่งของสถานี เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการจัดตั้งสถานี จึงส่งผลให้พฤติกรรมของผู้ใช้บริการไม่แตกต่างกัน

Table 2 Cluster analysis for four groups of carsharing stations.

Cluster		All	1	2	3	4
Number of stations		153	66	61	14	12
%of total sample		100%	43%	40%	9%	8%
- User's profiles						
Age (yrs)		30.5 (6.1)	30.8 (4.6)	30.6 (6.3)	32.6 (11.0)	26.2 (3.5)
Male (%)		71%	72%	67%	85%	72%
- User's behaviors						
Trip type	hourly rent	37% (21%)	33% (17%)	45% (16%)	4% (11%)	60% (15%)
	daily rent	32.0 (10.8)	33.3 (11.1)	30.7 (10.1)	33.0 (13.3)	30.4 (9.8)
Duration/reservation (hrs/reservation)	hourly rent	3.2 (1.2)	3.8 (0.9)	3.1 (0.7)	0.2 (0.6)	3.1 (0.5)
	daily rent	268.6 (97.8)	278.4 (90.8)	242.7 (70.4)	354.5 (174.9)	245.8 (78.5)
Distance/reservation (km/reservation)	hourly rent	51.0 (26.9)	62.4 (27.7)	49.7 (16.8)	5.7 (14.7)	47.6 (15.0)
	daily rent	629.78 (262.13)	777.67 (195.26)	614.54 (147.32)	55.37 (149.94)	564.05 (148.66)
Revenue/reservation (baht/reservation)	hourly rent	2,214.44 (717.87)	2,377.78 (768.49)	2,009.05 (492.13)	2,527.67 (1148.28)	1,994.68 (424.73)
	daily rent					
-Station characteristic						
Unique user	users/100 reservations	66.6 (22.2)	76.9 (16.8)	54.8 (14.8)	90.7 (24.3)	41.7 (21.2)
	distance	12.1 (9.5)	8.0 (5.3)	14.3 (8.7)	12.2 (6.8)	23.7 (18.2)
Number of mass transit accesses	accesses	1.5 (1.1)	2.2 (1.0)	1.0 (0.7)	0.9 (0.9)	1.4 (1.4)
Number of reservations/month	hourly rent	1.8 (2.2)	1.0 (1.0)	1.9 (1.3)	0.0 (0.1)	7.9 (2.2)
	daily rent	2.4 (2.2)	2.3 (1.9)	2.4 (1.5)	0.5 (0.5)	5.9 (4.0)

Note: Mean value with the Standard Deviation (SD) in parenthesis

และจากการวิเคราะห์การจัดกลุ่มทำให้เห็นว่า ผู้ใช้บริการระบบรถยนต์ร่วม จะใช้บริการสถานีในเมือง ใกล้ระบบขนส่งมวลชน (กลุ่มที่ 1) มีการจองใช้บริการเป็นแบบรายวันมากกว่ารายชั่วโมง อาจเนื่องมาจากในเมืองเป็นบริเวณที่มีระบบการขนส่งที่หลากหลาย ผู้ใช้บริการมีทางเลือกในการเดินทางมาก ทำให้การเดินทางระยะสั้น ซึ่งเป็นจุดเด่นของระบบรถยนต์ร่วมอาจไม่ตอบโจทย์สำหรับพื้นที่ในเมือง ผู้ใช้บริการจึงนิยมจองใช้บริการแบบรายวันมากกว่า เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีตำแหน่งของสถานีในเขตกรุงเทพมหานคร ผู้ใช้บริการจะเลือกใช้บริการแบบรายวันมากกว่าเช่นกัน และในทางกลับกัน กลุ่มที่ 4 สถานีชานเมืองจะมีการจองใช้บริการแบบรายชั่วโมงมากกว่ารายวัน เนื่องจากการเดินทางในเขตพื้นที่บริเวณชานเมืองมีทางเลือกในการเดินทางน้อยกว่า ระบบรถยนต์ร่วมซึ่งเป็นการเดินทางระยะสั้น จึงตอบโจทย์ต่อความต้องการของผู้ใช้มากกว่า และในอนาคตอาจจะมีการนำระบบรถยนต์ร่วมร่วมกับการขนส่งประเภทต่าง ๆ (Mobility as a Service; MaaS) เพื่อให้การเดินทางของผู้ใช้บริการเป็นไปอย่างราบรื่น และรวดเร็วมากยิ่งขึ้น (Jittrapirom et al., 2017)

สรุป

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของสถานีให้บริการรถยนต์ร่วม ข้อมูลผู้ใช้ และพฤติกรรมการใช้รถยนต์ร่วม สามารถสรุปประเภทของสถานีให้บริการรถยนต์ร่วมออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) สถานีในเมือง ใกล้ระบบขนส่งมวลชน 2) สถานีในเมือง ใช้โดยคนรอบ ๆ สถานี 3) สถานีให้บริการรถเช่ารายวัน และ 4) สถานีชานเมือง โดยกลุ่มที่ 1, 2, และ 3 สถานีจะอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร เหมาะสำหรับผู้ใช้บริการแบบรายวัน และอยู่ในวัยทำงาน ซึ่งแต่ละกลุ่มสถานีจะมีความแตกต่างกันคือ จำนวนการเข้าถึงระบบขนส่งมวลชน โดยกลุ่มที่ 1 สามารถเข้าถึงระบบขนส่งมวลชนได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ กลุ่มที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และกลุ่มที่ 4 สถานีจะอยู่บริเวณชานเมือง เหมาะสำหรับผู้ใช้บริการแบบรายชั่วโมง และส่วนใหญ่อยู่ในวัยเรียน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการจัดตั้งสถานีบริการรถยนต์ร่วมในอนาคตได้ โดยรัฐบาลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับขนส่งมวลชนสามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อออกแบบระบบขนส่งมวลชนของรัฐให้สอดคล้องกับตำแหน่งของสถานีบริการรถยนต์ร่วมของบริษัทเอกชนต่าง ๆ เพื่อสนับสนุน และเป็นตัวเลือกในการเดินทางของประชาชน แทนการใช้รถยนต์ส่วนตัว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท อีโปกคาร์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล และอนุญาตให้ใช้ข้อมูลเพื่อทำการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง. 2564. โครงการแก้ไขปัญหาการจราจรในพื้นที่ กทม. ปริมณฑล และเมืองหลัก.

http://planning.doh.go.th/project/sub_project_3,19 พฤศจิกายน 2564.

ธนพัฒน์ เกิดผล, นิเทศ ตินณะกุล. 2561. ทิศนคติของประชาชนที่มีต่อปัญหาการจราจรในจังหวัดปทุมธานีและปริมณฑล. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยปทุมธานี 10: 229–236.

สุรี คงกระพันธ์, กวินณา คงสระ, นทีพันธ์ ธรรมศิลป์บุญดี, นงนุช พุดขาว. 2558. “รถสาธารณะ” ทางเลือกของผู้ใช้บริการตอบโจทย์ความต้องการแล้วหรือยัง?. <http://www.theprototype.pim.ac.th/2015/11/27/the-public-transport-system>, 11 ธันวาคม 2562.

Boonsiripant, S., Jittrapirom, P., Poonnasee, W. 2020. Cluster analysis of carsharing users' behavior in Bangkok, a highly motorized and developing city. In: 2020 Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS), Delft, Netherlands, pp. 258–263.

- Ciari, F., Weis, C., Balac, M., 2016. Evaluating the influence of carsharing stations' location on potential membership: a Swiss case study. *EURO J. Transp Logist.* 5: 345–369.
- Everitt, B., Hothorn, T. 2011. *An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R*, Springer, New York, USA.
- Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A.M., Ebrahimigharehbaghi, S., Alonso-Ganzalez, M.J., Narayan, J. 2017. Mobility as a service: A critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges. *Urban Planning 2*: 13–25.
- Kumar, V.P., Bierlaire, M. 2012. *Optimizing Location for a Vehicle Sharing System*.
- Tumlin, J. 2012. *Sustainable Transportation Planning*. John Wiley & Sons, Inc, Canada.

การประเมินความเสี่ยงในงานก่อสร้างโดยประยุกต์เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ: กรณีศึกษา งานก่อสร้างอาคารสูง

Risk Assessment of Construction Work by UAV: A Case Study of High-Rise Building Construction

วรพัชร จอมที่รักษ์^{a,*}, อนูเฝ้า ออบแพทย^b

Warapatchara Jomtiruk^{a,*}, Anuphao Aobpaet^b

^a สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^b ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^a Department of Safety 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: warapatchara.j@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานหลังจากการนำอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มาใช้ในการสำรวจด้านความปลอดภัย โดยวิธีการเปรียบเทียบระดับคะแนนทัศนคติด้านความเสี่ยงในการทำงาน พบว่าจากเดิมคะแนนทัศนคติด้านความเสี่ยงอยู่ในระดับสูง ถึงสูงมาก ลดลงเป็นระดับปานกลาง ถึงสูง และเปรียบเทียบระยะเวลาสูงสุดในการสำรวจความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย กับ UAV พบว่า ระยะเวลาในการสำรวจลดลงโดยแบ่งออกเป็น 3 อาคารดังนี้ อาคารที่ 1 จาก 30 นาที เหลือ 14 นาที อาคารที่ 2 จาก 26 นาที เหลือ 11 นาที และอาคารที่ 3 จาก 26 นาที เหลือ 12 นาที นอกจากนี้ได้ให้วิศวกร 26 คน และคนงาน 67 คน ตอบแบบสอบถามทัศนคติด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับการทำงานร่วมกับ UAV โดยวิเคราะห์ข้อมูลสถิติ ค่าที่ใช้คือ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้ก่อนการใช้ UAV มีค่าทัศนคติอยู่ที่ 3.38 อยู่ในระดับปานกลาง และหลังจากการใช้ UAV มีค่าทัศนคติอยู่ที่ 4.09 อยู่ในระดับดี จะเห็นได้ว่าหลังจากการใช้ UAV ในการตรวจสอบความปลอดภัย มีค่าทัศนคติที่ดีขึ้น

คำสำคัญ: การประเมินความเสี่ยง, งานก่อสร้างอาคารสูง, อากาศยานไร้คนขับ

Abstract

The purpose of this research was to compare working performance after using UAV in the site safety surveying; the risk assessment level reduced from medium to high-risk level. Also, Comparing the duration of the safety survey of safety officer with UAV in 3 buildings found that the maximum duration reduced in Building No.1 from 30 min. to 14 min., No.2, 26 min. to 11 min. and No.3, 26 min. to 12 min. In this research, we asked 26 engineers and 67 workers to complete a safety attitude questionnaire about working with UAV by analyzing the statistical data. The statistics used were percentage, mean, and standard deviation. The research results can be summarized that before using the UAV, the visual attitude value of 3.38 was at a moderate level. Furthermore, after using the UAV, the attitude value was 4.09 at a good level. In conclusion, engineers and workers have a better attitude toward safety concerns by using UAV in construction site surveying.

Keywords: High-Rise Building, Risk Assessment, UAV

คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมด้านงานก่อสร้างในประเทศไทยได้มีการพัฒนา โดยมีการนำเครื่องจักรกลและเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้อย่างมากมาย เพื่อให้งานก่อสร้างสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งในอุตสาหกรรมงานก่อสร้างเป็นงานที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายและอุบัติเหตุ จากข้อมูลการประสพอุบัติเหตุเนื่องจากการทำงานของลูกจ้างของกองทุนเงินทดแทน (สำนักงานประกันสังคม, 2561) จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มสถิติของการบาดเจ็บ พิการ การตาย โรคเนื่องจากการทำงาน และอัตราการประสพอุบัติเหตุของลูกจ้างเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะกิจการด้านงานก่อสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับกิจการด้านอื่นๆ และในทุกขั้นตอนของการทำงานก่อสร้าง ยังสามารถเกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ทุกเมื่อ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไขโดยเร่งด่วน ในขณะเดียวกันการเกิดอุบัติเหตุทำให้เกิดความสูญเสียมากมาย จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความสูญเสียทางตรง เช่นการเสียชีวิต การบาดเจ็บ ค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาล เป็นต้น และความสูญเสียทางอ้อม เช่น ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสิ่งของที่ได้รับความเสียหาย ค่าสูญเสียโอกาส ค่าใช้จ่ายในการฝึกหัดพนักงานใหม่ รวมถึงชื่อเสียงของหน่วยงาน เป็นต้น (สิมะโชคดี, 2546; หวังนิเวศน์กุล, 2561) ถึงแม้ว่าจะมีกฎหมายว่าด้วยความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้างให้ผู้รับผิดชอบต่อการดำเนินการก่อสร้างต้องปฏิบัติตาม แต่ก็ยังมีการเพิกเฉยและละเลยในเรื่องอุบัติเหตุอยู่อย่างมาก การป้องกันอุบัติเหตุจึงมีความจำเป็นที่ผู้รับเหมา และเจ้าของกิจการ รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องมีการวางแผนป้องกันอันตรายต่างๆ ที่เหมาะสม เพราะนอกจากจะเป็นการป้องกันอุบัติเหตุ และความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นแล้ว ยังทำให้สามารถลดค่าใช้จ่าย รวมทั้งทำให้บุคลากรในหน่วยงานมีขวัญและกำลังใจสูงขึ้น ย่อมส่งผลให้มีโอกาสทำกำไรได้เพิ่มขึ้นด้วย

จากปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้นำมาศึกษาเพื่อหาแนวทางในการป้องกันปัญหาด้านอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง จึงได้นำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ หรือ โดรน (กิตติศักดิ์, 2558) เข้ามาประยุกต์ใช้กับงานด้านความปลอดภัย ในการช่วยเหลือเฝ้าระวัง และตรวจสอบในพื้นที่การก่อสร้าง โดยจะใช้ความสามารถในการแสดงภาพแบบเรียลไทม์ การเข้าถึงพื้นที่ที่ยากลำบาก การบันทึกภาพและพิกัดของพื้นที่ และการประหยัดเวลาในการใช้งาน (สำนักงานเจ้าท่าภูมิภาคที่ 1, 2554) จากทฤษฎีโดมิโน โดยการกำจัดผลกระทบที่ไม่ปลอดภัย หรือ สภาพการณ์ที่ไม่ปลอดภัย เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายและการบาดเจ็บตามมา (Heinrich, 1931) โดยใช้อากาศยานไร้คนขับบินสำรวจเพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความเสียหายในการเกิดอุบัติเหตุ อีกทั้งยังสามารถระบุอันตรายในพื้นที่ก่อสร้างได้ โดยที่ผู้ปฏิบัติงานไม่ตกอยู่ในความเสี่ยงอันตรายโดยเน้นไปในงานที่มีความเสี่ยง มีโอกาสที่จะทำให้เกิดอันตรายและความรุนแรงสูงสุด เพื่อจะนำไปสู่การหาแนวทางในการเตรียมความพร้อมเรื่องความปลอดภัยในการทำงาน (Howard, 2017) ของคนงานก่อสร้างสำหรับโครงการก่อสร้างในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินทัศนคติด้านความเสี่ยงและลดความเสี่ยงในการทำงานของงานที่มีความเสี่ยงสูงในงานก่อสร้าง โดยการใช้อากาศยานไร้คนขับเข้ามาช่วยสำรวจด้านความปลอดภัย
2. เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการสำรวจความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในโครงการก่อสร้าง และระยะเวลาในการใช้อากาศยานไร้คนขับ
3. เพื่อให้พนักงานและคนงานก่อสร้างมีทัศนคติด้านความปลอดภัยที่ดีต่อการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับในการทำงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

รูปแบบการดำเนินการประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้



Fig. 1 Research methodology

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุ ประเภท ความรุนแรง สถิติการเกิดอุบัติเหตุ และแนวโน้มการเกิดอุบัติเหตุ เพื่อค้นหาจุดเสี่ยง และวิธีการควบคุม

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินทัศนคติด้านความเสี่ยงการทำงาน โดยแบ่งเป็น 4 งาน ที่มีความเสี่ยงมากที่สุด ในการทำวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคและวิธีในการวิเคราะห์อันตราย โดยใช้วิธี Jobs Safety Analysis (JSA) ในการชี้บ่งอันตรายจากการทำงาน โดยการค้นหาอันตราย และความเสี่ยงที่ซ่อนอยู่ในขั้นตอนแต่ละขั้นตอนของการทำงาน (ระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544) เพื่อนำคะแนนด้านความเสี่ยงมาใช้เปรียบเทียบกับก่อน-หลัง การประยุกต์ใช้งานอากาศยานไร้คนขับ

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบการสำรวจความปลอดภัยโดยการใช้อากาศยานไร้คนขับ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้นจึงได้ทดสอบโดยการบินในพื้นที่จริงก่อน และเก็บข้อมูลเบื้องต้นของลักษณะการบินในพื้นที่ โดยจะประสานงานกับหน่วยงาน เพื่อไม่ให้กีดขวางการทำงานของคนงาน และเครื่องจักร

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาระยะเวลาและพื้นที่ในการเดินสำรวจความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย (จป.) แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับการใช้งานอากาศยานไร้คนขับ

ขั้นตอนที่ 5 จัดทำแบบสอบถามทัศนคติด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับการทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับ จากจำนวนทั้งหมด 93 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ แบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลส่วนบุคคล และแบบสอบถามเกี่ยวกับความปลอดภัยในการทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับ จากวิศวกรผู้ควบคุมงาน เจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในการทำงาน และคนงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้อากาศยานไร้คนขับ DJI รุ่น Mavic Air ซึ่งมีคุณสมบัติและส่วนประกอบต่าง ๆ ดัง Fig. 2 ซึ่งเป็นอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุน เป็นอากาศยานที่ขึ้นลงในแนวตั้ง อาศัยการหมุน ของใบพัดในการขึ้นลง และขับเคลื่อนไปในทิศทางต่างๆ (กรมที่ดิน, 2560) รุ่นที่ให้การดำเนินงานมีน้ำหนักเบา และมีขนาดเล็กสามารถใช้งานได้เหมาะสมกับหน้างานก่อสร้าง มีระยะเวลาต่อการใช้งานโดยประมาณ 15 นาที/แบตเตอรี่ 1 ก้อน โดยในการทำวิจัยนี้ได้จัดเตรียมไว้อย่างน้อย 3 ก้อน เพื่อสามารถบินได้อย่างต่อเนื่อง และมีสถานีควบคุมภาคพื้นหรือคอนโทรลเลอร์ใช้งานโดยต่อกับอุปกรณ์สมาร์ทโฟนโดยสามารถบันทึกวิดีโอหน้าจอบนจอเป็นภาพขณะทำการบิน



Fig. 2 Unmanned Aerial Vehicle (DJI: Mavic Air Series) and Remote Controller (DJI: Mavic Air Series)

Table 1 Functions of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Functions	Mavic Air
Size.	168cm × 83cm × 49cm
Takeoff Weight.	430 g
Max Flight Time.	21 min.
Speed. (Maximum)	16 m/s
Video Quality.	FHD: 1920x1080p 24/25/30/48/50/60 HD: 1280x720p 24/25/30/48/50/60
Sensor.	3 side
Sensing System.	Forward, Backward, Downward
Video Transmission.	2,000 m.
Video Resolution.	HD 720P @ 30fps

จาก Table 1 จะเห็นได้ว่า อากาศยานไร้คนขับที่นำมาใช้คือ DJI รุ่น Mavic Air โดยมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถพกพาได้สะดวก มีระยะเวลาในการใช้งานอยู่ที่ 21 นาที โดยประมาณ มีความเร็วอยู่ที่ 16 เมตร/วินาที มีความคมชัดของภาพวิดีโออยู่ที่ HD: 128 × 720p มีระบบกันสั่น 3 แกน มีเซ็นเซอร์กันชน 3 ด้าน (ด้านหน้า, ด้านหลัง, ด้านล่าง) และมีระยะควบคุมสูงสุดถึง 2,000 เมตร ซึ่งสามารถบินได้ครอบคลุมพื้นที่ก่อสร้าง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี (Tamiya, 2559)

ผลการวิจัย

จากการทดลองได้ใช้อากาศยานไร้คนขับในการสำรวจความปลอดภัยในการทำงาน โดยจะเอาระยะเวลาสูงสุดของการเดินสำรวจความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยใน 1 รอบการเดินสำรวจ มาเปรียบเทียบกับระยะเวลาสูงสุดในการใช้อากาศยานไร้คนขับสำรวจในพื้นที่โครงการ มีอาคารจำนวน 3 หลัง ตาม Fig. 3

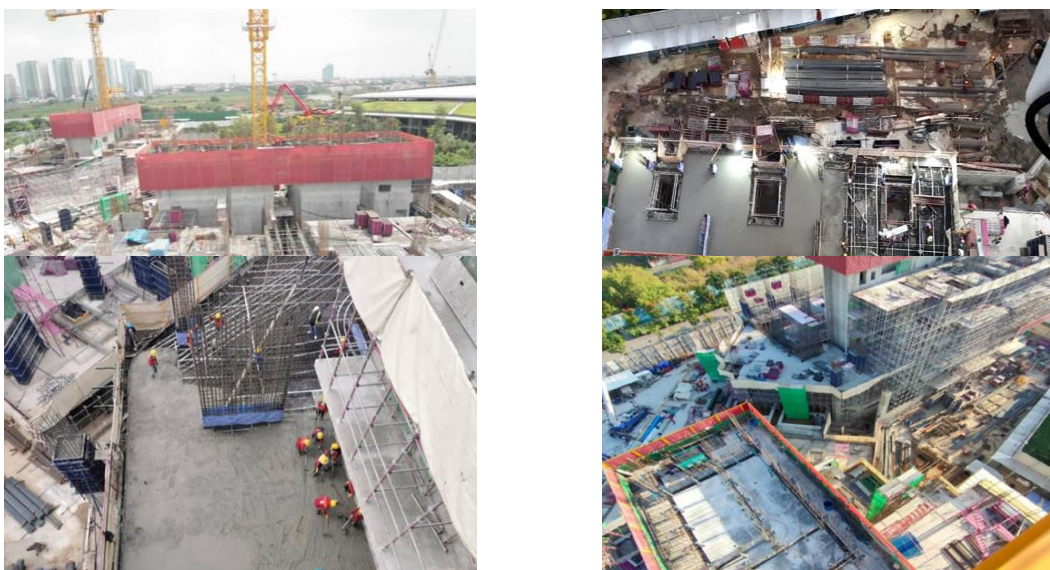


Fig. 3 Safety survey by UAV (Building No.1, 2, 3)

ตาม Fig. 4 จะพบว่าใน 1 รอบการเดินตรวจสอบของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยแต่ละพื้นที่จะมีระยะเวลาในการตรวจสอบของอาคารที่ 1 สูงสุดอยู่ที่ 30 นาที พื้นที่ตรวจสอบความปลอดภัยจำนวน 3 ชั้น ระยะเวลาของอาคารที่ 2 สูงสุดอยู่ที่ 26 นาที พื้นที่ตรวจสอบความปลอดภัยจำนวน 2 ชั้น และระยะเวลาของอาคารที่ 3 สูงสุดอยู่ที่ 26 นาที พื้นที่ตรวจสอบความปลอดภัยจำนวน 2 ชั้น และหลังจากการใช้งานอากาศยานไร้คนขับจะมีระยะเวลาตรวจสอบสูงสุดของอาคารที่ 1 ลดลงอยู่ที่ 14 นาที พื้นที่ตรวจสอบความปลอดภัยจำนวน 3 ชั้น ระยะเวลาสูงสุดของอาคารที่ 2 ลดลงอยู่ที่ 11 นาที พื้นที่ตรวจสอบความปลอดภัยจำนวน 2 ชั้น และระยะเวลาสูงสุดของอาคารที่ 3 ลดลงอยู่ที่ 12 นาที พื้นที่ตรวจสอบความปลอดภัยจำนวน 2 ชั้น

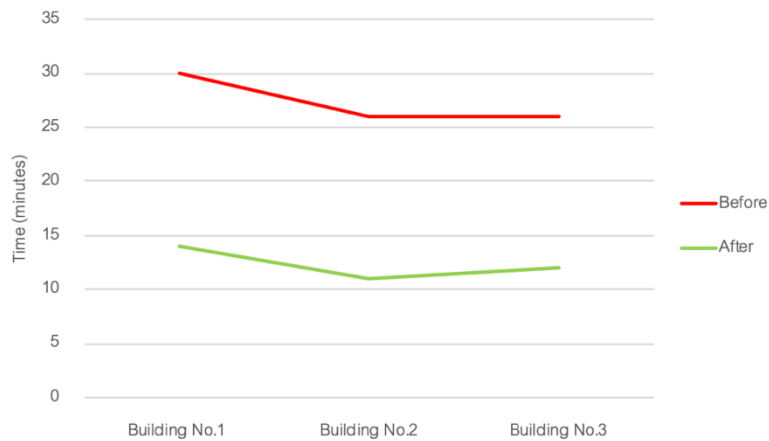


Fig. 4 Comparing the duration of the safety survey of safety officers with UAV

การประเมินทัศนคติต่อการใช้งานก่อนและหลังการนำอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้ พบว่า หลังจากเข้าร่วมกิจกรรมพนักงานและคนงานส่วนใหญ่มีทัศนคติที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว พบว่าก่อนการนำอากาศยานไร้คนขับเข้ามาช่วยในการทำงาน จะมีค่าทัศนคติเฉลี่ยเท่ากับ 3.38 โดยมีค่าระดับทัศนคติอยู่ในระดับปานกลาง แต่ภายหลังจากนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้ พบว่ามีค่าทัศนคติเฉลี่ยเท่ากับ 4.09 โดยมีค่าระดับทัศนคติอยู่ในระดับดีตาม Table 2-3.

Table 2 Shows the mean and standard deviation of attendances safety attitude level before and after using UAV.

Attitude to UAV	Before using			After using		
	\bar{X}	S.D.	Attitude level	\bar{X}	S.D.	Attitude level
Implementation of unmanned aerial vehicles technology can prevent accidents from work.	3.39	0.676	Fair	4.19	0.680	Good
Working safely shall requires a safety officer at work all the time.	3.88	0.832	Good	3.77	0.934	Good
The use of unmanned aerial vehicles helps safety officer work faster.	3.45	0.668	Good	4.31	0.625	Excellent
The use of unmanned aerial vehicles is helpful to access hazardous areas.	3.43	0.960	Good	4.27	0.782	Excellent

Table 2 (Continue).

Attitude to UAV	Before using			After using		
	\bar{X}	S.D.	Attitude level	\bar{X}	S.D.	Attitude level
The use of unmanned aerial vehicle is helpful to record incidents and can recheck/review the events at any time.	3.62	0.641	Good	4.39	0.572	Excellent
The use of unmanned aerial vehicle is created awareness to work safely.	3.18	0.765	Fair	4.10	0.808	Good
The use of unmanned aerial vehicles is helpful to monitoring site activities widely.	2.99	0.827	Fair	4.19	0.647	Good
The use of unmanned aerial vehicles allows you to work conveniently and faster.	3.48	0.583	Good	4.31	0.589	Excellent
The use of unmanned aerial vehicles helps safety officer work efficiency.	3.55	0.700	Good	4.18	0.658	Good
Do you think that using the unmanned aerial vehicles increase work safety?	3.17	0.583	Fair	4.14	0.731	Good
Do you think that using the unmanned aerial vehicles help safety inspection more easily and can report incidents in real time to increase work safety?	3.23	0.754	Fair	3.82	0.884	Good
The use of unmanned aerial vehicles is helped the project more interesting.	4.01	0.744	Good	4.01	0.744	Good
The use of unmanned aerial vehicles is developed work safety.	3.34	0.617	Fair	4.27	0.610	Excellent
The use of unmanned aerial vehicles do not obstruct work activities.	2.24	0.890	Unsatisfied	3.16	0.863	Fair
The use of unmanned aerial vehicles has increased the duration of safety inspections.	3.76	0.890	Good	4.27	0.694	Excellent
Total	3.38	0.742	Fair	4.09	0.721	Good

Table 3 Difference in safety attitude level questionnaire of the safety survey with UAV of engineers and construction workers.

Engineers and Construction workers	Amount	Mean	SD	Paired-Sample t-Test	<i>p</i>
Before of the safety survey with UAV	93	3.38	0.742	0.00*	0.05
After of the safety survey with UAV	93	4.09	0.721	0.00*	0.05

* Different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบก่อนและหลังการนำอากาศยานไร้คนขับเข้ามาประยุกต์ใช้ในการสำรวจความปลอดภัย ด้วยวิธีการประเมินทัศนคติด้านความเสี่ยง โดยใช้วิธี Jobs Safety Analysis (JSA) ในการชี้บ่งอันตรายจากการทำงาน พบว่า การประเมินทัศนคติด้านความเสี่ยงของงานที่มีความเสี่ยงอันตรายมากที่สุด 4 งาน ได้แก่ งานยก งานขุด งานที่เกี่ยวกับความร้อนและประกายไฟ และการทำงานในที่สูง ก่อนนำอากาศยานไร้คนขับเข้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบความปลอดภัยมีค่าคะแนนทัศนคติด้านความเสี่ยงอยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก ซึ่งหลังจากนำมาประยุกต์ใช้มีค่าทัศนคติด้านความเสี่ยงอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ตาม Fig. 5 จะเห็นได้ว่าการสำรวจหน้างานที่รวดเร็วขึ้นจะช่วยชี้บ่งอันตราย และแก้ไขได้รวดเร็วทำให้ลดโอกาสการเกิดความเสี่ยงได้

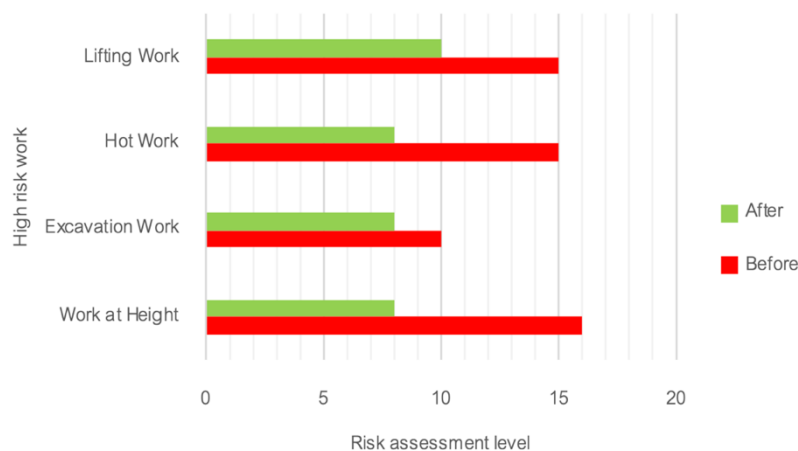


Fig. 5 Comparing the risk assessment level before and after of the safety survey with UAV.

สรุป

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบก่อนและหลังการนำอากาศยานไร้คนขับเข้ามาประยุกต์ใช้ในการสำรวจความปลอดภัย จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงาน วิธีการประเมินทัศนคติด้านความเสี่ยง โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มงานที่มีความเสี่ยงสูง และแบบสอบถามทัศนคติด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับการทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับ พบว่าการนำอากาศยานไร้คนขับเข้ามาใช้ในการสำรวจความปลอดภัยมีความรวดเร็วกว่าการเดินสำรวจของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยโครงการ จากระยะเวลาที่นำมาเปรียบเทียบทั้ง 3 อาคาร พบว่าหลังจากการนำอากาศยานไร้

คนขับเข้ามาสำรวจความปลอดภัยจะใช้ระยะเวลาสูงสุดในแต่ละพื้นที่ น้อยกว่าระยะเวลาการเดินทางสำรวจความปลอดภัยเป็นเวลา 15 นาที จากผลการประเมินทัศนคติด้านความเสี่ยงก่อน-หลังการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในการสำรวจความปลอดภัย พบว่างานที่มีความเสี่ยงสูง จะมีคะแนนทัศนคติด้านความเสี่ยงจากเดิมอยู่ในระดับสูง ถึงสูงมาก และหลังจากการประยุกต์ใช้ระดับคะแนนทัศนคติด้านความเสี่ยงลดลงเป็นระดับปานกลาง ถึงสูง และจากการประเมินระดับคะแนนทัศนคติด้านความปลอดภัยก่อน-หลัง การทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับของพนักงาน และคนงานมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 3.38 ที่อยู่ในระดับปานกลาง เป็น 4.09 อยู่ในระดับดี มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มผู้รับเหมา ที่ปรึกษาโครงการ และผู้อำนวยการโครงการก่อสร้างในโครงการ Whizdom the Forestias ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมที่ดิน. 2560. อากาศยานไร้คนขับ. https://www.dol.go.th/landmap/UAV_rev3.pdf, 30 มีนาคม 2564
- กวี หวังนิเวศน์กุล. 2561. ความปลอดภัยในงานก่อสร้าง. สำนักพิมพ์ซีเอ็ดดูเคชั่น. กรุงเทพฯ.
- กิตติศักดิ์ ศรีกลาง. 2558. อากาศยานไร้คนขับกับงานโฟโตแกรมเมตรี. โรงเรียนแผนที่กรมแผนที่ทหาร, กรุงเทพฯ.
- ระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2544. ว่าด้วยหลักเกณฑ์การชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง. <http://www2.diw.go.th/km/manualpdf/risk/manual/acrobat%20files/ind64.pdf>, 30 มีนาคม 2564
- วิฑูรย์ สิมะโชคดี. 2546. วิศวกรรมและการบริหารความปลอดภัยในโรงงาน, พิมพ์ครั้งที่ 16. สำนักพิมพ์เอเชียเพรส. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานเจ้าท่าภูมิภาคที่ 1. การบินสำรวจสภาพลำน้ำด้วยอากาศยานไร้คนขับ และสร้างแผนที่จาก ภาพถ่ายทางอากาศ, https://www.md.go.th/khet1/marine_office1/admin/images/upload/news/745-002.pdf, 12 พฤศจิกายน 2563
- สำนักงานประกันสังคม. 2561. สถิติการประสบอันตรายหรือเจ็บป่วยจากการทำงาน จำแนกตามความรุนแรงและประเภทกิจการ ปี 2561. https://www.sso.go.th/wpr/assets/upload/files_storage/sso_th/6d93e620264c2c29108e4f240c1b3b65.pdf, 20 ตุลาคม 2563
- Heinrich, H.W. 1931. Industrial Accident Prevention: McGraw-Hill., 21 กันยายน 2563
- John Howard. 2017. Can Drones Make Construction Safe? <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2017/10/23/drones-construction/>, 24 กันยายน 2563
- Tamiya. 2559. ข้อมูลการขาย DJI รุ่น Mavic Air. <https://www.djibangkok.com/shop/dji-mavic-air/>, 2 ตุลาคม 2564

การประเมินความเสี่ยงและแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้สำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลังคาลาดเอียง

Risk assessment and possible mitigation solution for implementation of solar energy sloping roof

อารีญา มัดสุสัน^a, อนูเผ่า ออบแพทย^{b,*}

Areeya Madsusan^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

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินความเสี่ยงสำหรับการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาที่มีความลาดเอียง 15–40 องศา ด้วยวิธีการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (JSEA) พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นมีระดับความเป็นอันตรายสูงเกิดจากการตกจากที่สูง เมื่อปรับปรุงให้ปลอดภัยตามแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้ รวมไปถึงการพัฒนาความรู้ด้านความปลอดภัย ได้แก่ การอบรมความปลอดภัยเบื้องต้น ความปลอดภัยในการทำงานบนที่สูง และการสอนงาน (OJT) กับผู้ปฏิบัติงานติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา จำนวน 150 คน ประเมินประสิทธิผลของการอบรมด้วยการสัมภาษณ์และทดสอบปฏิบัติ ใช้โปรแกรมทางสถิติมาวิเคราะห์ ค่าร้อยละ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าความรู้หลังอบรมสูงกว่าก่อนอบรม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 จากการศึกษาพบว่าสถิติการเกิดอุบัติเหตุก่อนปรับปรุงมีจำนวน 12 ครั้ง (92.30%) และหลังปรับปรุงมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นจำนวน 1 ครั้ง (7.70%)

คำสำคัญ: การทำงานบนที่สูง, การประเมินความเสี่ยง, ระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

Abstract

This study presents Risk Assessment for installing solar rooftop systems with a slope of 15-40 degrees by Job Safety and Environment Analysis (JSEA) method. It was found that the impact occurred with a high level of hazard caused by falling from a height. When safeguarded as possible solutions. Including the development of safety knowledge including basic safety training, safe working at height training and on-the-job training (OJT) with worker installing solar rooftop 150 people. Evaluate the effectiveness of the training through interviews and practice tests. Using IBM SPSS program to analyze the percentage and standard deviation. It was found that the knowledge after training was higher than before training, statistically significant at the 0.05 level. Result the statistics of accidents before improvement were 12 times (92.30%) and after the improvement, there was 1 accident (7.70%).

Keywords: Risk Assessment, Solar Rooftop Systems, Working at Height

คำนำ

การติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์กำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นในประเทศไทยและยังได้รับการส่งเสริมจากรัฐบาลให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop Systems) ก็ยังมีความเสี่ยงจากความสูงต่อผู้ปฏิบัติงานอย่างมาก แม้ผู้ปฏิบัติงานจะปฏิบัติงานตามมาตรฐานระบบ การจัดการด้านความปลอดภัยในการทำงานบนที่สูง และกฎระเบียบด้านสุขภาพและความปลอดภัยในการทำงานที่กำหนดไว้ การติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้โครงสร้างของหลังคาเป็นฐานในการติดตั้งได้และพื้นที่ในการติดตั้งที่จำกัด จากสภาพการทำงานที่ต้องทำงานบนที่สูงและทำงานกลางแจ้งในสภาพที่มีอากาศร้อน รวมทั้งมีพื้นที่การทำงานค่อนข้างจำกัด ทำให้ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุจากการตกจากที่สูง และอันตรายเมื่อเกิดอุบัติเหตุแล้ว ทำให้บาดเจ็บรุนแรงจนถึงทุพพลภาพและเสียชีวิต เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานในการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาลาดเอียง จึงต้องมีการประเมินความเสี่ยงทุกขั้นตอนการปฏิบัติงานบนหลังคาเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น จึงได้จัดทำวิจัยในครั้งนี้ขึ้นเพื่อประเมินความเสี่ยงสำหรับการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาลาดเอียง ที่มีความลาดเอียง 15-40 องศา ด้วยวิธีการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (Job Safety and Environment Analysis : JSEA) นำไปสู่การเสนอแนะแนวทางการแก้ไขที่เป็นไปได้สำหรับงานติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) เพื่อประเมินประสิทธิผลของการอบรมให้ความรู้ความปลอดภัยในขั้นตอนการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาลาดเอียง เปรียบเทียบระดับความรู้ความเข้าใจก่อนและหลังอบรม เพื่อนำผลที่ได้ไปปรับปรุงมาตรการด้านความปลอดภัยในการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาลาดเอียง ในการลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ การบาดเจ็บและการสูญและเกิดการทำงานอย่างปลอดภัยต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงในงานติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาลาดเอียง
2. เพื่อประเมินประสิทธิผลของการอบรมให้ความรู้ความปลอดภัยในขั้นตอนการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาลาดเอียง
3. เพื่อปรับปรุงมาตรการด้านความปลอดภัยในการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาลาดเอียง

อุปกรณ์และวิธีการ

การทำวิจัยครั้งนี้มีวิธีการดำเนินการ โดยใช้แบบวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมและแบบทดสอบการทำงานบนหลังคา ดังแสดงใน Fig. 1

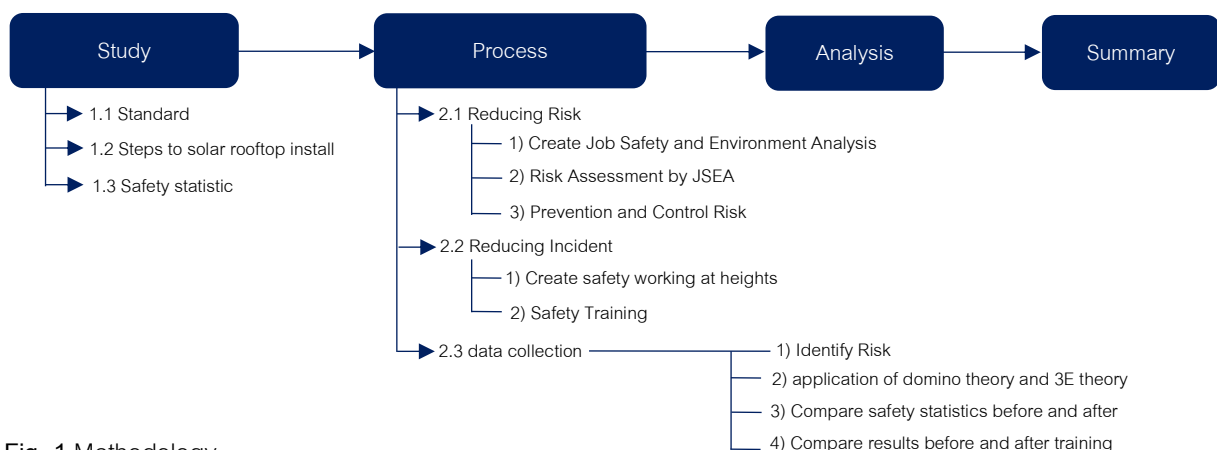


Fig. 1 Methodology

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.1 **มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง** ได้แก่ มาตรฐานระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในการทำงานบนที่สูง มปอ.101 (2561) ได้กำหนดให้ต้องดำเนินการประเมินความเสี่ยงในงานบนที่สูง ตั้งแต่ 2 เมตรขึ้นไป ก่อนเริ่มดำเนินการ โดยประยุกต์ใช้การประเมินความเสี่ยง ตามมาตรฐาน มปอ.402 (2561) และกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2543) ได้กำหนดวิธีการในการชี้บ่งอันตรายและหลักเกณฑ์การประเมินความเสี่ยง สอดคล้องกับแนวปฏิบัติการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี Job Safety Analysis (JSA) (สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (องค์การมหาชน) (สสปท.), 2563) ระบุว่า JSA ยังเป็นวิธีการที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพ และในต่างประเทศพบว่า ประเทศออสเตรเลียมีการกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar panel photovoltaic (PV) installations) คือ AS/NZS3000:2018 Electrical Installations (AUS/NZ Wiring Rules) (SafeWork NSW, 2021) และ European Agency for Safety and Health at Work (2021) ได้กำหนดตัวอย่างหัวข้อรายการตรวจสอบการป้องกันอุบัติเหตุและความเสียหายต่อสุขภาพในภาคพลังงานแสงอาทิตย์ไว้

1.2 **ขั้นตอนการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา** ได้อ้างอิงขั้นตอนการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในคู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การถ่ายทอด และเผยแพร่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564) ผนวกกับระเบียบขั้นตอนการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของบริษัทรับติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์แห่งหนึ่ง ซึ่งสามารถสรุปเป็นภาพรวมได้ดังแสดงใน Fig. 2.

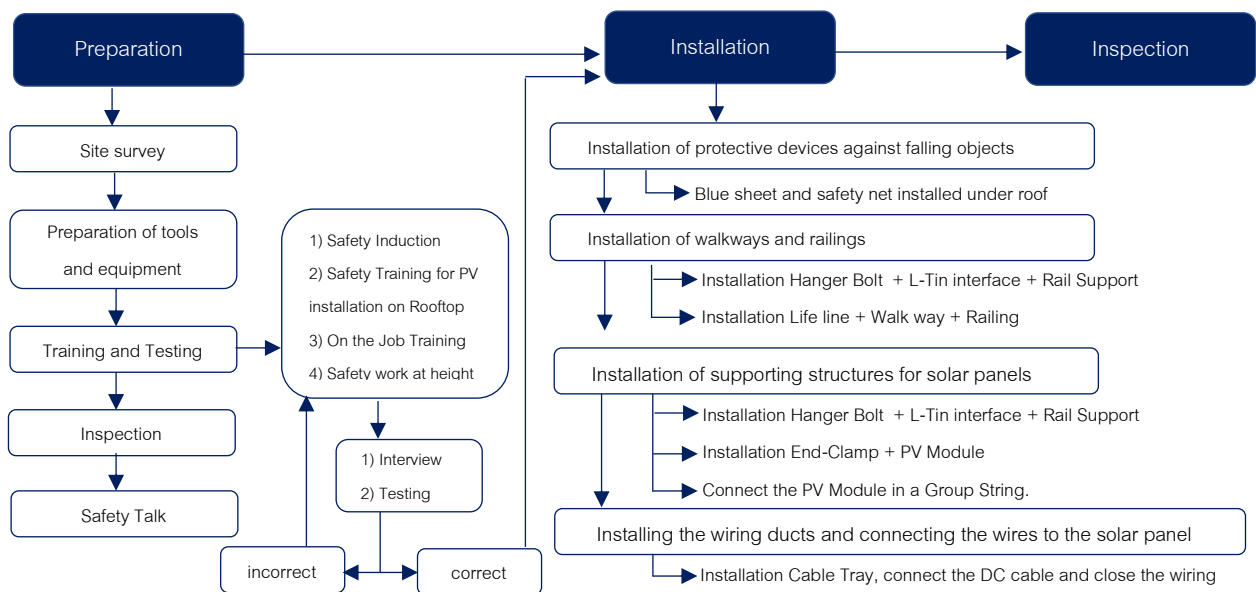


Fig. 2 Procedure for solar rooftop systems installation

1.3 **สถิติความปลอดภัย** รวบรวมข้อมูลสถิติด้านความปลอดภัยตลอดระยะเวลาโครงการ โดยเก็บข้อมูลสถิติอุบัติเหตุจากการทำงานบนที่สูง เปรียบเทียบระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงมาตรการความปลอดภัย

2. กระบวนการ

2.1 การลดความเสี่ยง

1) จัดทำแบบประเมินความเสี่ยง โดยได้รับคำแนะนำจากผู้มีความรู้ความเข้าใจ และรายการตรวจสอบการระบุอันตราย: ความเสี่ยงด้าน OSH กับการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ของ European Agency for Safety and Health at Work จนได้แบบวิเคราะห์วิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (JSEA)

2) ดำเนินการที่ป้องกันอันตรายและประเมินความเสี่ยงในแต่ละขั้นตอนการทำงาน และการจัดระดับความเสี่ยง เพื่อนำผลที่ได้ไปกำหนดมาตรการจัดการความเสี่ยง ในการป้องกัน ควบคุม และลดความเสี่ยงที่เพียงพอ

3) รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง เพื่อดำเนินการปรับปรุงแก้ไข

2.2 การลดอุบัติเหตุ

1) สร้างแบบทดสอบความปลอดภัยในการทำงานบนที่สูง โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 สอบถามข้อมูลส่วนบุคคล เป็นคำถามเกี่ยวกับ ชื่อ-นามสกุล เพศ อายุ การผ่านการอบรมหลักสูตรต่าง ๆ ประสบการณ์ วุฒิการศึกษา ประสบอุบัติเหตุ โรคประจำตัว ดื่มสุราหรือแอลกอฮอล์ เฉลี่ยเวลาในการนอน จำนวน 10 ข้อ

ส่วนที่ 2 สอบถามเกี่ยวกับความรู้และทัศนคติด้านความปลอดภัยในการทำงาน จำนวน 6 ข้อ

ส่วนที่ 3 การทดสอบภาคปฏิบัติสำหรับการทำงานติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาแบบลาดเอียง (Solar Rooftop) จำนวน 6 ข้อ

ส่วนที่ 4 ลงชื่อผู้ทำการทดสอบ หัวหน้างาน และเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย

2) กำหนดกลุ่มตัวอย่างจากผู้ปฏิบัติงานติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในโครงการ จำนวน 150 คน ประจำเดือนพฤศจิกายน 2562-สิงหาคม 2563 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโคโรนา-2019 (COVID-19)

3) การอบรมพัฒนาความรู้ความเข้าใจด้านความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ได้แก่ การอบรมความปลอดภัยเบื้องต้นในการทำงาน, การอบรมให้ความรู้ด้านความปลอดภัยในการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา, การสอนขั้นตอนและวิธีการติดตั้ง และการอบรมความปลอดภัยในการทำงานที่สูง

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการชี้อันตรายและประเมินความเสี่ยง และเปรียบเทียบข้อมูลระดับความเสี่ยงระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงมาตรการด้านความปลอดภัย

2) นำข้อมูลที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง และสถิติการเกิดอุบัติเหตุก่อนปรับปรุง ประยุกต์ใช้ทฤษฎีโดมิโน และหลัก 3E ของ H.W. Heinrich (1932) เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแบบองค์รวม ดังแสดงใน Fig.3

3) เปรียบเทียบข้อมูลสถิติด้านความปลอดภัยในการทำงานก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

4) ประเมินเปรียบเทียบประสิทธิผลของการอบรมให้ความรู้ความปลอดภัยในขั้นตอนการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาแบบลาดเอียง ระหว่างก่อนอบรมและหลังอบรม

3. วิเคราะห์ข้อมูล โดยอ้างอิงผลลัพธ์จากโปรแกรม IBM SPSS 19

4. สรุปงานวิจัย พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอย่างปลอดภัย

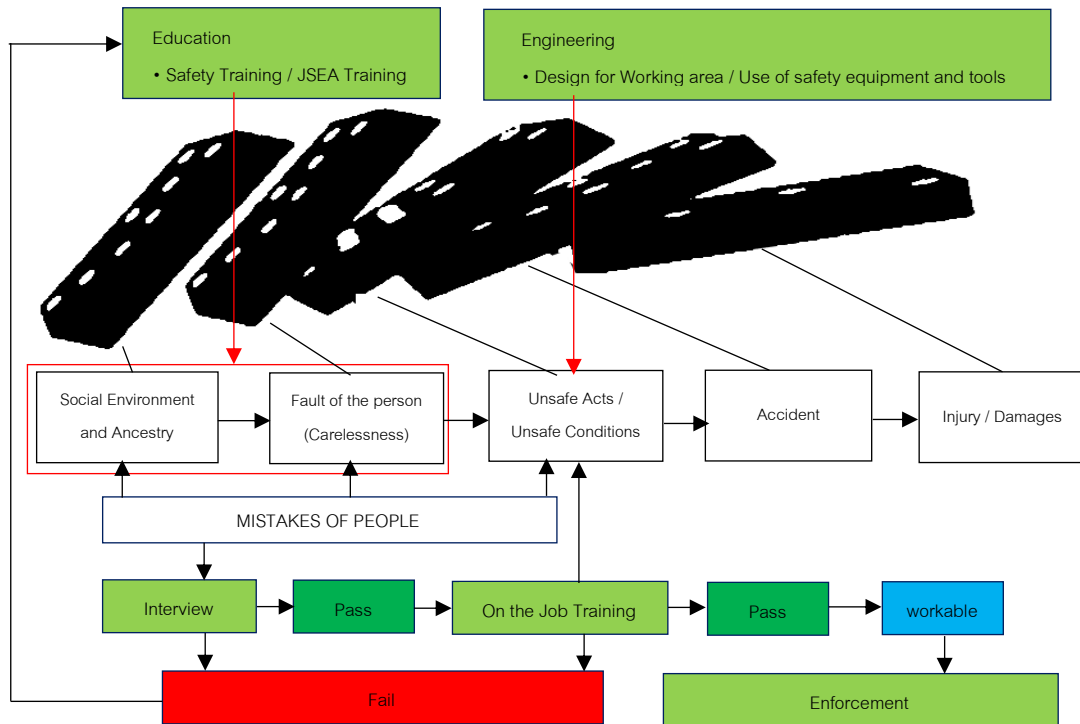


Fig. 3 application of domino theory and 3E theory

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่กำหนดไว้ จากผลการทดสอบ ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 150 คน ได้ผลดังนี้

1. ผลการรวบรวมข้อมูลสถิติด้านความปลอดภัย พบว่าการเกิดอุบัติเหตุจากที่สูง จำนวน 13 ครั้ง โดยมีสาเหตุมาจากการกระทำที่ไม่ปลอดภัย (Unsafe Action) จำนวน 6 ครั้ง และเกิดจากสภาพแวดล้อมในการทำงานไม่ปลอดภัย (Unsafe Condition) จำนวน 7 ครั้ง ซึ่งก่อนปรับปรุงมีอุบัติเหตุเกิดขึ้น จำนวน 12 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 92.30 และหลังปรับปรุงมาตรการความปลอดภัย พบว่ามีอุบัติเหตุเกิดขึ้น จำนวน 1 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 7.70 ดังแสดงใน Table 1
2. ผลการประเมินความเสี่ยง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (JSEA) พบว่ามีระดับความเสี่ยงอันตราย เท่ากับ 16 เป็นความรุนแรงสูงมาก ระดับ 4 หมายถึงความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยง มีสาเหตุจากการตกจากที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับวันชนะ (2558) ที่รายงานว่าการกระทบที่เกิดขึ้นเป็นอันตรายจากการตกจากที่สูงและการถูกของตกกระแทกทั้งสิ้น
3. ผลการทดสอบความรู้ความเข้าใจในขั้นตอนการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาลาดเอียง โดยใช้แบบทดสอบการทำงานบนหลังคา จากการสัมภาษณ์ พบว่าหลังอบรมสูงกว่าก่อนอบรม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงใน Table 2 สอดคล้องกับงานวิจัยของอทิติย์ (2559) ที่รายงานว่าการเกิดอุบัติเหตุของเหตุการณ์ที่ผู้ปฏิบัติงานไม่มีความรู้/ไม่ผ่านการอบรมตรงตามความเสี่ยงของงาน มีค่า 0.79 ค่าความเชื่อมั่น 0.95
4. ผลการทดสอบการปฏิบัติงานตามขั้นตอนด้านความปลอดภัยในงานติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาลาดเอียง หลังอบรมสูงกว่าก่อนอบรม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงใน Table 3

Table 1 Safety statistics throughout the project period

	Year	Month	Number of accidents from height (times)	Number of high falls (cases)	Fatality (cases)
Before improvement	2019	November	6	0	0
		December	3	1	0
	2020	January	1	0	0
		February	1	1	1
		March	1	0	0
After improvement	2020	April	0	0	0
		May	0	0	0
		June	1	0	0
		July	0	0	0
		August	0	0	0
	Total		13	2	1

สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงมาตรการด้านความปลอดภัยที่เหมาะสมสามารถลดอุบัติเหตุจากการทำงานได้ การชั่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงด้วยแบบวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (JSEA) พบว่าระดับความเป็นอันตรายสูงมาก มีสาเหตุจากการตกจากที่สูง หากมีการส่งเสริมกิจกรรมด้านความปลอดภัย การอบรมให้ความรู้และทดสอบความรู้ความเข้าใจ พบว่าระดับความรู้ความเข้าใจในการขึ้นการปฏิบัติงานอย่างปลอดภัย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ $p\text{-value} < 0.05$

ทั้งนี้การติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในปัจจุบันได้จัดให้มีการชั่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงก่อนเริ่มดำเนินการ รวมถึงมีการฝึกอบรมและทดสอบความรู้ความเข้าใจก่อนปฏิบัติงาน ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจึงมั่นใจได้ว่าการปฏิบัติตามขั้นตอนการทำงานที่ถูกต้องมีความปลอดภัยเพียงพอในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณไซต์งานติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาแห่งหนึ่งในจังหวัดลพบุรี ตลอดจนผู้ปฏิบัติงานทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือในการทำวิจัย ทำให้ได้รับข้อมูลครบถ้วนในการทำวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

Table 2 Comparative table of knowledge and attitudes on safety at work before and after training

Questions	Mean	S.D.	Std. Error Mean	95% Confidence Interval		t	df	Sig. (2-tailed)
				of the Difference				
				Lower	Upper			
1. What is qualifications for working at height worker?	.16	.36	.03	.10	.21	5.32	149	.00
2. What is PPE equipment for working at height?	.09	.29	.02	.04	.14	3.91	149	.00
3. How to walk on the roof?	.08	.28	.02	.04	.13	3.76	149	.00
4. How to walk on the roof without Walk Way?	.10	.31	.02	.05	.15	4.21	149	.00
5. How should I attach the Lanyard?	.12	.32	.02	.06	.17	4.50	149	.00
6. What do you do if you see your coworker is unsafe?	.06	.23	.01	.02	.09	3.08	149	.00

Table 3 Comparison table of the practice test of the operators working in the installation of solar panels on the roof, before training and after training

Practical test	Mean	S.D.	Std. Error Mean	95% Confidence Interval		t	df	Sig. (2-tailed)
				of the Difference				
				Lower	Upper			
1. Availability PPE and proper wearing.	.14	.34	.02	.08	.19	4.92	149	.00
2. Using a life line	.06	.23	.01	.02	.09	3.08	149	.00
3. Walking on the roof with Walk Way installed	.46	.50	.04	.38	.54	11.41	149	.00
4. Walk on the roof without Walk Way installed	.04	.19	.01	.00	.07	2.49	149	.01
5. Moving Metal Sheet	.30	.46	.03	.22	.37	7.99	149	.00
6. Moving Rail Support, Walk way, PV Module, Cable Tray	.20	.40	.03	.14	.27	6.23	149	.00

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. 2564. คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การถ่ายทอด และเผยแพร่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2543. ระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม ว่าด้วยหลักเกณฑ์การชี้ป้่งอันตราย การประเมินความ และกาจัดทำแผนบริหารจัดการความเสี่ยง พ.ศ. 2543.
- วิสันติ เลาหอุดมโชค, ชมัพร เทพานวล. 2561. สถานการณ์การดำเนินงานด้านความปลอดภัยและอาชีวอนามัยของประเทศไทย ปี 2561. กองความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. กรุงเทพฯ.
- วันชนะ พรหมฤทธิ. 2558. การปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยในการทำงานของพนักงานในอุตสาหกรรมการติดตั้งลิฟต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (องค์การมหาชน). 2562. มาตรฐานการประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน มปอ. 402. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (องค์การมหาชน). 2563. แนวปฏิบัติการชี้ป้่งอันตรายด้วยวิธี Job Safety Analysis (JSA). E-book.
- อติชัย เกษราภัญ. 2559. การวิเคราะห์ความเสี่ยงของงานทำความสะอาดนอกรอาคารสูงเพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานให้ปลอดภัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- European Agency for Safety and Health at Work. Hazard Identification Checklist: OSH risk associated with small-scale solar energy application. <http://osha.europa.eu>, 20 January 2021.
- SafeWork NSW. 2021. Guide to safety solar panel installation. SafeWork MSW 92-100 Donnison Street. Gosford.

การวิเคราะห์แบบจำลองการอพยพ และการจัดการเหตุฉุกเฉิน กรณีเกิดเหตุฉุกเฉินภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทย

Evacuation Model Analysis and Emergency Management in the Event of an Emergency in a Subway Tunnel in Thailand

พัจนา ศิลป์สโมสร^a, อณุเภา ออบแพทย^{b,*}

Patjana Sinsamosorn^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

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองการอพยพผู้โดยสารและการบริหารจัดการเหตุฉุกเฉินภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ด้วยโปรแกรม PyroSim และ Pathfinder โดยกำหนดพื้นผิว (Surface) ให้มีอัตราการปล่อยความร้อนต่อพื้นที่ 1,000 kW/m² และจำลองปฏิกิริยา (Reaction) เป็นปฏิกิริยา Propylene และกำหนดการอพยพเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ อพยพจากรถไฟฟ้าไปยังราง และอพยพจากรถไฟฟ้าไปยังอาคารปล่องระบายอากาศ โดยกำหนดจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็น 5 กรณี ได้แก่ 1,135, 991, 703, 799 และ 577 คน พบว่าผู้โดยสารทุกคนสามารถอพยพออกจากขบวนรถไฟฟ้าได้อย่างปลอดภัยจากก๊าซพิษ (Fractional Effective Dose; FED) ที่วัดค่าได้ไม่เกิน 0.3 ในวินาทีที่ 1,806, 1,497, 982, 1,140 และ 836 โดยยังสามารถมองเห็นเส้นทางในการอพยพได้ แต่ผู้โดยสารบางส่วนอาจไม่ปลอดภัยเนื่องจากการสัมผัสอุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: การขนส่ง, การอพยพ, ฉุกเฉิน, อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

Abstract

This study presents Occupants Evacuation Simulation and Emergency response management in subway tunnels using PyroSim and Pathfinder programs. Propylene reaction has been used in this simulation and designed Heat Release Rate Per Area (HRRPUA) of the surface to 1,000 kW/m². Two situations are being identified for the evacuation; one is to evacuate occupants from Train to Track, and the second is to evacuate occupants from Train to Intervention shaft building. We separated sample groups into 5 cases: 1,135, 991, 703, 799 and 577 people. The study found that all occupants could evacuate from a train safely when the FED (Fractional Effective Dose) level is not more than 0.3 in 1,806, 1,497, 982, 1,140, and 836 seconds, respectively. During the evacuation, occupants could see routes, but some occupants might not be safe due to contact with high temperatures, nearly 100 degrees Celsius.

Keywords: Emergency, Evacuation, Subway Tunnel, Transportation

คำนำ

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ได้เปิดให้ประชาชนเลือกใช้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่เป็นโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทย ชื่อว่า “โครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล” หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่า “โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน” ในปัจจุบันผู้รับผิดชอบด้านเดินรถไฟฟ้าในเส้นทางดังกล่าวคือ บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (BEM) ซึ่งการให้บริการอาจมีเหตุการณ์ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อค่าบริการเดินระบบรถไฟฟ้า อีกทั้งภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินมีข้อจำกัดทางด้านพื้นที่และการระบายอากาศ จึงอาจเป็นเรื่องยากในการบริหารจัดการเพื่ออพยพผู้โดยสารไปยังพื้นที่ปลอดภัยได้อย่างรวดเร็ว หากมีการบริหารจัดการที่ไม่มีประสิทธิภาพอาจทำให้มีผู้ได้รับบาดเจ็บและผู้เสียชีวิตเป็นจำนวนมากได้ ดังนั้นการตระหนักถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารที่ใช้บริการระบบขนส่งทางรางภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน และการบริหารจัดการในกรณีที่ต้องอพยพต่อสถานการณ์ฉุกเฉินจึงเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยในการออกแบบและก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน รฟม. ได้นำมาตรฐานความปลอดภัย NFPA130 มากำหนดใช้เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดอัคคีภัย โดยการกำหนดคุณลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง รวมทั้งกำหนดรูปแบบของอาคาร เช่น การเลือกใช้วัสดุที่ไม่ติดไฟง่าย ซึ่งจุดประสงค์หลักเพื่อระงับการเกิดเพลิงไหม้รวมถึงการอำนวยความสะดวกผู้ประสบเหตุในการหนีไฟให้รวดเร็วและปลอดภัยที่สุด โดยออกแบบให้สามารถอพยพผู้โดยสารสู่จุดปลอดภัยได้ภายใน 6 นาที (การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.ก) โดยในที่นี่จะกำหนดการอพยพเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ อพยพจากรถไฟฟ้าไปยังราง และอพยพจากรถไฟฟ้าไปยังอาคารปล่องระบายอากาศ บริเวณช่วงสถานีสุขุมวิทและสถานีเพชรบุรี เนื่องจากเป็นสถานีที่อยู่ใต้ดินตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ศูนย์กลางทางธุรกิจ ดังนั้นเพื่อที่จะทราบถึงความสามารถในการอพยพผู้โดยสารออกจากรถไฟฟ้าใต้ดินไปยังจุดปลอดภัย และทราบถึงปัญหาในการบริหารจัดการกระบวนการในการอพยพผู้โดยสารซึ่งสามารถนำไปสู่การปรับปรุงพัฒนาข้อบกพร่องของการบริหารจัดการเหตุฉุกเฉินภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินให้มีความปลอดภัยและเกิดประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจำลองการอพยพผู้โดยสารและการบริหารจัดการเหตุฉุกเฉินภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินด้วยโปรแกรม PyroSim สำหรับจำลองเพลิงไหม้ โดยการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของควันทัน อุณหภูมิ ความเร็ว ความเป็นพิษ เป็นต้น และโปรแกรม Pathfinder สำหรับออกแบบและวิเคราะห์การจำลองการอพยพ (Thunderhead Engineering, n.d.a, n.d.b) อีกทั้งเพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ในการเสนอแนะแนวทางการพัฒนาแผนการอพยพผู้โดยสารภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินได้อย่างปลอดภัยต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การทำวิจัยครั้งนี้มีวิธีการดำเนินการ โดยใช้ข้อมูลประยุกต์ร่วมกับโปรแกรม PyroSim และ Pathfinder ดังแสดงใน Fig. 1

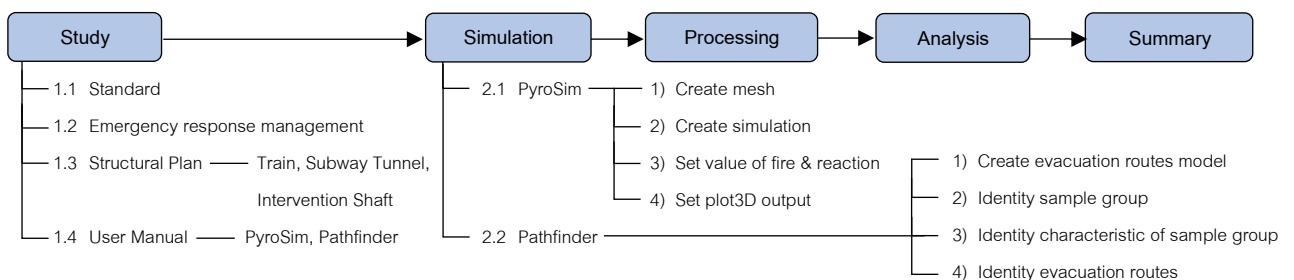


Fig. 1 Methodology

5. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.4 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มาตรฐาน NFPA 130 ได้กำหนดระยะเวลาในการอพยพจากชั้นชานชาลาไปยังชั้นถัดไปต้องไม่เกิน 4 นาที ในระยะทางที่ไกลที่สุด ณ จุดใดๆ บนชานชาลา ไปยังจุดปลอดภัยต้องไม่เกิน 300 ฟุต (91.4 เมตร) และระยะเวลาในการอพยพจากจุดที่ไกลสุดบนชานชาลาไปยังจุดปลอดภัยต้องทำได้ภายในเวลาไม่เกิน 6 นาที (ธนา น้อยเรือน, นพคุณ บุญกระพือ และ ผนกร อินทร์พยุ, 2558) และมาตรฐาน ISO/TS 13571 Life-threatening components of fire-Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data ได้กำหนดค่าก๊ากซ์พิช (Fractional Effective Dose; FED) ต้องมีค่าต่ำกว่า 0.3 ผู้อพยพจึงจะไม่ได้รับอันตรายจากก๊ากซ์พิช (International Organization for Standardization, 2002)

1.5 แผนการบริหารจัดการเหตุฉุกเฉิน ได้อ้างอิงภาคทฤษฎีจากระเบียบปฏิบัติงาน เรื่อง การปฏิบัติการสถานีในการอพยพผู้โดยสาร (การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.ช) รวมถึงภาคปฏิบัติด้วยการสอบถามข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ผู้มีประสบการณ์และมีบทบาทหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในการบริหารจัดการเหตุฉุกเฉิน ซึ่งสามารถสรุปเป็นภาพรวมได้ดังแสดงใน Fig. 2

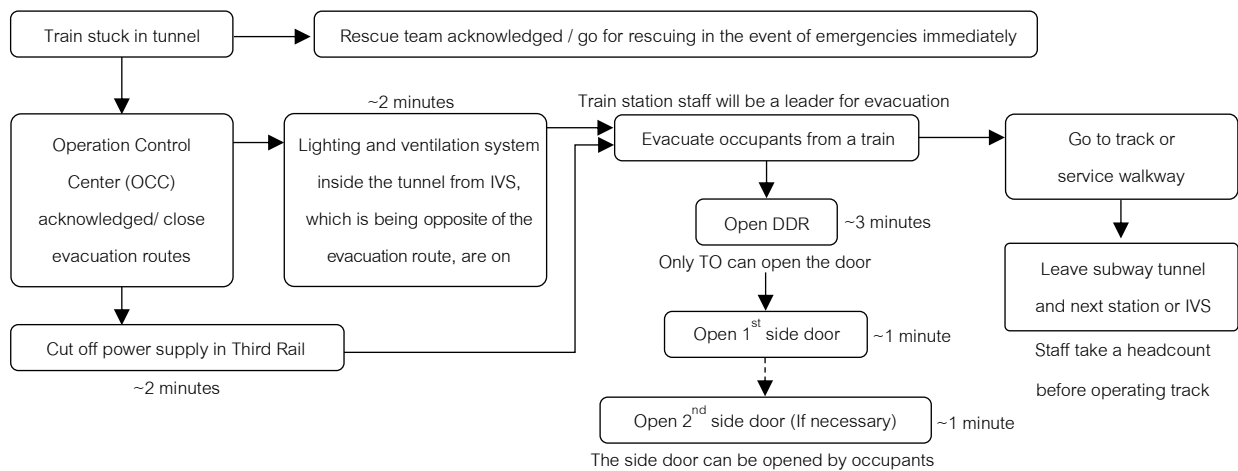


Fig. 2 Emergency response management (initial plan)

1.6 แบบแปลนโครงสร้างของรถไฟฟ้า อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน และอาคารปล่องระบายอากาศ (Intervention Shaft; IVS) โดยจะทำการจำลองเพลิงไหม้ภายในห้องโดยสารบริเวณหัวขบวนรถไฟฟ้า เพื่อจำลองสถานการณ์การลอบวางเพลิงที่ส่งผลกระทบต่อพนักงานควบคุมรถไฟฟ้าให้หยุดรถไฟฟ้าในทันทีทันใด (ขบวนรถไฟฟ้าไม่เข้าจอดเทียบชานชาลา)

1.7 วิธีกรใช้โปรแกรมจาก PyroSim User Manual 2020.5 และ Pathfinder User Manual 2021.1

6. การสร้างแบบจำลอง

2.3 โปรแกรม PyroSim

4) สร้างโครงข่าย (Mesh) ของแบบจำลองขบวนรถไฟฟ้าให้ครอบคลุมพื้นที่การเกิดควันภายในขบวนรถไฟฟ้า โดยกำหนดค่า Min และค่า Max ของแกน X, Y และ Z จากนั้นกำหนดขนาดเซลล์ของแต่ละแกน ทั้งนี้ได้เพิ่มความยาว ณ จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดขอบเขตโครงข่าย (Mesh Boundary) ตามแนวแกน X (ความยาวขบวนรถไฟฟ้า) เพื่อสังเกตการณ์การเคลื่อนตัวของควันให้ปรากฏเต็มพื้นที่ขบวนรถไฟฟ้า ที่จะกำหนดทิศทางการระบายควันจากหัวขบวนไปยังท้ายขบวนรถไฟฟ้า

5) สร้างขบวนการไฟฟ้า โดยกำหนดขนาดผนังกันห้องและช่องประตูของแต่ละสัดส่วนภายในห้อง โดยสารที่อ้างอิงสัดส่วนใกล้เคียงกับแบบแปลนของโครงสร้างขบวนการไฟฟ้า และได้กำหนดประเภทพื้นผิว (Surface) ของวัสดุเป็น PVC ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการใช้ภายในขบวนการไฟฟ้า (ไม่ระบุชนิดวัสดุเฉพาะเจาะจง) ทั้งนี้ในแบบจำลองดังกล่าว ไม่ได้กำหนดผนังและพื้นของขบวนการไฟฟ้าเนื่องจากเกิดข้อจำกัดในการประมวลผลของโปรแกรม แต่สามารถแสดงขอบเขตการเคลื่อนตัวของควันได้จากการสร้างโครงข่าย (Mesh) ที่ครอบคลุมขบวนการไฟฟ้า

6) จำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ภายในขบวนการไฟฟ้า 3,600 วินาที โดยการสร้างขนาดเพลิงไหม้และกำหนดพื้นผิว (Surface) ให้มีอัตราการปล่อยความร้อนต่อพื้นที่ (Heat Release Rate Per Area; HRRPUA) 1,000 kW/m² และจำลองปฏิกิริยา (Reaction) เป็นปฏิกิริยา Propylene ที่มีความหนาแน่นของควันน้อยกว่าปฏิกิริยา Polyurethane เนื่องจากวัสดุที่ใช้ภายในสถานีและอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟง่าย

7) กำหนด Output เพื่อดำเนินการค่ากึ่งประสิทธิผล (Fractional Effective Dose; FED) ซึ่งต้องอ่านค่าข้อมูล Plot3D ที่ถูกสร้างขึ้นโดย FDS ในโปรแกรม PyroSim โดยในแบบจำลองนี้ได้เลือก 5 ค่า ได้แก่ [Species: CARBON DIOXIDE] Volume Fraction, [Species: CARBON MONOXIDE] Volume Fraction, [Species: OXYGEN] Volume Fraction, Temperature และ Visibility ทั้งนี้โปรแกรมได้กำหนดให้เลือกค่าได้ไม่เกิน 5 ค่า จากนั้นทำการประมวลผลและนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรม Pathfinder ต่อไป

2.4 โปรแกรม Pathfinder

4) สร้างขอบเขตเส้นทางการอพยพ โดยทำการเพิ่มห้อง (Add a room) พร้อมทั้งกำหนดค่าความสูงของระนาบแกน Z (Z Plane) ตามสัดส่วนให้มีขนาดใกล้เคียงกับแบบแปลนของโครงสร้างขบวนการไฟฟ้า อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน และอาคารปล่อยระบายอากาศระหว่างสถานีสุขุมวิทและสถานีเพชรบุรี โดยในแต่ละห้องสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้เมื่ออยู่ในระนาบเดียวกัน (Merge) หรือสร้างบันได/ทางลาด (Ramp) หรือสร้างประตูขึ้นมา อีกทั้งสามารถกำหนดความหนาแน่นของผู้โดยสารและสร้างข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่ในแต่ละข้อมูลส่วนตัวหรือบทบาทของผู้โดยสาร (Profile) ที่กำหนดไว้ได้ เช่น จำกัดการใช้ประตู ห้อง ลิฟต์ บันไดเลื่อน เป็นต้น

5) กำหนดจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา 5 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 จำนวนผู้โดยสารที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้มากที่สุดเท่ากับ 1,135 คน กรณีที่ 2 จำนวนผู้โดยสารในขบวนโดยเฉลี่ยมากที่สุดของช่วงเวลาทั้งวันเท่ากับ 991 คน กรณีที่ 3 จำนวนผู้โดยสารในขบวนโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดของช่วงเวลาทั้งวันเท่ากับ 703 คน กรณีที่ 4 จำนวนผู้โดยสารในขบวนโดยเฉลี่ยมากที่สุดของช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นเท่ากับ 799 คน และกรณีที่ 5 จำนวนผู้โดยสารในขบวนโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดของช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นเท่ากับ 577 คน ซึ่งช่วงเวลาทั้งวัน หมายถึง เร่งด่วนเช้า (6.00 น. – 9.00 น.), ปกติเช้า, เร่งด่วนเย็น (16.30 น. – 19.30 น.), ปกติเย็น, เสาร์, อาทิตย์/นักชดถุกษ์) ทั้งนี้จำนวนผู้โดยสารในขบวนการไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันแยกตามช่วงเวลา คำนวณจากข้อมูลในรายงานสรุปผลการดำเนินการโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล ประจำเดือนมกราคมถึงธันวาคม 2562 (บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2562) ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่จะเกิดการแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโคโรนา-2019 (COVID-19) ดัง Equation 1 และ Equation 2

$$\text{Number of occupants} = \frac{\text{Daily number of occupants at different times}}{(\text{Daily number of trips} \times 2^*)} \times \begin{matrix} \text{(Percentage of occupants from} \\ \text{Sukhumvit station to other station)} \end{matrix} \quad (1)$$

$$\text{Daily number of trips} = \frac{\text{Daily service time (minutes)}}{\text{Frequency of service time}} \quad (2)$$

*2 comes from Northbound (NB) and Southbound (SB)

6) กำหนดคุณลักษณะและคุณสมบัติของผู้โดยสารที่อพยพในแบบจำลอง ได้แก่ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 1.3 m/s (Mitchell and Charters, 2005) ความกว้างไหล่ซ้ายไทย-หญิงไทยเฉลี่ยเท่ากับ 33.7 cm ถึง 43.2 cm (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562ก, 2562ข) และการเคลื่อนที่แบบ Steering ที่มีการรักษาห่างระหว่างบุคคลและเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นแนววิถีโค้ง ซึ่งแตกต่างกับ SFPE ที่เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงและมีการทับซ้อนกันระหว่างตัวบุคคลดังนั้นการเคลื่อนที่แบบ Steering จึงมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของมนุษย์ และมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการเคลื่อนที่แบบ SFPE (นรินทร์ บุญประเสริฐ, 2559)

7) จำลองพฤติกรรมเป็น 2 รูปแบบ คือ การอพยพจากรถไฟฟ้าไปยังราง (Train to Track) และการอพยพจากรถไฟฟ้าไปยังอาคาร (Train to Station) ซึ่งในที่นี้หมายถึงอาคารปล่องระบายอากาศ (Intervention Shaft; IVS) การจำลองการอพยพผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟฟ้าสอดคล้องตามระเบียบปฏิบัติงานในการอพยพผู้โดยสาร โดยกำหนดบทบาท (Profile) และระยะเวลาที่พนักงานควบคุมรถไฟฟ้า (Train Operator; TO) บริเวณหัวขบวนรถไฟฟ้าต้องใช้เวลาในการแทรกผ่านผู้โดยสารไปเปิดประตูท้ายขบวนรถไฟฟ้า (Detrainment Door/Ramp; DDR) จากนั้นกำหนดระยะเวลาการเปิด-ปิดประตูขบวนรถไฟฟ้า และกำหนดพฤติกรรม (Behaviors) เพื่อให้ผู้โดยสารอพยพผ่านประตูท้ายขบวนรถไฟฟ้าไปยังรางรถไฟฟ้า และอพยพผ่านประตูด้านข้างขบวนรถไฟฟ้าไปยังทางเดินเท้าภายในอุโมงค์ (Service walkway) เพื่ออพยพไปยังอาคารปล่องระบายอากาศ ดังแสดงใน Fig. 3

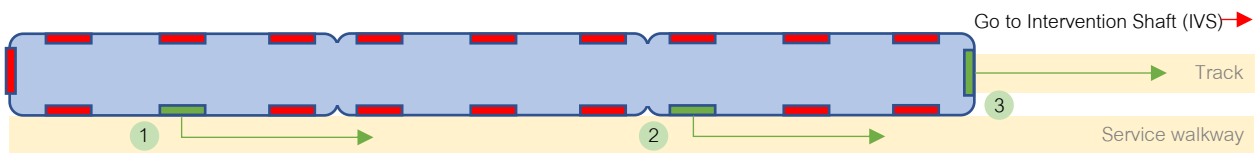


Fig. 3 Evacuation routes model

7. *ประมวลผลข้อมูล* โดยการนำข้อมูลผลลัพธ์ FDS และข้อมูล Plot3D Output ที่ตั้งค่าในโปรแกรม PyroSim (.psm) ร่วมกับผลลัพธ์การเคลื่อนไหวในการจำลองการอพยพของโปรแกรม Pathfinder (.pth) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าก้ำกัชพิษ (FED) ระหว่างการอพยพ ซึ่งได้ผลลัพธ์จำนวนมากออกมาในรูปแบบไฟล์ (.csv)

8. *วิเคราะห์ข้อมูล* โดยอ้างอิงผลลัพธ์จากโปรแกรม PyroSim และ Pathfinder

9. *สรุปงานวิจัย* พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการอพยพภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินอย่างปลอดภัย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

Table 1 Occupants evacuation in the demonstration

Case	Occupants	TO open DDR (seconds)	6 minutes (360 seconds)			100% Evacuated		
			Remaining people (%)			seconds (approximate minutes)		
			Train	Tunnel	IVS	Train	Tunnel	IVS
1. Std. max	1,135	1,626	941 (82.91%)	194 (17.09%)	0 (0%)	1,806 (30)	2,155 (36)	2,240 (37)
2. All-max	991	1,333	791 (79.82%)	200 (20.18%)	0 (0%)	1,497 (25)	1,847 (31)	1,951 (33)
3. All-min	703	815	509 (72.40%)	194 (27.60%)	0 (0%)	982 (16)	1,331 (22)	1,511 (25)
4. Peak-max	799	968	596 (74.59%)	203 (25.41%)	0 (0%)	1,140 (19)	1,490 (25)	1,629 (27)
5. Peak-min	577	700	381 (66.03%)	196 (33.97%)	0 (0%)	836 (14)	1,186 (20)	1,359 (23)

Table 2 Atmospheric value inside a train

Quantities from FSD output	6 minutes (360 seconds)					100% Evacuated (seconds)				
						1,806	1,497	982	1,140	836
	Std. max	All-max	All-min	Peak-max	Peak-min	Std. max	All-max	All-min	Peak-max	Peak-min
FED*	0.007606	0.008454	0.004595	0.004745	0.004578	0.057201	0.03213	0.009385	0.014381	0.005594
CO ₂ (mol/mol)	0.016269	0.017247	0.016942	0.017641	0.017713	0.028227	0.025438	0.015898	0.020203	0.014061
CO (mol/mol)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O ₂ (mol/mol)	0.181781	0.180193	0.180688	0.179553	0.179436	0.16237	0.166897	0.182383	0.175395	0.185364
Temperature (°C)	113.83322	122.418882	108.823537	122.952765	118.861359	23.659595	24.016525	24.185873	24.926829	24.783252
Soot visibility (m)	2.409733	2.313519	2.274322	2.263073	2.230632	1.09949	1.171748	1.922345	1.487038	2.159308

*Maximum value of the last person inside a train cabin

1. จากการจำลองการอพยพด้วยโปรแกรม Pathfinder ทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า มีผู้ที่สามารถอพยพออกจากขบวนรถไฟภายใน 6 นาที ในกรณีที่ 1 2 3 4 และ 5 เท่ากับ 194 200 194 203 และ 196 คน และสามารถอพยพออกจากขบวนรถไฟได้ทุกคนในวินาทีที่ 1,806 1,497 982 1,140 และ 836 ดังแสดงใน Table 1 เมื่อผู้โดยสารออกจากขอบเขตของขบวนรถไฟ สภาพแวดล้อมภายในบริเวณอุโมงค์รถไฟใต้ดินและอาคารปล่องระบายอากาศ (IVS) สามารถเป็นพื้นที่ปลอดภัยได้ เนื่องจากการบริหารจัดการเหตุฉุกเฉิน เจ้าหน้าที่จะดำเนินการเปิดระบบระบายอากาศและแสงสว่างภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน ตามมาตรฐาน NFPA 130 ได้กำหนดว่า “ระยะเวลาในการการอพยพจากชั้นชานชาลาไปยังชั้นถัดไปต้องไม่เกิน 4 นาที และระยะเวลาในการอพยพจากจุดที่ไกลสุดบนชานชาลาไปยังจุดปลอดภัยต้องทำได้ภายในเวลาไม่เกิน 6 นาที” ซึ่งขอบเขตงานวิจัยนี้จะจำลองเฉพาะกรณีที่ได้กล่าวไปแล้วตามลักษณะของพื้นที่จริง โดยไม่ได้จำลองการอพยพภายในชั้นชานชาลา

2. เมื่อนำผลลัพธ์การจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ด้วยโปรแกรม PyroSim ประมวลผลร่วมกับผลลัพธ์การเคลื่อนไหวด้วยโปรแกรม Pathfinder ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน ดังแสดงใน Table 2 พบว่า ค่าก๊าซพิษ (FED) (ต้องมีค่าไม่เกิน 0.3 จึงจะไม่ได้รับอันตราย) ค่า CO (ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการสัมผัส) ค่า CO₂ (ต่ำกว่า 5% ไม่มีพิษต่อร่างกาย แต่กระตุ้นให้อัตราการหายใจเพิ่มขึ้น) และค่า O₂ (มีผลต่อค่า FED_{O₂} เมื่อค่าต่ำกว่า 20.9%) (Hurley et al., 2016) พบว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัย ส่วนค่า soot visibility ยังทำให้ผู้โดยสารสามารถมองเห็นเส้นทางเดินในการอพยพได้ (ไม่เป็นศูนย์) ทั้งนี้ในการคำนวณค่าก๊าซพิษ (FED) ได้รวมถึงการแสดงผลค่า soot visibility และค่าอุณหภูมิด้วย ดังนั้นในนาทีที่ 6 ผู้โดยสารอาจได้รับอันตรายจากการสัมผัสความร้อนที่ค่าสูงมากถึง 100°C ซึ่งผู้โดยสารคนสุดท้ายจะสัมผัสอุณหภูมิห้องโดยสารที่ประมาณ 24°C ก่อนออกจากบริเวณห้องโดยสารผ่านท้ายขบวนรถไฟ โดยอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากเพลิงไหม้ไกลที่สุดและเพลิงไหม้มีอัตราการปล่อยความร้อนลดลง

สรุป

การศึกษาวินิจฉัยนี้ทำการจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้และจำลองการอพยพหนีไฟภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน พบว่า

1) ผู้โดยสารจำนวนมากจะมีผลทำให้พนักงานควบคุมรถไฟผ่านผู้โดยสารเพื่อเปิดประตูท้ายขบวนรถไฟได้ช้าลง โดยในกรณีที่จำนวนผู้โดยสาร 1,135 991 703 799 และ 577 สามารถอพยพออกจากขบวนรถไฟได้อย่างปลอดภัยทุกคนในวินาทีที่ 1,806 1,497 982 1,140 และ 836 เนื่องจากค่าก๊าซพิษ (FED) มีค่าไม่เกิน 0.3 ทำให้ผู้อพยพมีความปลอดภัย

2) เพลิงไหม้ก่อให้เกิดกลุ่มควันจำนวนมากหนึ่ง ซึ่งเกิดการแพร่กระจายไปยังห้องโดยสารอื่นๆ อย่างต่อเนื่อง โดยการเปิดระบบระบายอากาศภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินไปในทิศทางตรงข้ามกับเส้นทางอพยพ จึงทำให้มีโอกาสน้อยที่จะส่งผลกระทบต่อผู้โดยสารขณะอพยพออกสู่ภายนอกขบวนรถไฟฟ้า เช่น ไม่ทำให้สำลักควัน แต่อาจเกิดอันตรายเมื่อผู้โดยสารได้สัมผัสอุณหภูมิสูง

3) ในด้านทางกายภาพได้มีการตัดกระแสไฟฟ้าบนรางรถไฟฟ้า (Third Rail) ก่อนการอพยพผู้โดยสาร พร้อมทั้งเปิดแสงสว่างภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ทำให้สามารถมองเห็นเส้นทางอพยพได้อย่างชัดเจน จึงสามารถเป็นจุดปลอดภัยได้

งานวิจัยครั้งนี้เสนอแนะให้มีการกั้นเขตพื้นที่ด้วยประตูระหว่างรถ (1 ขบวนประกอบด้วยรถ 3 คัน) อาจจะทำให้ผู้โดยสารลดการสัมผัสความร้อนโดยตรงและอาจจะรวมไปถึงการสัมผัสควันที่ซาลงอีกด้วย อีกทั้งในการอพยพผ่านทางเดินเท้าภายในอุโมงค์ (Service walkway) มีความสูงจากระดับราง 1.25 เมตร จึงต้องคำนึงถึงอันตรายที่อาจเกิดจากการตกจากที่สูงด้วย

แบบจำลองดังกล่าวยังไม่รวมถึงความไม่แน่นอนต่างๆ เช่น เพลิงไหม้ขนาดใหญ่ ระยะเวลาการอพยพที่นานขึ้นจากผู้อพยพได้รับบาดเจ็บและหมดสติ มีผู้พิการ สิ่งกีดขวางจากสิ่งของหรือผู้เสียชีวิตหรือการตกจากที่สูง หรือเหตุการณ์ต่างๆ รวมถึงความตื่นตระหนกของผู้โดยสาร การบริหารจัดการเหตุฉุกเฉินและเผชิญเหตุล่าช้า หรืออาจมีการดับไฟโดยใช้ถังดับเพลิง ทั้งนี้การเดินระบบรถไฟฟ้าใต้ดินในปัจจุบันโดยบริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (BEM) ได้มีแผนการบริหารจัดการเหตุฉุกเฉินและมีการเตรียมความพร้อม รวมถึงมีการฝึกซ้อมการอพยพในสถานการณ์ฉุกเฉินเป็นประจำทุกปีร่วมกับเจ้าหน้าที่กู้ภัยจากการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) และหน่วยงานภายนอกอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นประชาชนผู้ใช้บริการจึงมั่นใจได้ว่าการใช้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินมีความปลอดภัยเพียงพอในการให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับวิจัย และให้คำแนะนำต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี และขอขอบคุณ Thunderhead Engineering ผู้พัฒนาโปรแกรม PyroSim และ Pathfinder ได้ผลิตขึ้นเพื่อการจำลองการเกิดเพลิงไหม้และการอพยพหนีไฟสำหรับใช้ในการวิเคราะห์และการประมวลผลข้อมูล อีกทั้งได้อนุเคราะห์ให้ใช้งานโปรแกรมดังกล่าว (ฉบับทดลอง) และให้คำแนะนำต่างๆ งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Mitchell, E.F., Charters, D. 2005. Human behaviour in tunnel fire incidents. *Fire Saf. Sci.* 8: 543–554. doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-543
- International Organization for Standardization. 2002. ISO/TS 13571 Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data. <https://www.sis.se/api/document/preview/902175/>, 5 December 2021.
- Hurley, M.J., Gottuk, D., Hall Jr., J.R., et al. 2016. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th ed. Springer, New York, USA.

Thunderhead Engineering. (n.d.a). Pathfinder. Retrieved from <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>, 28 August 2021.

Thunderhead Engineering. (n.d.b). PyroSim. Retrieved from <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>, 26 August 2021.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. ม.ป.ป.ก. รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล. <https://www.mrt.co.th/th/>, 1 ตุลาคม 2564.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. ม.ป.ป.ช. ระเบียบปฏิบัติงาน เรื่อง การปฏิบัติการสถานีในการอพยพผู้โดยสาร.

ธนา น้อยเรือน, นพคุณ บุญกระพือ, ผนกร อินทร์พยุง. 2558. การประเมินการอพยพของผู้โดยสารกรณีฉุกเฉินที่สถานีรถไฟใต้ดิน. ใน: รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20. มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี. หน้า 1-8

นรินทร์ บุญประเสริฐ. 2559. การเปรียบเทียบเวลาอพยพในอาคารสูงระหว่างวิธี SFPE และ Steering ด้วยโปรแกรม Pathfinder. ใน: รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 430-435.

บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน). 2562. รายงานสรุปผลการดำเนินการโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล ประจำเดือนมกราคม-ธันวาคม 2562.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2562ก. ขนาดรูปร่างคนไทย เล่ม 1 หญิง. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2562ข. ขนาดรูปร่างคนไทย เล่ม 2 ชาย. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์การก่อสร้างอาคาร: กรณีศึกษางานก่อสร้างอาคารในพื้นที่กรุงเทพมหานครในการควบคุมของกรมโยธาธิการและผังเมือง

Carbon footprint assessment of building construction: Case Study of the control of the department of public works and town & country planning in Bangkok area

นิตินัย พระไชยบุญ*, วัชรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ

Nitinai Prachaiboon*, Watcharin Witayakul, Deeboon Methakullachat

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

*Corresponding author. E-mailaddress: Nitinai.p@ku.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากประชากรและเศรษฐกิจเติบโตขึ้นปัญหาทางด้านมลพิษจึงเพิ่มขึ้นจนเป็นปัญหาที่น่ากังวลของทั่วโลก มลพิษทางอากาศที่สำคัญคือก๊าซเรือนกระจกซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การตรวจวัดมลพิษทางอากาศด้วยคาร์บอนฟุตพริ้นท์จึงถูกพัฒนาในการตรวจสอบกิจกรรมในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและใช้เป็นเครื่องมือในการหาแนวทางลดการปล่อยมลพิษทางอากาศโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่จะคำนึงถึงแต่กระบวนการผลิตและกระบวนการบำรุงรักษา ในขณะที่อุตสาหกรรมก่อสร้างมีส่วนทำให้เกิดการใช้พลังงานประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของโลกและเกี่ยวข้องกับก๊าซเรือนกระจกอันดับที่ 3 ของโลก งานวิจัยนี้จะศึกษาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการก่อสร้างอาคาร 10 ชั้นในพื้นที่กรุงเทพมหานครภายใต้การควบคุมของกรมโยธาธิการและผังเมืองตามวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) โดยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในการก่อสร้างอาคารมีค่า 3,245.183 t CO₂e หรือ 371.6 kg CO₂eต่อตารางเมตร

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์, งานก่อสร้าง, อาคารสูง, กรมโยธาธิการและผังเมือง

Abstract

According to effects of increasing population and economy growth, pollution has become a global concern. The main air pollution problem is greenhouse gas. Carbon dioxide is favorite indicator to quantify emission pollutant in products or organization. Previous research studies have focused on operational phase, while the construction industry accounts for about 40% of the world's energy use and is associated with the world's 3rd largest greenhouse gas. This research paper evaluates the carbon emissions during construction for a case study of construction by Department of Public Works and Town & Country Planning in Bangkok, Thailand. Carbon footprint was applied to estimate the carbon emissions. The amount of carbon equivalent was calculated according to the Life Cycle Assessment (LCA) method. The carbon footprint value of the construction was 3,245.183 kg CO₂e or 371.6 kg CO₂e per square meter.

Keywords: carbon footprint, construction, high building, DPT

บทนำ

สังคมทั่วโลกต่างได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอันเนื่องมาจากปัญหาก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases, GHG) ซึ่งมีต้นเหตุมาจากกิจกรรมประจำวัน ความต้องการพื้นฐานและเศรษฐกิจของมนุษย์ (Espinoza et al., 2019) เป็นความท้าทายของวิศวกรที่จะหาทางแก้ไขเพื่อลดผลกระทบที่รุนแรงและร้ายแรงต่อการอยู่รอดของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่ได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศที่รุนแรง เช่น อุทกภัยและภัยแล้ง ซึ่งประเทศไทยมีเป้าหมายในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกถึง 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ในปีพ.ศ. 2573 (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2020) เพื่อให้สอดคล้องกับแผนในการลดก๊าซเรือนกระจกกรมโยธาธิการได้ดำเนินนโยบายสังคมคาร์บอนต่ำ โดยมุ่งสนับสนุนการวิเคราะห์วิธีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุดในการออกแบบและการก่อสร้างอาคารภาครัฐให้เป็นอาคารเขียวอย่างถูกต้องและให้ความสำคัญในกระบวนการก่อสร้าง (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2562)

ในปีพ.ศ. 2559 ประเทศไทยปล่อยก๊าซเรือนกระจก น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของการปล่อยทั่วโลก (ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยโลก) ด้านพลังงานเป็นส่วนสำคัญในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 253,895.61 GgCO₂eq พบว่าการใช้พลังงานอุตสาหกรรมการผลิตและการก่อสร้างมีปริมาณ 49,538.34 GgCO₂eq คิดเป็น 19.53 เปอร์เซ็นต์ (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2020) ในขณะที่ทั่วโลกการใช้พลังงานอุตสาหกรรมการผลิตและการก่อสร้างปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงาน (Wang and Tan, 2012; Kong et al., 2020) ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่พิจารณาแล้วในขั้นตอนการก่อสร้างจึงมีส่วนสำคัญในการช่วยลดก๊าซเรือนกระจก เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการปรับปรุงการตัดสินใจในการเลือกโครงการ นโยบาย และแผนกลยุทธ์สำหรับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสู่เมืองคาร์บอนต่ำต่อไป

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint)

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ใช้เพื่อเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เป็นกระบวนการวัดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการทั้งหมดของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment, LCA) รวมถึงกระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบหรือการก่อสร้าง การดำเนินงาน และการจัดการหลังการใช้งานของของเสียหรือผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุการใช้งาน การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์จะวิเคราะห์ตามรูปแบบของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) 2554 และ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) 2558) คาร์บอนฟุตพริ้นท์สามารถประมาณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากกิจกรรมขององค์กร และยังสามารถระบุสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญ และหาวิธีลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (IPPC, 2006 และ ADB, 2010) อาจใช้เป็นคาร์บอนเครดิตเพื่อกำหนดมาตรฐานการชดเชยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมกับองค์กรอื่นๆ

โดยทั่วไปใช้วิธี LCA สองประเภทในการวัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ มี Cradle-to-Grave (Business to Consumer, B2C) และ Cradle-to-Gate (Business to Business, B2B) (อบก., 2554 และ 2558) B2C มีสี่ขั้นตอน ได้แก่ การผลิตวัสดุ การก่อสร้าง การใช้งานและการบำรุงรักษา และการสิ้นสุดอายุการใช้งาน ในขณะที่ B2B จะพิจารณาเพียง 2 ขั้นตอนแรกเท่านั้น (Kong et al., 2020) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่แบบจำลอง B2B ซึ่งรวมถึงการจัดการวัตถุดิบ การก่อสร้างและการติดตั้งโดยไม่ต้องดำเนินการและกำจัดซาก LCA ของการก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครในการควบคุมของกรมโยธาธิการและผังเมืองแสดงใน Fig. 1

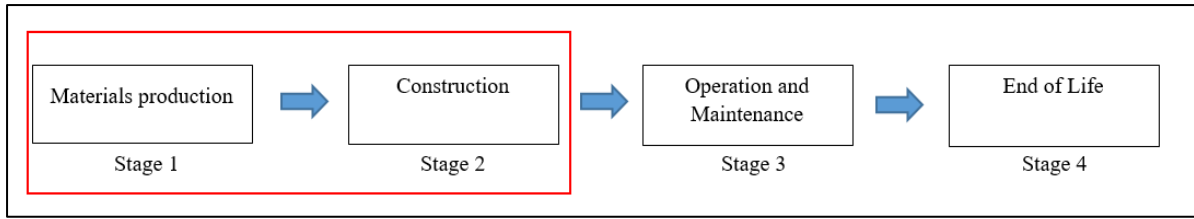


Fig. 1 Stage of Carbon Dioxide Emission of Construction

GHG protocols ได้กำหนดกรอบในการพิจารณาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งส่วนที่สำคัญจะอยู่ที่ในส่วนที่สามเกี่ยวข้องกับการปล่อยมลพิษ เช่น การดำเนินงานโดยบุคคลหรือธุรกิจ วัสดุ เชื้อเพลิง กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งในยานพาหนะ กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้า และการกำจัดของเสีย [5, 8, 9] การประเมินนี้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล เช่น วงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ISO14040 ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ 2050:2011 และแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในประเทศไทยโดยองค์กร หลังจากทบทวนวรรณกรรมรายการรวบรวมข้อมูลสำหรับการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการก่อสร้างได้แสดงไว้ใน Table 1

Table 1 Data Sources for Carbon Footprint Analysis of Construction

Items	Sources
Materials of construction	Bill of quantities
	Construction drawing
	Method statement of construction
	Thai national database by TGO and IPCC
Water consumption	Site construction
Electric power use	Site construction
Transportation distance	Site construction and map
Emission Factor	Thai national database by TGO
	IPCC

สำหรับการศึกษานี้จะดำเนินการประเมินแบบ Cradle-to-Gate ซึ่งจะประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอาคารและแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมือง ส่วนสมการโดยทั่วไปที่ใช้ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในขั้นตอนการก่อสร้าง IPCC ได้นำเสนอให้ใช้ในการวิเคราะห์ดัง Equation 1 (อบก., 2554 และ ADB, 2010)

$$E = \sum_a (AD_a \times EF_a) \quad (1)$$

โดยที่ E คือ การปล่อยก๊าซ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าหรือ kg CO₂e), AD_a คือ ข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (หน่วยการใช้), EF_a คือค่าการปล่อย (kg CO₂e ต่อหน่วยการใช้) และ a คือกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการก่อสร้างจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ วัสดุก่อสร้าง เครื่องมือ เครื่องจักรและการขนส่ง (Alzard et al., 2019) สามารถแบ่ง การใช้วัสดุ (E_m), ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (E_p), การใช้น้ำ (E_w) และการใช้เชื้อเพลิงของอุปกรณ์ (E_e) และการใช้เชื้อเพลิงของการขนส่ง (E_t) ระหว่างการก่อสร้าง โดยแสดงใน Equation 2 ถึง 6 ตามลำดับ

$$E_m = [Quantity(m^3) \times Density(\frac{kg\ material}{m^3})] \times EF(\frac{kgCO_2e}{kg\ material}) \quad (2)$$

$$E_e = [FCR(\frac{L\ fuel}{Eq.h}) \times Quantity(Eq) \times Duration(h)] \times EF(\frac{kgCO_2e}{kg\ L\ fuel}) \quad (3)$$

$$E_t = [Mass(kg\ transported) \times Distance(km)] \times EF(\frac{kgCO_2e}{kg\ transported.km}) \quad (4)$$

$$E_p = Electricity\ consumption(kWh) \times EF(\frac{kgCO_2}{kWh}) \quad (5)$$

$$E_w = Water\ consumption(m^3) \times EF(\frac{kgCO_2}{m^3}) \quad (6)$$

พื้นที่ศึกษา

ในการดำเนินในการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการก่อสร้างโครงการก่อสร้างอาคารศูนย์นวัตกรรมเฉลิมพระเกียรติ ตั้งอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน เลขที่ 833 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน จังหวัด กรุงเทพมหานคร ควบคุมการก่อสร้างโดย บริษัท พี.เอส.เจ.เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ภายใต้การดูแลของกรมโยธาธิการและผังเมือง ลักษณะอาคารสูง 10 ชั้น จำนวน 1 หลัง มีพื้นที่ใช้สอย 8,733 ตารางเมตร ดังแสดงใน Fig. 2

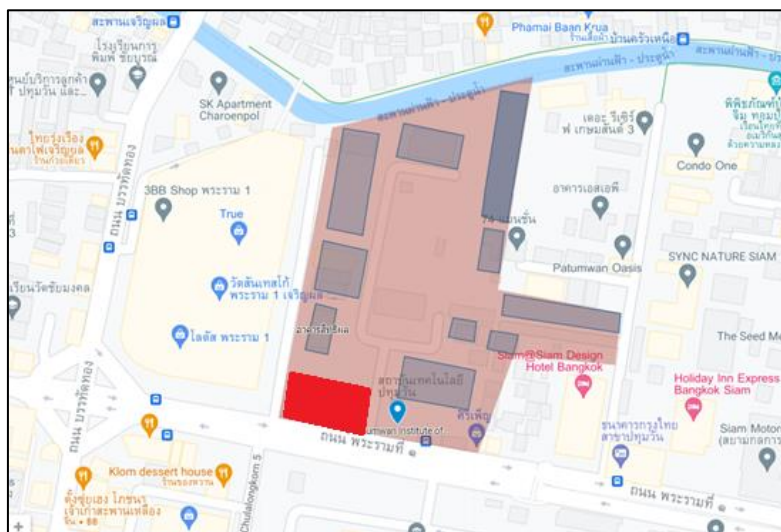


Fig. 2 Study area

เนื่องจากสถานการณ์โควิด 19 ระยะเวลาในการก่อสร้างระยะเวลาในการก่อสร้าง 840 วัน เริ่มตั้งแต่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2562 ถึง 5 ตุลาคม พ.ศ. 2564 มีกิจกรรมที่สำคัญในการดำเนินการก่อสร้างอาคาร งานโครงสร้างอาคาร, งานสถาปัตยกรรม, งานระบบสุขาภิบาล, งานระบบไฟฟ้า, งานระบบปรับอากาศและระบายอากาศ, งานผังบริเวณและงานพิเศษตามข้อกำหนด ประกอบด้วย งานสนามหญ้าและระบบป้องกันดินพังถล่มเก็บน้ำใต้ดินและบ่อเกรอะ สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการก่อสร้างโครงการก่อสร้างอาคารศูนย์นวัตกรรมเฉลิมพระเกียรติในส่วนของงานด้านโยธาเท่านั้น

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการก่อสร้างอาคารสูง 10 ชั้นโดยการควบคุมของกรมโยธาธิการและผังเมืองในขั้นตอนในการก่อสร้างมีค่า 3,245.183 t CO₂e ซึ่งคิดเป็น 50 ปี โดยสัดส่วนของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งตามการก่อสร้างดังแสดงในFigure 3 โดยคอนกรีตและกลุ่มเหล็กเป็นธุรกิจการค้าที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดในช่วงระยะเวลาการก่อสร้าง ซึ่งคิดเป็น 37.81 เปอร์เซ็นต์ และ 17.92 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การขนส่งเป็นการค้าการปล่อยมลพิษอยู่ในลำดับที่ 3 ในระยะก่อสร้าง ซึ่งคิดเป็น 16.79 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไฟฟ้ารวมทั้งสำนักงาน การใช้น้ำ และอุปกรณ์เป็นปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพียงเล็กน้อย (13.10 เปอร์เซ็นต์)

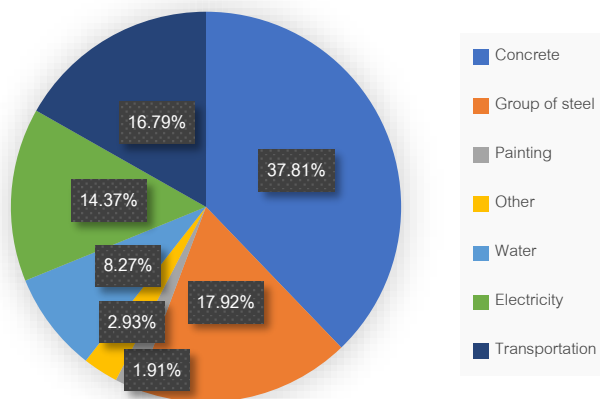


Fig. 3 Proportion of greenhouse gas emissions from construction building of DPT

เนื่องจากอาคารแต่ละอาคารมีขนาดและความสูงไม่เท่ากัน หากต้องการที่จะเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเนื่องจากการก่อสร้างจึงต้องเปรียบเทียบกันในรูปแบบของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อพื้นที่ที่ใช้สอย จากผลการศึกษากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ผ่านมาที่แสดงในTable 2 พบว่า มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกประมาณ 18.22 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เปรียบเทียบกับอาคารที่ก่อสร้างในไทย พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย

Table 2 Embodied carbon emissions of various educational buildings (Shams et. al., 2003; Pons and Wadel, 2011; Kanga et. al., 2015; Kumanayake and Loa, 2018; Limphitakphong et. al., 2018; Wiik et. al., 2018)

No.	Year	Location	Structure Type	No. of Floor	ECI (kgCO ₂ e/m ²)
1	2003	Michigan/USA	Reinforced Concrete	6	554.79
2	2011	Catalonia/Spain	Reinforced Concrete	1	616.67
3	2015	Suwon/Korea ^a	Reinforced Concrete	-	419.74
4	2018	Ratmalana/Sri Lanka	Reinforced Concrete	7	490.93
5	2018	Norway ^b	Reinforced Concrete	2	384.60
6	2018	Bangkok/Thailand ^c	Reinforced Concrete	-	342.47
7	2021	Bangkok/Thailand	Reinforced Concrete	10	371.60

^a Data of 7 educational buildings on average in Suwon city, Korea.

^b Demonstration of 9 zero emission building (ZEB) case studies in Norway (1 building in Sandvika, 1 building in Larvik, 2 buildings in Bergen, 1 building in Arendal, 3 buildings in Trondheim and 1 building in Evenstad).

^c Data of 3 educational buildings on average in Bangkok, Thailand.

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยหลายชิ้นได้ศึกษาการออกแบบการก่อสร้างอาคารคาร์บอนต่ำ การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการสร้างอาคารสูงด้วยแบบจำลอง B2B ในการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องมาจากการก่อสร้างในส่วนของงานด้านโยธา ซึ่งจะมองขั้นตอนการก่อสร้างเป็นกระบวนการในการผลิต ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นคืออาคาร ในขั้นตอนการก่อสร้างของการศึกษานี้พบว่าปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นมีค่า 3,245.183 t CO₂e เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของอาคารที่ 50 ปี อาคารที่ดำเนินการก่อสร้างนี้จะปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ 64.903 t CO₂e/ปี

ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจะไม่สามารถเก็บรวบรวมได้โดยตรง ได้แก่ ไฟฟ้า ของเสียจากการก่อสร้าง ระยะเวลา น้ำหนักบรรทุกของการขนส่งเครื่องมือ อุปกรณ์ไฟฟ้า และเครื่องจักร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอ้างอิงเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อกำหนด แผนการก่อสร้างโครงการ เอกสารอนุมัติการซื้อ และรายงานการวิจัย หากมีการดำเนินการวางแผนในการจัดเก็บข้อมูลที่ดีเพื่อศึกษาการปล่อยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในการก่อสร้างแล้ว จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อเลือกใช้วัสดุและขั้นตอนการก่อสร้างในการลดผลกระทบต่อก๊าซเรือนกระจกในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณกรมโยธาธิการและผังเมือง และบริษัท พี.เอส.เจ.เอ็น.เตอร์ไพรส์ จำกัดที่ให้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2562. คู่มือการออกแบบปรับปรุงอาคารภาครัฐที่มีอยู่เดิมให้เป็นอาคารเขียวภาครัฐ, กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.). 2554. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น, โครงการส่งเสริมการจัดทำฟุตพริ้นท์ขององค์กร, องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.). 2558. คู่มือการจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรรายสาขาอุตสาหกรรม, องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก.
- Asian Development Bank (ADB). 2010. Methodology for estimating carbon footprint of road projects case study: India. Asian Development Bank.
- Espinoza, M., Campo, N., Yang, R., Ozer, H., Aguiar Moya, J.P., Baldi, A., Loria-Salazar, L.G., AlQadi, I.L. 2019. Carbon footprint estimation in road construction: La abundancia florenca case study. Sustainability 11: 2276. doi.org/10.3390/su11082276
- Kong, A., Kang, H., He, S., Li, N., Wang, W. 2020. Study on the carbon emissions in the whole construction process of prefabri-cated floor slab. Appl. Sci.10: 2326. doi.org/10.3390/app10072326
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. 2020. Thailand third Biennial Updated Report (BUR), Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Thailand.
- Wang, C., Tan, X. 2012. Estimating carbon footprint in the construction process of a green educational building. In: 2012 International Conference on Construction and Real Estate Management. Kansas, USA, pp. 175–179.

- Scheuer, C., Keoleian, G. Reppe, P. 2003. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: Modeling challenges and design implications. *Energy Build.* 35: 1049–1064.
- Pons, O., Wadel, G. 2011. Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia. *Habitat Int.* 35: 553–563.
- Limphitakphong, N., Thaipradit, P., Kanchanapiya, P., Tantisattayakul, T., Chavalparit, O. 2020. Embodied carbon emission of construction materials: A case study of building in Thailand. *Int. J. GEOMATE* 18: 187–193.
- Kanga, G., Kim, T., Kim, Y.W., Cho, H., Kang, K.I. 2015. Statistical analysis of embodied carbon emission for building construction. *Energy Build.* 105: 326–333.
- Kumanayake, R., Lao, H. 2018. A tool for assessing life cycle CO₂ emissions of buildings in Sri Lanka. *Build Environ.* 128: 272–286.
- Wiik, M.K., Fufa, S.M., Kristjansdottir, T., Andresen, I. 2018. Lessons learnt from embodied GHG emission calculations in zero emission buildings (ZEBs) from the Norwegian ZEB research centre. *Energy Build.* 165: 25–34.

การศึกษาการใช้เถ้าใยปาล์มน้ำมันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์สำหรับวัสดุงานทาง

A study on the use of palm oil fiber ash to improving properties of soil cement as highway materials

ผศ.ดร.ตรีณรงค์มาลี, ก่อโชค จันทวารางกูร*, วีระเกษตร สวนพกา

Trin Srinangkamalee, Korchoke Chantawarangul*, Weerakaset Suanpaga

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: fengkcc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าใยปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งในปัจจุบันมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปริมาณและอัตราส่วนการใช้เถ้าใยปาล์มน้ำมันต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์สำหรับวัสดุงานทาง ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 50 และร้อยละ 100 โดยทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเพื่อจำแนกลักษณะของดิน การทดสอบความหนาแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน และทำการบ่มที่ระยะเวลา 1 วัน และ 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว ผลการศึกษาพบว่าเถ้าใยปาล์มน้ำมันสามารถใช้เป็นวัสดุในการผสมดินซีเมนต์ได้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และผ่านมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท

คำสำคัญ: กำลังอัดแกนเดียว, ดินซีเมนต์, เถ้าใยปาล์มน้ำมัน

Abstract

The purpose of this study was to investigate the potential use of Palm oil fiber ash, which are waste material form palm oil production process that increasingly cause environment problem. The palm oil fiber ash was used in the improvement of soil cement in highway construction works according to Department of Rural Roads Standards. The Portland cement was substituted by Palm oil fiber ash at 50 percent and 100 percent. The study of the soil properties comprises of Soil Classification test, Modified Compaction test and Unconfined Compression test. The sample was cured for 1 day and 7 days before each test. The experimental results show that Palm oil fiber ash can be used as a material for soil-cement mixing at an appropriate ratio that meets the standards of soil- cement base of the Department of Rural Roads Standards.

Keywords: palm oil fiber ash, soil-cement, unconfined compression test

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการคมนาคมขนส่งในระยะยาวจำนวนหลายโครงการ โดยเฉพาะการพัฒนาโครงข่ายถนน ในการก่อสร้างถนนนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐาน เพื่อให้ถนนสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางมักเป็นหินคลุกหรือดินลูกรังจากแหล่งวัสดุที่ผ่านมาตรฐานในบริเวณใกล้เคียง แต่โครงการก่อสร้างที่ไม่มีแหล่งวัสดุที่ผ่านมาตรฐานในบริเวณใกล้เคียง วิศวกรจะใช้วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติแก่วัสดุด้วยคุณภาพในพื้นที่ เช่น การผสมซีเมนต์ ปูนขาวหรือเถ้าลอย โดยวิธีที่นิยมใช้คือ การใช้ดินซีเมนต์ (Soil Cement Material) เพื่อใช้ก่อสร้างในชั้นพื้นทาง (Base) วัสดุที่ใช้คือ ดินผสมกับซีเมนต์ แต่การใช้ปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 850 กิโลกรัมต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน (การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย, 2562) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน และในปัจจุบันมีโครงการก่อสร้างทางบริเวณภาคใต้ของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งมีหลายโครงการในพื้นที่ใกล้เคียงไม่มีแหล่งวัสดุที่ผ่านมาตรฐาน ถ้าไม่ใช้วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุก็ต้องใช้แหล่งวัสดุที่ผ่านมาตรฐานซึ่งอยู่ไกลออกไป ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้งบประมาณในการก่อสร้างที่มากขึ้นด้วย

ในปี พ.ศ. 2563 ภาคใต้เป็นภาคที่ปลูกปาล์มมากที่สุดในประเทศ จำนวน 5 ล้านไร่ จากการปลูกปาล์มทั้งประเทศ 6 ล้านไร่ และปาล์มในภาคใต้ให้ผลผลิตปาล์มมากถึง 14 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) โดยผลผลิต ที่ได้จะใช้เพื่ออุปโภคและบริโภคในประเทศไทยเกือบทั้งหมด สิ่งที่ได้จากต้นปาล์ม คือทะลายปาล์มเพื่อใช้ในการสกัดน้ำมันปาล์ม หลังจากการสกัดน้ำมันปาล์มจะเกิดของเหลือจากกระบวนการผลิต คือ ทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม เส้นใยปาล์ม โดยที่เส้นใยปาล์มสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการกลั่นน้ำมันปาล์ม หลังจากเผาไหม้แล้วจะได้ของเสียที่เรียกว่า เถ้าใยปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีลักษณะเป็นซีเมนต์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบเพียงอย่างเดียว ซึ่งในอนาคตถ้ามีเถ้าใยปาล์มน้ำมันเพิ่มมากขึ้นทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งพื้นที่ในการฝังกลบ และมลพิษทางอากาศ

จากปัญหาที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าใยปาล์มซึ่งเป็นของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งขั้นตอนในการผลิต การขนส่ง การนำมาใช้ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดเถ้าใยปาล์มน้ำมันซึ่งกำจัดโดยการฝังกลบเพียงอย่างเดียว โดยผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้เถ้าใยปาล์มเป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์สำหรับงานทาง เพื่อทำการเปรียบเทียบกำลังและต้นทุนการก่อสร้างอันจะนำไปสู่การออกแบบวัสดุผิวทางที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีเถ้าใยปาล์มน้ำมัน พบว่ามี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับเถ้าแกลบ แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า (แช่ตั้ง, 2547) SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (ตั้งจิรภัทร, 2547) เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดการรวมตัวของของแคลเซียมออกไซด์กับน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนไปทำปฏิกิริยาเกิดสารเชื่อมประสานขึ้น (นิคม, 2553) และเมื่อนำเถ้าใยปาล์มน้ำมันมาบดให้ละเอียดก็จะเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีเมื่อเทียบกับก่อนบดและให้กำลังอัดที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบ ทางเคมียังจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตาม ASTM C618 สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตได้ (เจริญสุข, 2563) และเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีกับเถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพารา และเถ้าลอย ตามตารางที่ 1 พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 เหมือนกัน (ตะแตะสาเมาะ, 2555)

Table 1 Comparing Chemical Composition of Rice Husk Ash, Palm oil fiber Ash, Para rubber wood Ash and Fly Ash (แช่ตั้ง, 2547; สกุลเวช, 2564)

chemical composition (percent)	Rice Husk	Palm oil fiber ash		Para rubber	Fly Ash
	Ash	Chumphon	Krabi	wood ash	
Silicon dioxide (SiO ₂)	91.6	67.7	66.3	2.57	42.5
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	0.4	4.5	2.5	0.53	22.51
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.6	3.3	1.9	0.56	9.02
Sum	92.6	75.5	70.7	3.66	74.03
Sulfer Oxide (SO ₃)	2.2	0.2	0.4	5.54	1.51

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ใ้ไ้ปาล์มน้ำมัน จากโรงงานสมอทอง น้ำมันปาล์ม จังหวัดกระบี่
2. ดินลูกรัง จากบ่อดินลูกรัง เพชรกลาง จังหวัดพังงา
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 - 2547
4. น้ำสะอาด การศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปา

วิธีการศึกษา

การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ด้วยใ้ปาล์มน้ำมันสำหรับใ้ในงานก่อสร้างทาง เป็นการศึกษาโดยนำดินตัวอย่าง, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ใ้ปาล์มน้ำมัน และน้ำมาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (unconfined compressive strength) ขั้นตอนแรกคือการทดสอบหาขนาดเม็ดของดินตัวอย่าง (sieve analysis) และนำใ้ปาล์มน้ำมันมาทำการบดและคัดแยกสิ่งเจือปนด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำไปอบให้แห้ง จากนั้นทำการผสมวัสดุตามอัตราส่วนแล้วนำตัวอย่างที่ผสมกันมาบดอัดโดยวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified compaction test) โดยใช้ปริมาณน้ำที่มีความชื้นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างโดยการจำแนกประเภทของวัสดุประสาน 2% และ 4% โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใ้ปาล์มน้ำมันที่ 0%, 50% และ 100% ของวัสดุประสาน ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1 วัน และ 7 วัน (3 ตัวอย่าง: 1 อัตราส่วน) รวม 39 ตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดี่ยวของแต่ละอัตราส่วน จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย UCS และอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษา

Table 2 Weight ratio and 7 sets of samples used for research with 39 samples in total

No.	Lateritic soil: cement: palm oil fiber ash (Percent by weight of soil)	Number of samples at 1 day curing period	Number of samples at 7 day curing period
1	100: 0: 0	0	3
2	100: 2: 0	3	3
3	100: 1: 1	3	3
4	100: 0: 2	3	3
5	100: 4: 0	3	3
6	100: 2: 2	3	3
7	100: 0: 4	3	3



Fig. 1 Palm oil fiber ash and modified compaction test

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (sieve analysis) ดินลูกรังมีการกระจายตัวที่ดี อยู่ในกลุ่มประเภท GW ตามการจำแนกประเภทของดินโดยวิธี USCS มีค่าขีดเหลว (Liquid Limit L.L) ร้อยละ 29.14 และมีค่าขีดพลาสติก (Plastic Index P.I.) ร้อยละ 9.41

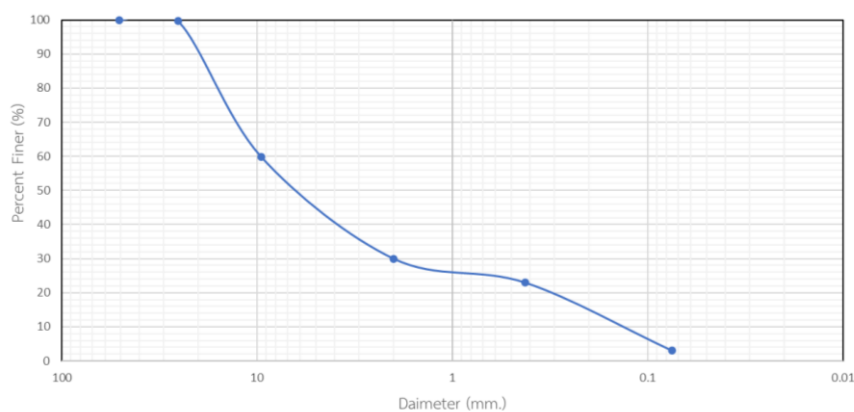


Fig. 2 Grain size distribution curve

ผลการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (optimum moisture content) ของดินลูกรัง ตามตารางที่ 3 เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะนำไปใช้ในการผสมก้อนตัวอย่างเพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด แล้วนำไปทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (unconfined compression test) ต่อไป

Table 3 Optimum Moisture Content (%) and Maximum Dry Density (t/m^3) of Soil Cement Mix Palm oil Fiber Ash

No.	soil: cement: palm oil fiber ash (Percent by weight of soil)	Optimum Water Content (%)	Maximum Dry Density (t/m^3)
1	100: 0: 0	8.20	2.066
2	100: 2: 0	8.62	2.122
3	100: 1: 1	8.83	2.092
4	100: 0: 2	8.92	2.082
5	100: 4: 0	9.24	2.185
6	100: 2: 2	9.45	2.142
7	100: 0: 4	9.52	2.115

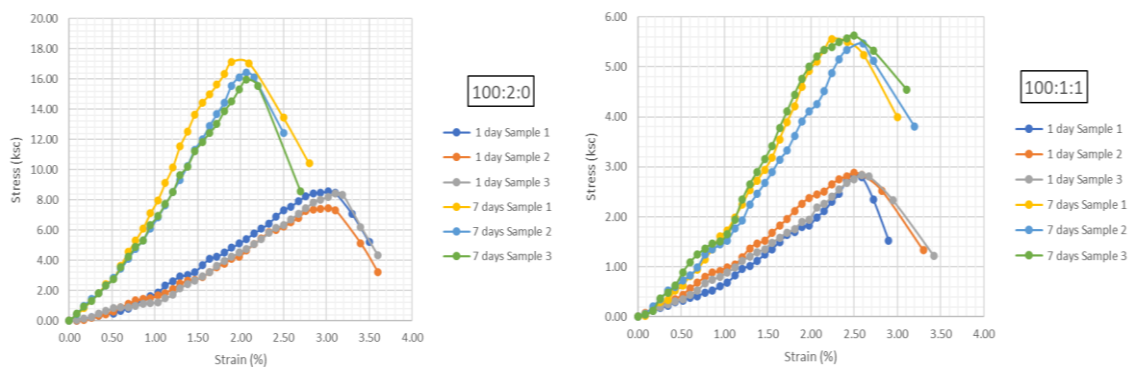


Fig. 3 Graph showing the relationship between stress (ksc) and strain (%) at the material mix ratio 100:2:0 and 100:1:1(Lateritic soil: cement: palm oil fiber ash) at curing period 1 day and 7 days

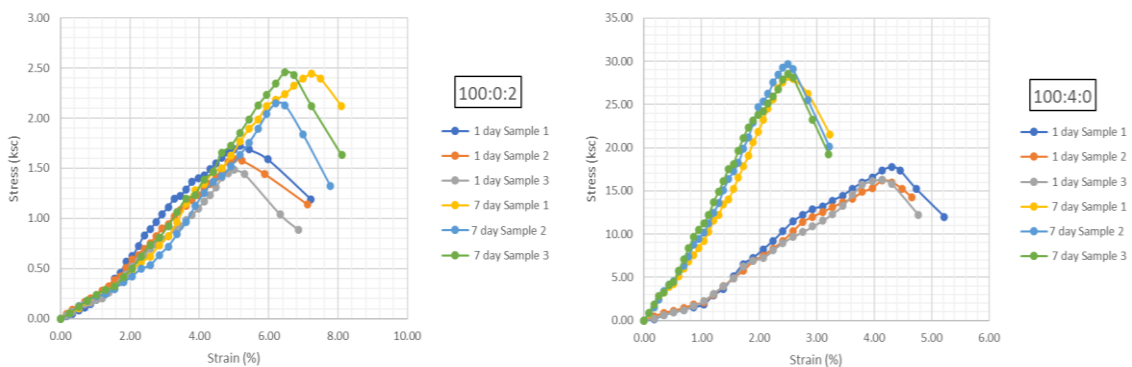


Fig. 4 Graph showing the relationship between stress (ksc) and strain (%) at the material mix ratio 100:0:2 and 100:4:0 (Lateritic soil: cement: palm oil fiber ash) at curing period 1 day and 7 days

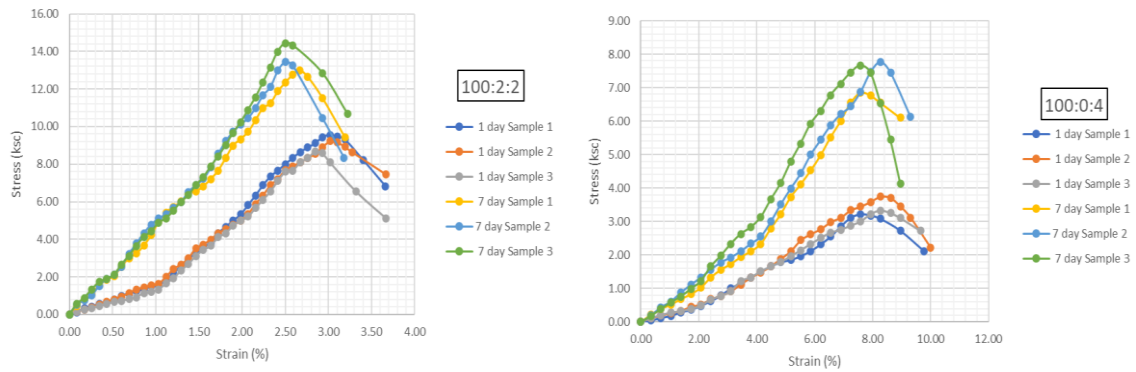


Fig. 5 Graph showing the relationship between stress (ksc) and strain (%) at the material mix ratio 100:2:2 and 100:0:4 (Lateritic soil: cement: palm oil fiber ash) at curing period 1 day and 7 days

จากรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 5 เป็นผลการทดสอบหาค่า UCS ที่อัตราส่วน 100:2:0, 100:1:1, 100:0:2, 100:4:0, 100:2:2, 100:0:4 (ดิน:ปูนซีเมนต์:เถ้าไผ่ปาล์ม) ตามลำดับ เปรียบเทียบที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน จำนวน 3 ตัวอย่าง กับระยะเวลาการบ่ม 7 วัน จำนวน 3 ตัวอย่าง พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไผ่ปาล์มที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 1 วัน เป็น 7 วัน อัตราส่วน 100:0:0 ไม่สามารถแสดงกราฟได้เนื่องจากเนื่องจากตัวอย่างเกิดการบวมตัวระหว่างแช่น้ำ

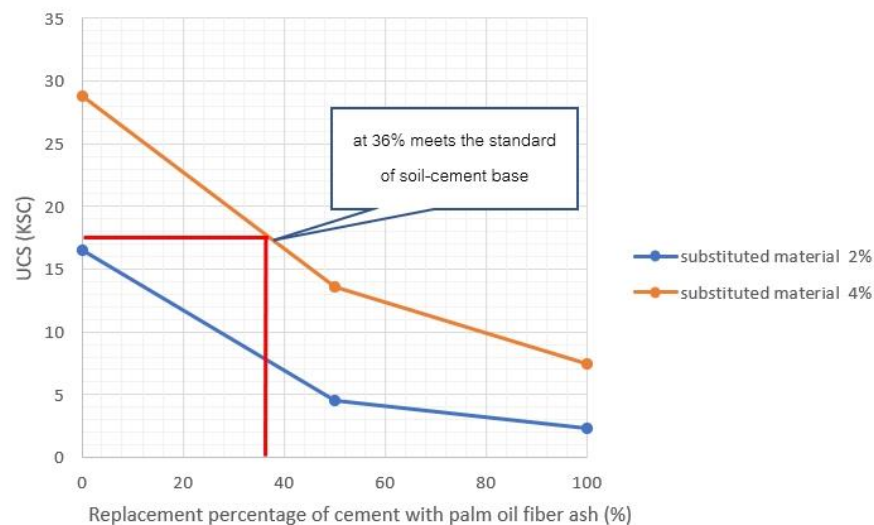


Fig. 6 Graph showing the relationship between ucs (ksc) and volume of replacing cement with palm oil fiber ash (%) at curing period 7 day

ผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ตามมาตรฐานทางหลวงชนบท มทข.(ท) 303-2545 เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน กราฟเส้นตรงที่วัสดุประสาน 4% ดังรูปที่ 6 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันที่ 0 - 36% หรือที่อัตราส่วน 100:2.56:1.44 (ดิน:ปูนซีเมนต์:เถ้าไผ่ปาล์ม) มีค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ที่ 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของกรมทางหลวงชนบท ตาม มทข.244-2556

Table 4 Compare the construction cost of the standardized samples

Mixer ratio (lateritic soil: cement: palm oil fiber ash)	100:04:00	100:03:00	100:2.56:1.44	
Lateritic soil	156.45	156.45	156.45	Baht/soil 1m. ³
Cement	258.40	193.80	109.82	Baht/soil 1m. ³
Mixer install cost	6.41	6.41	6.41	Baht/soil 1m. ³
Operating cost + depreciation (mix material)	44.91	44.91	44.91	Baht/soil 1m. ³
Operating cost + depreciation (compaction material)	56.20	56.20	56.20	Baht/soil 1m. ³
Operating cost + depreciation (curing material)	44.98	44.98	44.98	Baht/soil 1m. ³
Transport cost of palm oil fiber ash (50 km.)			1.64*	Baht/soil 1m. ³
Operating cost + depreciation (dig oil palm fiber ash)			0.24*	Baht/soil 1m. ³
Cost (total cost)	567.35	502.75	420.65	Baht/soil 1m. ³

*cost of mixing palm oil fiber ash 0.011 m³ per lateritic soil 1 m³ in the material mix ratio of 100:2.56:1.44

(lateritic soil: cement: palm oil fiber ash) percent by weight of lateritic soil

จากข้อมูลในตารางแสดงต้นทุนค่าก่อสร้างดินซีเมนต์เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมัน จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมันที่อัตราส่วน 100: 2.56: 1.14 (ดิน: ปูนซีเมนต์: เถ้าไพล่าลมน้ำมัน) จะช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างได้ถึง 146 บาท/ลบ.ม. และ 82 บาท/ลบ.ม. เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 100: 4 :0 และ 100: 3: 0 ตามลำดับ

สรุป

จากการนำเถ้าไพล่าลมน้ำมันมาใช้ในการปรับปรุงดินซีเมนต์ โดยการนำมาทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินพบว่าตัวอย่างดินลูกรังมีขนาดคละที่ดี จัดอยู่ในกลุ่มประเภท GW ตามการจำแนกประเภทของดินโดยวิธี UCSC มีค่าขีดเหลว (Liquid Limit L.L.) ร้อยละ 29.4 และมีค่าขีดพลาสติก (Plastic Index P.I.) ร้อยละ 9.41 ผ่านมาตรฐานวัสดุสำหรับพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท และเมื่อนำดินซีเมนต์ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมัน มาทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression test) พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าไพล่าลมน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไพล่าลมน้ำมันที่ 0-36% ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน พบว่ามีค่ากำลังอัดแกนเดียวมากกว่า 17.50 ksc. โดยประมาณ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนค่าก่อสร้างชั้นพื้นทางระหว่างดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมันที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไพล่าลมน้ำมันในปริมาณที่ 36% ช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างได้

เปรียบเทียบผลการทดลองงานวิจัยการศึกษา กำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมัน สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ร้อยละ 20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน (วีรชาติ ตั้งจิรภัทร. 2547) และงานวิจัยคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ร้อยละ 70 ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน (เทพฤทธิ์ เจริญสุข. 2563) และจากการทดลองในครั้งนี้ใช้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมัน สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ที่ร้อยละ 36 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน โดยใช้เป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทาง

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. ควรมีการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายปาล์มน้ำมันจากโรงงานอื่น เพราะค่าใช้จ่ายปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นอาจมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน
2. ในอนาคตหากมีการใช้ประโยชน์ค่าใช้จ่ายปาล์มน้ำมันได้มากขึ้นอาจส่งผลให้ค่าใช้จ่ายปาล์มน้ำมันมีมูลค่าในการซื้อขาย ทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างสูงขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยกรให้คำแนะนำจาก รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร และการสนับสนุนจากบุคลากรสำนักก่อสร้างทาง กรมทางหลวงชนบท แขวงทางหลวงชนบทจังหวัดพังงา สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 14 ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- การรถไฟฯ ขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยและสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. 2562. Green Concrete. <https://km.mrta.co.th/files/blog/attachment//18f8edf8487e6516d574a7751022ea71.pdf>, 10 ตุลาคม 2564.
- ติเมห์ สุกุลเวช. 2564. การศึกษาการใช้ถ่านไม้ยางพาราเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์สำหรับวัสดุงานทาง การศึกษา ค้นคว้าอิสระ ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- เทพฤทธิ เจริญสุข, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2563. คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมถ่านปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในปริมาณสูง ในรายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
- ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง. 2547. การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมถ่านปาล์มน้ำมัน วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
- วีระชาติ ตั้งจิรภัทร. 2547. การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมถ่านปาล์มน้ำมัน. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัย และพัฒนา 15: 32-39
- สุวัฒนา นิคม, 2553. คุณลักษณะของยิปซัมเพสต์โดยใช้ยิปซัมเทียมถ่านปาล์มและดินขาวแปร วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2563. <https://www.oae.go.th/view>, 15 ตุลาคม 2564
- อาบีดิน ดะแซะสาเมาะ. 2555. การเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานของปูนซีเมนต์ผสมถ่านไม้ยางพาราด้วยวิธีการทางเคมี. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเดือยเสริมในรูกลวงของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบแรงเหวี่ยง

A study of tensile behavior of dowel reinforcement in hollow holes of pretensioned spun high-strength concrete pile

ชำนาน น้อยพิทักษ์^{a,*}, สอนทยา ทองอรุณศรี^b, วันดี พูนพจน์มาศ^a

Chumnahn Noipitak^{a,*}, Sontaya Tongaroonsri^b, Wandee Poonpotmas^a

^aสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาทรร กรุงเทพฯ 10120

^bสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก เมือง ตาก 63000

^aCivil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon, Bangkok 10120, Thailand

^bCivil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: nahn_n@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเดือยร่วมกับคอนกรีตที่กรอกในรูกลวงของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบแรงเหวี่ยง (PHCP) โดยการใช้เสาเข็ม PHCP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 40 เซนติเมตร และใช้เหล็กเดือย 4-DB12 SD40 ที่ระยะฝัง 50 100 และ 150 ซม. คอนกรีตที่ใช้กรอกมีกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 255 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบพบว่าทุกตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในเหล็กเดือย การเสริมเหล็กเดือยให้มีระยะฝังตามที่คำนวณได้จากสมการคำนวณระยะฝังสำหรับเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงตามมาตรฐาน ACI 318-08 รวมถึงการใช้ระยะฝังมากกว่า 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม จะทำให้การวิบัติเกิดจากกำลังดึงประลัยของเหล็กเดือย โดยไม่เกิดการเลื่อนไถลของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตที่กรอกและคอนกรีตเสาเข็ม

คำสำคัญ: ระยะฝัง, เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบแรงเหวี่ยง, เหล็กเดือย, หน่วยแรงยึดเหนี่ยว

Abstract

The research aims to study the tensile behavior of dowel together with infilled concrete in the hollow holes of pretensioned spun high-strength concrete pile (PHCP). The PHCP piles with outer diameter 40 cm and 4-DB12 SD40 at embedded length of 50, 100 and 150 cm were used. The infilled concrete used to have an average compressive strength of 28 days, equal to 255 kg/sq.cm. Test results showed that all of the tested samples were fail, due to the tensile force in the dowel bar. The development length of dowel bar can be calculated from the tension development length formulas according to ACI 3318-08. This included the use of embedded length more than 2.5 times of the outside diameter of the piles. As a result, the causes fail caused by the tensile in the dowel bar without bond slip of the contact surface between the infilled concrete and the pile concrete.

Keywords: Bound stress, Development length, Dowel bar, Pretensioned spun high-strength concrete pile

คำนำ

อาคารขนาดใหญ่หรือสิ่งก่อสร้างที่มีน้ำหนักเกินความสามารถรับน้ำหนักของ ชั้นผิวดิน จะทำให้เกิดปัญหา การทรุดตัวของอาคาร และการแก้ปัญหาดังกล่าวนิยมใช้เสาเข็มทำหน้าที่ย้ายน้ำหนักของอาคารลงสู่ดิน โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มกับดิน และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มบนชั้นดินแข็งช่วยรับน้ำหนัก เสาเข็มถูกพัฒนาและปรับเปลี่ยนรูปแบบมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพปัญหาหรือสภาพของลักษณะชั้นดินที่จะถูกนำไปใช้งาน ปัจจุบันเสาเข็มที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ได้แก่ เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงหล่อสำเร็จ (Precast prestressed concrete piles (PPCP)) เนื่องจากมีความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์และสามารถผลิตได้จำนวนมากในระยะเวลาอันรวดเร็ว สามารถควบคุมคุณภาพได้ดีกว่าเสาเข็มชนิดหล่อในที่ เนื่องจากเป็นการผลิตในโรงงาน อีกทั้งการใช้ระบบอัดแรงยังช่วยลดปัญหาการแตกร้าวในคอนกรีตและช่วยเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด ที่เกิดจากการยก การขนส่งและโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงดันข้าง Ren et al., 2021; Saman et al., 2021) นอกจากนี้ ปัจจุบันยังนิยมใช้เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบแรงเหวี่ยง (Pretensioned spun high-strength concrete pile, PHCP) หรือเสาเข็มสปัน (Spun pile) เป็นอย่างมาก เนื่องจากเสาเข็ม PHCP เป็นเสาเข็มที่มีการอัดแรงและมีกระบวนการผลิตโดยใช้กรรมวิธีการเหวี่ยงคอนกรีตในแบบหล่อให้หมุนด้วยความเร็วสูง จึงเกิดรูปกลมกลวงตรงกลางจากแรงเหวี่ยง ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นและแข็งแรงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยวิธีปกติ ทำให้มีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนได้ดี (Akiyama, 2012; Choi, 2016) การที่เสาเข็ม PHCP มีรูปกลวงตรงกลางยังช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินขณะตอกเสาเข็ม อีกทั้งยังสามารถตอกเสาเข็มด้วยวิธีเจาะและกด (Auger Press) ซึ่งลดการสั่นสะเทือนและการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างของดินได้เป็นอย่างดี ดังนั้น PHCP จึงนิยมใช้ในการก่อสร้างอาคารในพื้นที่ที่มีอาคารข้างเคียง อย่างไรก็ตามจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ในปี 2011 ที่ประเทศญี่ปุ่นที่ถูกเรียกว่า “Tohoku Pacific Earthquake” หลังจากการตรวจสอบความเสียหายของอาคาร นักวิจัยพบว่าในพื้นที่ที่เป็นดินอ่อน เสาเข็ม PHCP เกิดความเสียหายจำนวนมากโดยเป็นการเสียหายแบบเปราะ (Brittle failure) ที่หัวเสาเข็มภายใต้แรงดัดและแรงถอน (Pull-out force) ที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว (Tokimatsu et al., 2011) เสาเข็ม PHCP จึงมีการใช้อย่างจำกัดในเขตพื้นที่เสี่ยงแผ่นดินไหว เช่น ในประเทศจีนอนุญาตให้ใช้เสาเข็ม PHCP ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงแผ่นดินไหวต่ำเท่านั้น (Ren et al., 2021) การออกแบบรายละเอียดบริเวณจุดต่อของหัวเสาเข็ม PHCP กับฐานรากจึงมีความสำคัญ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อนี้ หากอาคารต้องรับแรงดันข้างหรือแรงแผ่นดินไหว (Akiyama, 2012)

ในพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล เป็นพื้นที่ที่เป็นดินอ่อน แต่มีการใช้เสาเข็ม PHCP อย่างแพร่หลาย ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม PHCP ในดินอ่อนของกรุงเทพและปริมณฑล จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการรับแรงดึงของเหล็กเสริมในส่วนของการเสริมเหล็กเดือยในรูปกลวงของเสาเข็ม สำหรับยึดกับฐานรากเท่านั้น เหล็กแกนของเสาเข็มชนิดนี้เป็นลวดเหล็กกล้าแรงดึงสูงทำหน้าที่เป็นลวดอัดแรงในคอนกรีต ทำให้เสาเข็มประเภทนี้ไม่สามารถนำเหล็กแกนมาใช้ทำเป็นเหล็กเดือยยึดกับฐานรากได้ กรณีมีความจำเป็นต้องใช้เสาเข็มกับงานโครงสร้างต้านทานแรงกระทำด้านข้าง (แรงลม แรงแผ่นดินไหว หรือแรงดันดินด้านข้าง) หรือโครงสร้างที่เกิดแรงดึงระหว่างฐานรากกับเสาเข็ม เช่น แรงยกที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างถ้ำน้ำใต้ดิน อาคารป้ายโฆษณาที่มีเสาแกนเดียว จึงมีความจำเป็นต้องทำการออกแบบการเสริมเหล็กเดือย (Dowel bar) ให้สามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้าง หรือแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างฐานรากกับเสาเข็มได้ โดยต้องออกแบบให้เหล็กเดือยมีขนาด ปริมาณและระยะฝังที่เหมาะสม ส่วนความลึกของคอนกรีตที่กรอกในรูปกลวง สามารถคำนวณจากแรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตในรูปกลวง (Infilled concrete) กับคอนกรีตเสาเข็ม อย่างไรก็ตามการออกแบบการเสริมเหล็กเดือยในรูปกลวงของเสาเข็ม PHCP ยังไม่มีรูปแบบและข้อมูลการเสริมเหล็กที่เป็นมาตรฐาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงดึงของเหล็กเดือยร่วมกับ

คอนกรีตที่กรอกในรูกลวงของเสาเข็ม PHCP เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาใช้ประกอบการคำนวณ และเป็นแนวทางการพัฒนารูปแบบการเสริมเหล็กเดียวในรูกลวงของเสาเข็ม PHCP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบแรงเหวี่ยง (เสาเข็ม PHCP)

เสาเข็ม PHCP ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็น เสาเข็มของ บมจ.สยามเทคนิคคอนกรีต มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 40 ซม. หนา 7.5 ซม. ตัดให้มีความยาว 250 ซม. มีรายละเอียดและคุณสมบัติของเสาเข็ม แสดงดัง Table 1 (บมจ. สยามเทคนิคคอนกรีต, 2562)

Table 1 Show details and properties of spinning piles

Outer dia. (mm)	Wall thickness (mm)	Concrete cross section area (cm ²)	Nominal weight (kg/m)	Moment of inertia of concrete (cm ⁴)	Effective stress (ksc)	Moment capacity		Recommended safe load (ton)
						Allowable (kg-m)	Cracking (kg-m)	
400	75	766	199	106489	42.44	3676	4629	50-70

เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ขนาด สำหรับใช้เป็นเหล็กเดี่ยวและเหล็กปลอก โดยเหล็กเดี่ยวที่ใช้ เป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. (DB12) ชั้นคุณภาพ SD40 ตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 24-2559 นำไปทดสอบแรงดึงจำนวน 3 ตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่ามียield strength เท่ากับ 6,111 กก./ตร.ซม. และกำลังดึงประลัยเท่ากับ 7,102 กก./ตร.ซม. ส่วนเหล็กปลอก ใช้เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. (RB6) ชั้นคุณภาพ SR24 ตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 20-2559

คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้กรอกในรูกลวง (Infilled concrete) ของเสาเข็ม เป็นคอนกรีตผสมเสร็จที่ออกแบบให้มียield strength ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 210 กก./ตร.ซม. เมื่อนำคอนกรีตที่ใช้ไปทดสอบค่าการยุบตัวและกำลังอัดที่อายุ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 15 × 30 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 10.90 ซม. และกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 255 กก./ตร.ซม.

วิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเดี่ยวร่วมกับคอนกรีตที่กรอกในรูกลวงของเสาเข็ม เพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุดที่เหล็กเดี่ยวสามารถรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ โดยการวิบัติที่เกิดขึ้น สามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณี ได้แก่

1) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงของเหล็กเดี่ยว จะทำให้เหล็กเดี่ยวขาด ซึ่งเป็นการวิบัติที่ต้องการให้เกิดขึ้นในกรณีของการใช้เหล็กเดี่ยวยึดระหว่างเสาเข็มกับฐานราก

2) การวิบัติเนื่องจากเหล็กเดือยเกิดการเลื่อนไถล (Slip) ออกจากคอนกรีต การวิบัติลักษณะนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีระยะฝั่งของเหล็กเดือยไม่เพียงพอ สามารถป้องกันการวิบัติในลักษณะนี้ได้ด้วยการคำนวณระยะฝั่งให้ได้ตามมาตรฐาน โดยใช้สมการคำนวณระยะฝั่งสำหรับเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงของ ACI 318-08

3) การวิบัติเนื่องจากการเลื่อนไถลระหว่างคอนกรีตที่กรอกและคอนกรีตเสาะเข็ม การวิบัติลักษณะนี้สามารถป้องกันได้โดยการคำนวณความลึกของคอนกรีตที่กรอกในรูกลวงให้เพียงพอ ซึ่งจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตที่กรอกและคอนกรีตเสาะเข็ม แต่เนื่องจากค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับกำลังอัดและลักษณะพื้นผิวของคอนกรีต จึงมีความแปรปรวนสูง (Mohamad, 2015) มาตรฐานการออกแบบ Eucode2 (2004) ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสคอนกรีตอยู่ในช่วง 0.50–0.90 ทำให้การกำหนดความลึกที่เหมาะสมของคอนกรีตที่กรอกในรูกลวงทำได้ยากในทางปฏิบัติ

Fig. 1 แสดงตำแหน่งการเกิดหน่วยแรงที่ทำให้เกิดการวิบัติในแต่ละกรณี จากการวิเคราะห์การวิบัติที่อาจเกิดขึ้นทั้ง 3 กรณี ในทางปฏิบัติต้องออกแบบให้เกิดการวิบัติในกรณีที่ 1 คือให้เสาะเข็มและฐานรากสามารถส่งผ่านแรงดึงได้อย่างเต็มที่จนกระทั่งเหล็กเดือยขาดก่อนเกิดการเลื่อนไถลของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีต งานวิจัยนี้จึงกำหนดระยะฝั่งเหล็กเดือยและความลึกของคอนกรีต เป็น 3 ระดับ คือ 50 100 และ 150 ซม. แสดงดัง Fig. 2 โดยระยะฝั่ง 50 ซม. คำนวณจากสมการคำนวณระยะฝั่งสำหรับเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงตามมาตรฐาน ACI 318-08 ส่วนระยะฝั่ง 100 ซม. เป็นระยะที่คำนวณจาก 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาะเข็ม ($2.5 \times 40 = 100$ ซม.) แนะนำโดย Kaneko (2018) ใช้สำหรับเสาะเข็ม PHCP ส่วนระยะฝั่ง 150 ซม. เป็นระยะฝั่งที่คำนวณจาก 3.0 เท่าของระยะฝั่งที่คำนวณได้จากกรณีที่ 1 ($3.0 \times 50 = 150$ ซม.) การทดสอบแรงดึงในเสาะเข็มในแต่ละระยะฝั่งจะใช้จำนวน 2 ตัวอย่าง เพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยโดยมีขั้นตอนและรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมเหล็กสำหรับเสริมในรูกลวงของเสาะเข็มแบ่งเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย แผ่นเหล็ก เหล็กเดือย และเหล็กปลอก งานวิจัยนี้ใช้แผ่นเหล็กหนา 3.2 มม. ตัดเป็นวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่ารูกลวงของเสาะเข็มด้านละ 1.0 ซม. แสดงดัง Fig. 3 หน้าที่ของแผ่นเหล็ก คือ ยึดเหล็กเดือยทั้ง 4 เส้นให้อยู่ตามตำแหน่งที่ต้องการ และรองรับคอนกรีตที่เทใส่ในรูกลวงของเสาะเข็ม ส่วนเหล็กปลอกใช้เหล็กกลมขนาด RB6 จัดตำแหน่งระยะห่างด้วยลวดผูกเหล็กเท่ากับ 15 ซม. จัดตำแหน่งระยะฝั่งของเหล็กเดือยด้วยการสร้างคานยึดชั่วคราว แสดงดัง Fig. 4 คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 210 กก./ตร.ซม. ก่อนเทคอนกรีตทำการทดสอบค่าการยุบของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C143/C143M-15 และเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 15 × 30 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทคอนกรีตลงในรูกลวงของเสาะเข็มที่ติดตั้งเหล็กเดือยเรียบร้อยแล้ว แสดงดัง Fig. 4 หลังเทคอนกรีตเสร็จ บ่มเสาะเข็มด้วยน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อตัวอย่างเสาะเข็มมีอายุครบ 28 วัน นำเสาะเข็มทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงในเหล็กเดือย โดยในการทดสอบใช้แม่แรงไฮดรอลิกไฟฟ้า (Hydraulic jack) ร่วมกับ โหลดเซลล์ (Loadcell) ขนาด 50 ตัน ยี่ห้อ HBM TypC6A #171130151 แสดงดัง Fig. 5(A) ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบแสดงดัง Fig. 5(B) โดยใช้อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวแกน (LVDTs) บันทึกการเคลื่อนตัวของคอนกรีตที่กรอกในรูกลวง เพื่อตรวจสอบการเลื่อนไถลของคอนกรีตที่กรอกกับคอนกรีตเสาะเข็ม เริ่มให้แรงดึงเบื้องต้น (Pre-loading) ประมาณ 50 กก. ตรวจสอบระบบการถ่ายแรงระหว่างชุดให้แรงกับตัวอย่างทดสอบ โดยเพิ่มแรงดึงในการทดสอบด้วยอัตราเร็วคงที่ พร้อมบันทึกค่าด้วยเครื่องแปลงสัญญาณและบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ TML Portable TDS-150 TYPE S-2780

และหยุดทดสอบเมื่อค่าแรงดึงลดลง และเกิดการวิบัติ หลังจากนั้นตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งในเหล็กเดี่ยว คอนกรีตที่กรอกและคอนกรีตเสาเข็ม

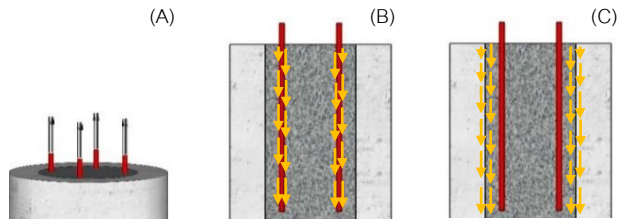


Fig. 1 The position of the stress that occurred in PHC pile

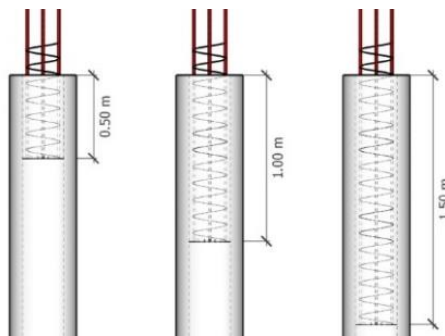


Fig. 2 The dowel reinforced embedding in PHC pile



Fig. 3 The examination of the hollow hole size of PHC pile, Cutting Steel Plates, Dowel alignment and stirrup alignment



Fig. 4 Temporary beams fastening Dowel and test samples

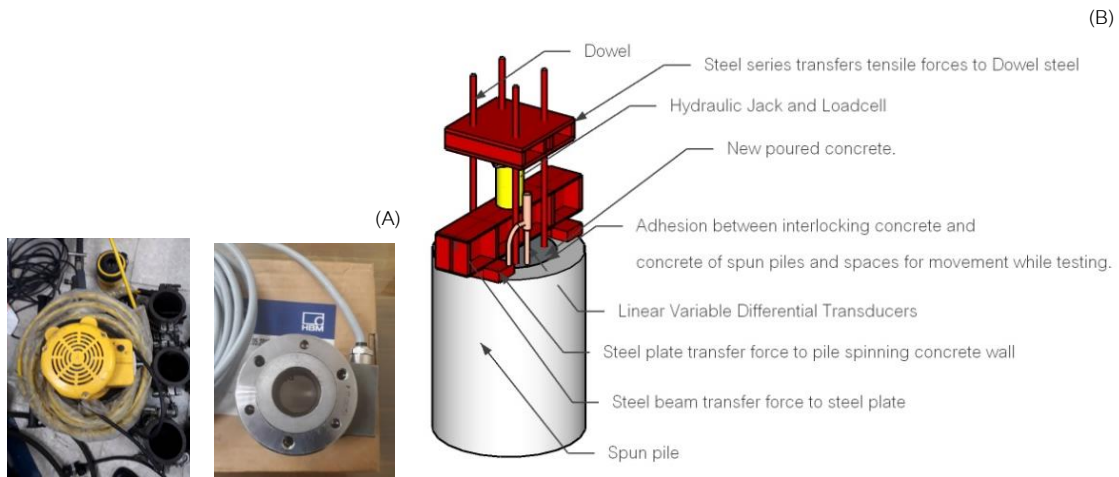


Fig. 5 (A) Hydraulic Jack and loadcell HBM TypC6A #171130151; (B) The installation of the tool to the test sample

Table 2 Shows the results of the tensile test of dowel reinforcement at the hollow hole embedded distance of different spun piles.

Order	Cross section area (cm ²)	contact area between new and old concrete (cm ²)	Tensile force (ton)		Tensile stress (ksc)	Bonding stress in contact surface of concrete (ksc)
			First crack in concrete	Ultimate tensile force		
T-50	4.52	3927	25.37	28.83	6378	7.34
T-100	4.52	7854	24.83	28.07	6210	3.57
T-150	4.52	11781	25.95	29.15	6449	2.47

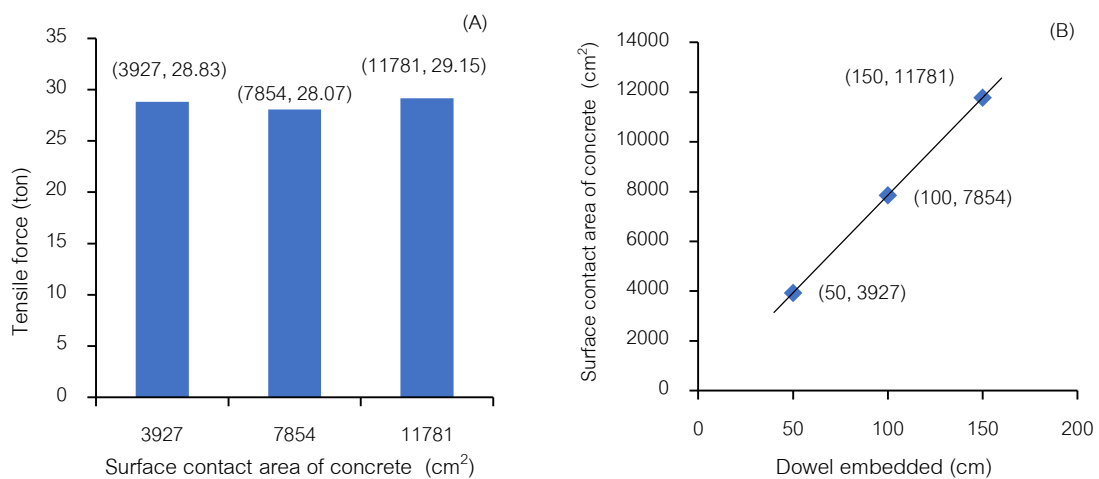


Fig. 6 (A) relationship between the dowel embedded with the tensile force; (B) The relationship between the dowel embedded with the surface contact area between new and old concrete

(A)

(B)



Fig. 7 (A) Failure of dowel bar in tensile force; (B) First cracks in concrete wall of the PHC piles

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงของเหล็กเดือย และหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับคอนกรีตของเสาเข็ม แสดงดัง Table 2 จากผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดึงสูงสุดที่ตัวอย่างรับได้ในทุกระยะฝังมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดัง Fig. 6A ทั้งนี้เนื่องจากทุกตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในเหล็กเดือยและทำให้เหล็กขาดออกจากกัน แสดงดัง Fig. 7A แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตที่กรอกกับคอนกรีตของเสาเข็มสามารถต้านทานแรงดึงได้มากกว่ากำลังดึงของเหล็กเดือย

เมื่อตรวจสอบสภาพคอนกรีตของเสาเข็ม พบรอยร้าวขนาดเล็กที่ผนังคอนกรีต แสดงดัง Fig. 7B แต่รอยร้าวนี้ไม่ใช่สาเหตุของการวิบัติของหัวเสาเข็ม เมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนตัวของคอนกรีตที่วัดด้วย LVDTs พบว่ามีค่าน้อยมากคืออยู่ระหว่าง 0.02–0.60 มม. แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการเลื่อนไถลของคอนกรีตที่กรอกกับคอนกรีตของเสาเข็ม เมื่อพิจารณาจาก Fig. 6B พบว่าระยะฝังของเหล็กเดือยที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตที่กรอกกับคอนกรีตของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย

จาก Table 2 พบว่าตัวอย่าง T-50 ที่มีระยะฝังเหล็กเดือย 50 ซม. มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตที่กรอกกับคอนกรีตของเสาเข็มเท่ากับ 7.34 กก./ตร.ซม. และตัวอย่างไม่เกิดการเลื่อนไถลระหว่างผิวคอนกรีต ดังนั้นหากใช้ระยะฝัง 100 และ 150 ซม. ดังตัวอย่าง T-100 และ T-150 ประเมินได้ว่าผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้ไม่น้อยกว่า 57 และ 86 ตัน ตามลำดับ โดยไม่เกิดการเลื่อนไถลของคอนกรีต (เมื่อพิจารณาจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตเท่านั้น) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม 50–70 ตัน แสดงดัง Table 1 ดังนั้นจากการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการเพิ่มระยะฝังของเหล็กเดือยและความลึกของคอนกรีตที่กรอกในรูกลวงเสาเข็ม 2.50–3.75 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม สามารถป้องกันการวิบัติเนื่องจากการเลื่อนไถลของผิวสัมผัสของคอนกรีตได้อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยการเพิ่มปริมาณและขนาดของเหล็กเดือย เพื่อหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดระหว่างผิวสัมผัสของคอนกรีตสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบต่อไป

สรุป

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเดือยร่วมกับคอนกรีตที่กรอกในรูกลวงของเสาเข็ม คอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงแบบแรงเหวี่ยง ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า เสาเข็มทุกตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการวิบัติเนื่องจากกำลังดึงประลัยของเหล็กเดือย โดยไม่เกิดการเลื่อนไถลของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตที่กรอกและคอนกรีตเสาเข็ม ดังนั้นระยะฝังการเสริมเหล็กเดือยสามารถคำนวณได้จาก สมการคำนวณระยะฝังสำหรับเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงตามข้อกำหนด

มาตรฐาน ACI 318-08 รวมถึงการใช้ระยะฝังมากกว่า 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็ม จึงมีความปลอดภัย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- บมจ. สยามเทคนิคคอนกรีต. 2562. เสาเข็มคอนกรีตแรงเหวี่ยง. <http://www.stec.co.th/pdf/products/STEC.Products-20190930.pdf>, 26 กรกฎาคม 2564.
- ACI. 2008. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Akiyama, M., Abe, S., Aoki, N., Suzuki, M. 2012. Flexural test of precast high-strength reinforced concrete pile prestressed with unbonded bars arranged at the center of the cross-section. Eng. Struct. 34: 259–270. doi.org/10.1016/j.
- Choi, Y., Kim, D.C., Kim, T.Y. 2016. Field evaluation of the vertical bearing capacity of a screw pretensioned spun high-strength concrete pile. Mar. Georesour. Geotechnol. 34: 474–485. doi.org/10.1080/1064119X.2015.1030805
- EN B. 1 - 1: 2004 Eurocode 2: design of concrete structures. General rules and rules for buildings. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>, 14 January 2022
- Mohamad, M.E., Ibrahim, I.S., Abdullah, R., Rahman, A.B.A., Kueh, A.B.H., Usmen, J. 2015. Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond. Cem. Concr. Comp. 56: 1–14. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.003
- Kaneko, O., Kawamata, S., Nakai, S., Sekiguchi, T., Mukai, T. 2018. Analytical study of the main causes of damage to pile foundations during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Jpn. Archit. Rev. 1: 235–244. doi.org/10.1002/2475-8876.12033
- Ren, J., Xu, Q., Chen, G., Liu, C., Gong, S., Lu, Y. 2021. Flexural performance of pretensioned centrifugal spun concrete piles with combined steel strands and reinforcing bars. Struct. 34: 4467–4485. doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.052
- Saman, S., Dolati, K., Mehrabi, A. 2021. Review of available systems and materials for splicing prestressed-precast concrete piles. Struct. 30: 850–865. doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.029
- Tokimatsu, K., Tamura, S., Suzuki, H., Katsumata, K. 2012. Building damage associated with geotechnical problems in the 2011 Tohoku Pacific Earthquake. Soils Found 52: 956–974. doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.014

อิทธิพลของระดับความเค้นแบบกระทำซ้ำที่มีผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวเคโอลิน

The effects of cyclic stress ratio on the deformation behavior of kaolin clay

ปริตตา ศุภโกวิท^{a,*}, พงษ์พิพัฒน์ อานันทนสกุล^b

Paritta Suphakowit^{a,*}, Pongpipat Anantanasakul^b

^aภาควิชาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพฯ 10160

^bภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170

^aDepartment of Civil Environment and Sustainable Engineering, Faculty of Engineering, Siam University, Bangkok 10160, Thailand

^bDepartment of Civil Engineering, Mahidol University, Nakorn Pathom 73170, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Paritta.sup@siam.edu

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือศึกษาการรับแรงแบบกระทำซ้ำของดินเหนียวเคโอลิน (Kaolin Clay) โดยจำลองสถานการณ์การรับแรงในสนามด้วยการทดสอบอัดตัวคายน้ำแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการ ภายใต้เงื่อนไขการอัดตัวปกติและรับแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Consolidated-undrained triaxial test on normally consolidated Kaolin clay) ที่ความถี่ 0.05 Hz จำนวน 10,000 รอบ ในระดับความเค้นจากแรงแบบกระทำซ้ำ (Cyclic stress ratio, CSR) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ ซึ่งผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวเคโอลินที่รับแรงแบบกระทำซ้ำนั้นจะวิเคราะห์ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรสะสม (Accumulative plastic strain) ที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบแรงกระทำ (Number of cycles) ตลอดระยะเวลาการทดสอบ อีกทั้งยังกล่าวถึงการจำแนกพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบในแต่ละระดับความเค้นด้วยด้วยทฤษฎี Shakedown

คำสำคัญ: ความเครียดถาวรสะสม, เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน, แรงแบบกระทำซ้ำ

Abstract

Consolidated-undrained cyclic triaxial tests were performed on normally consolidated Kaolin clay specimens to investigate the deformation behavior of Kaolin subjected to repeated loading at a cyclic frequency of 0.05 Hz and undergo a number of load cycles of 10,000. Cyclic stress ratios (CSR) of 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, and 0.90 were employed. The obtained results indicate that the accumulated plastic strains are brightly dependent on CSR. When CSR value is 0.90, the plastic strains increase insignificantly and the specimens present ratcheting behavior or failure. For CSR values equal to or less than 0.60, plastic strains increase only marginally. The specimens stabilize and elastic shakedown behavior is present.

Keywords: Accumulative plastic strain, Cyclic loading, Triaxial test

คำนำ

แรงแบบกระทำซ้ำ (Cyclic loading) หมายถึงแรงที่กระทำซ้ำเป็นช่วงๆ เกิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เช่น ระบบคมนาคมขนส่ง แผ่นดินไหว ลม คลื่น หรือจากเครื่องจักรงานก่อสร้างอย่าง การเจาะเสาเข็ม เป็นต้น อิทธิพลของแรงกระทำซ้ำทำให้การจัดเรียงอนุภาคของวัสดุจะค่อยๆเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา แล้วก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent deformation) ขึ้น ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างนั้นมักจะแสดงให้เห็นเฉพาะในช่วงสัปดาห์ หรือยากต่อการแก้ไขได้ทันแล้ว ยกตัวอย่างเช่น งานชั้นใต้ดิน อัตราการทรุดตัวที่รวดเร็วของชั้นดินส่งผลให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างฐานรากและอาคาร และอาจส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก ดังนั้นการป้องกันการเกิดปัญหาในลักษณะดังกล่าวนี้จึงเป็นเรื่องที่ต้องคำนึงถึง

มีงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของดินที่ตอบสนองต่อแรงแบบกระทำซ้ำ เช่น Brown (1975) ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วนอัดเกินตัว (Over-consolidation ratio, OCR) ที่มีผลต่อดินเหนียวที่รับแรงแบบกระทำซ้ำ Hyodo et al. (1994) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนแบบกระทำซ้ำแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกับแรงเฉือนเริ่มต้นแบบสถิต Li and Selig (1996) สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายความเครียดถาวรสะสมของดินเหนียวที่รับแรงแบบกระทำซ้ำ Malla and Joshi. (2007) สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่า Resilient modulus โดยวิเคราะห์จากข้อมูลดินคันทางที่รับแรงแบบกระทำซ้ำ เป็นต้น ข้อเท็จจริงจากงานวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ดินเหนียวมีค่าความเครียดสะสมเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของแรงแบบกระทำซ้ำ และยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวที่รับแรงแบบกระทำซ้ำ

งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อมุ่งหวังว่าจะสามารถยืนยันข้อเท็จจริงต่างๆ ในงานวิจัยก่อนหน้า และเติมเต็มเนื้อหาบางส่วนที่ยังไม่ครอบคลุมในพฤติกรรมตอบสนองของดินที่รับแรงแบบกระทำซ้ำ จากการทดสอบแรงอัดสามแกนรับแรงเฉือนแบบซ้ำในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained cyclic triaxial test) ที่ความถี่ 0.05 Hz กับดินเหนียวสร้างใหม่ในห้องปฏิบัติการ (Reconstituted soils) ซึ่งการวิเคราะห์ผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวโกลิน ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรสะสม (Accumulative plastic strain) ที่ระดับความเค้นจากแรงแบบกระทำซ้ำ (Cyclic stress ratio, CSR) แตกต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 และ 0.90

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความเครียดถาวรสะสม (Accumulative plastic strain) เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเสียรูปของดิน (Deformation) และโครงสร้างใต้ดิน ระบบฐานราก ความเครียดดังกล่าวถูกพบทั้งในเงื่อนไขแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ มีงานวิจัยที่ศึกษาความเครียดถาวรสะสมและนำเสนอแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมของดินที่รับแรงแบบกระทำซ้ำ อาทิ แบบจำลองสำหรับทำนายความเครียดถาวรสะสมตามจำนวนรอบการรับแรงสำหรับดินทรายโดย Monismith et al. (1975) ภายหลังแบบจำลองนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับดินเหนียวโดย Li and Selig (1996) โดยระบุตัวแปรตามคุณสมบัติทั้งเชิงกลและกายภาพของดินในรูปฟังก์ชันของระดับความเค้น (CSR) ดังที่แสดงในสมการ (Equation 1):

$$\varepsilon_p = aCSR^m N^b \quad (1)$$

โดย ε_p คือ ความเครียดสะสม (%); N คือ จำนวนรอบการให้แรงแบบกระทำซ้ำ; สัมประสิทธิ์ a และ เลขกำลัง m และ b คือ ตัวแปรที่ผันตามคุณลักษณะเฉพาะของดิน CSR คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (σ_d) และ 2 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ Undrained shear strength (S_u) ของดิน (Equation 2) ซึ่งการหาค่าความเครียดสะสมของดินเนื่องจากแรงแบบกระทำซ้ำนั้นสามารถกระทำในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำ (Cyclic triaxial test) เพื่อสามารถเก็บข้อมูลได้แม่นยำ

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2S_u} \quad (2)$$

ความเครียดถาวรสะสมนี้สามารถวิเคราะห์จำแนกพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่รับแรงแบบกระทำซ้ำได้ด้วยทฤษฎี Shakedown ซึ่งเสนอโดย Melan ในปีค.ศ. 1936 โดยแบ่งลักษณะการเปลี่ยนรูปของวัสดุออกเป็น 4 สภาวะ ได้แก่ Purely elastic, Elastic shakedown, Plastic shakedown และ Ratcheting ดังนี้ เมื่อแรงที่กระทำกับวัสดุมีค่าน้อย วัสดุจะตอบสนองต่อแรงในลักษณะยืดหยุ่น เมื่อถอนแรงที่กระทำออก วัสดุจะสามารถคืนรูปกลับมาเหมือนเดิมได้ และ วัสดุสามารถรับแรงกระทำในขนาดเท่าเดิมนั้นต่อไปได้เรื่อยๆ พฤติกรรมลักษณะนี้เรียกว่า Purely elastic แต่เมื่อแรงที่กระทำกับวัสดุนั้นมีค่ามากขึ้นจนทำให้วัสดุไม่สามารถคืนรูปกลับมาเหมือนเดิมได้ วัสดุจะคงรูปใหม่และความแข็งแรงของวัสดุจะเพิ่มขึ้น สามารถรับแรงกระทำที่มีขนาดไม่เกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น หรือ Elastic shakedown limit นี้ต่อไปได้เรื่อยๆ พฤติกรรมลักษณะนี้เรียกว่า Elastic shakedown หากแรงที่กระทำกับวัสดุมีค่ามากขึ้นอีกจนเกิดขีดจำกัดพลาสติก Plastic shakedown limit ความเครียดสะสมที่เพิ่มมากขึ้นจนสามารถเห็นการเปลี่ยนรูปของวัสดุมากขึ้น ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่า Plastic shakedown และหากแรงที่กระทำกับวัสดุมีค่าสูงมากจนความเครียดสะสมที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุเกิดการเสียในสภาวะนี้การเปลี่ยนรูปของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น สามารถคาดเดาได้ว่าวัสดุจะสามารถรับแรงกระทำในขนาดนี้ต่อไปได้ และจะเกิดการพังวิบัติของวัสดุขึ้น ซึ่งสภาวะนี้เรียกว่า Ratcheting ในสภาวะนี้

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ

ดินที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ดินเหนียวเคโอลิน (Kaolin clay) จากแหล่งในอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง โดยมี ส่วนประกอบเป็นดินเหนียว (Clay) 69 เปอร์เซ็นต์ ตะกอนทราย (Silt) 29 เปอร์เซ็นต์ และทราย (Sand) 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง ตามการทดสอบหาขีดความชื้นเหลวของดิน (Liquid and plastic limit test) การทดสอบการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity test) และการทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis test) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-10 (2010) ASTM D 854-10 (2010) และ ASTM D 7928-16 (2017) ตามลำดับ ทำให้สามารถจำแนกดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้จากระบบ Unified Soil Classification ASTM D-2487 ว่าเป็นดินประเภท ดินเหนียวอินทรีย์ที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ดังที่แสดงในตาราง 1 และผลการทดสอบการหาขนาดของเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ แสดงใน Fig. 1

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน (Cyclic triaxial test) ในงานวิจัยนี้มี 6 องค์ประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 2 เรียงจากซ้ายไปขวาดังนี้ (1) ครอบทดสอบบีบอัดแบบสามแกน (Triaxial cell) เฟรมทดสอบ และตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า (Electro-pneumatic transducer, EP) (2) เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (Volume change device, VCD) (3) แผงควบคุมแรงดัน (Control board) (4) อุปกรณ์เก็บข้อมูล Data acquisition device (DAQ) และ (5) คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์ของ DAQ

โดยชุดเครื่องมือทดสอบนี้ได้ดัดแปลงมาจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบปกติโดยใช้ LabVIEW สั่งการ EP ผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อให้แรงเชื่อมกับตัวอย่างดินตามความถี่ที่ออกแบบไว้ด้วยระบบลม (Servo-control pneumatic

system) นอกจากนี้ยังมี Differencial pressure transducer และ Pressure transducer ที่เชื่อมกับเครื่องทดสอบ triaxial เพื่อแปลงสัญญาณส่งให้อุปกรณ์เก็บข้อมูลแบบ Real time โดยจะติดตั้งไว้ที่ VCD ดังแสดงใน Fig. 3

วิธีการทดสอบ

เนื่องจากตามธรรมชาติของดินนั้นจะมีส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุ เช่น ซากพืชซากสัตว์ปนอยู่ด้วย จึงต้องทำการอบและปั้นดินให้เป็นผง โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (ช่องเปิดขนาด 0.425 มิลลิเมตร) ก่อนนำไปผสมกับน้ำ โดยปริมาณน้ำที่จะผสมนั้นเป็นสองเท่าของค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) เมื่อน้ำผสมเข้ากันดีกับผงดินแล้ว ดินเหลว (Slurry) ที่ได้จะถูกเทใน Double drainage consolidation tank ที่แรงดัน 150 kPa เพื่อบีบอัดตัวคายน้ำเป็นตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบต่อไป

การทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน (Cyclic triaxial test) นั้นจะเริ่มจากการตัดแต่งตัวอย่างดินให้เป็นรูปทรงกระบอกผิวเรียบ ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร หุ้มด้วย filter paper สองชั้นก่อนจะหุ้มด้วย latex membrane อีกชั้น พร้อมกับประกบบริเวณหัว และท้ายตัวอย่างดินด้วยแผ่น porous stone หลังจากวางบนฐานของ triaxial cell หลังจากนั้นรัดด้วย O-ring แล้วทำการซีลรอยรั่วด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum leakage check) เมื่อพบว่าตัวอย่างไม่มีรอยรั่ว แล้วก็จะทำให้ตัวอย่างอิ่มน้ำด้วยวิธีการบอนไดออกไซด์ (ค่า Skempton's pore pressure อยู่ที่ประมาณ 0.98–1.00) แล้วให้แรงดันเพื่อทำการบีบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation drained test) ซึ่งตัวแปรควบคุมของงานวิจัยนี้คือสภาพอัดแน่นปกติของดิน (Normally consolidated soil) ที่ความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 200 kPa ดังนั้นค่า OCR ของทุกตัวอย่างดินจะถูกควบคุมให้เท่ากับ 1 เมื่อปริมาตรของตัวอย่างดินที่ถูกบีบอัดแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแล้วจึงเริ่มกดตัวอย่างดินในแนวตั้งด้วยแรงแบบกระทำซ้ำ (Cyclic shear test) ที่ความถี่ 0.05 เฮิรตซ์ เป็นจำนวน 10,000 รอบ หรือจนกว่าตัวอย่างดินจะพังวิบัติ (Failure state) ภายใต้ภาวะ Undrained โดยที่ระหว่างทำการทดสอบนั้นอุปกรณ์เก็บข้อมูล (DAQ) และคอมพิวเตอร์จะบันทึกปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

วิธีการคำนวณ

เนื่องจากในขั้นตอนการเขื่อนนั้นอยู่ในสภาพไม่ระบายน้ำ ดังนั้นปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินระหว่างรับแรงเขื่อนจึงไม่ถูกนำมาคำนวณ และพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างดินจะสามารถคำนวณได้ตามสมการ (Equation 3)

$$A_c = A_0 \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_p} \right) \quad (3)$$

ความเค้นที่วัดได้ (σ_d) นั้นคำนวณตามสมการที่ 2 จากอัตราส่วนของแรงกดบนตัวอย่างดินต่อพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไป (A_c) ตามสมการ (Equation 4) โดยแรงกดบนตัวอย่างดินมาจากแรงกดทั้งหมด (F_d) ลบด้วยแรงต้านจากถุงลาเท็กซ์ (Stiffness of latex membrane, f_m) สำหรับอุปกรณ์การทดสอบนี้คิดแรงเสียดทานจาก Stiffness of latex membrane เพียงอย่างเดียวเพราะการกดแรงบนกระทำโดย Load cell ที่ติดตั้งภายใน triaxial cell

$$\sigma_d = \frac{F_d - f_m}{A_c} \quad (4)$$

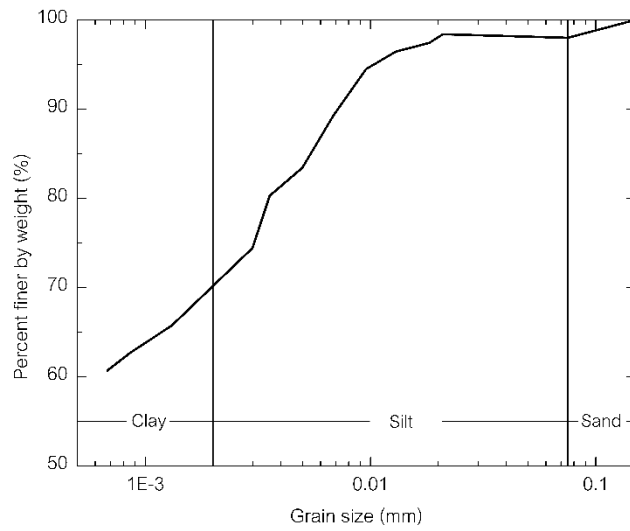


Fig. 1 Grain size distribution curve of tested soil

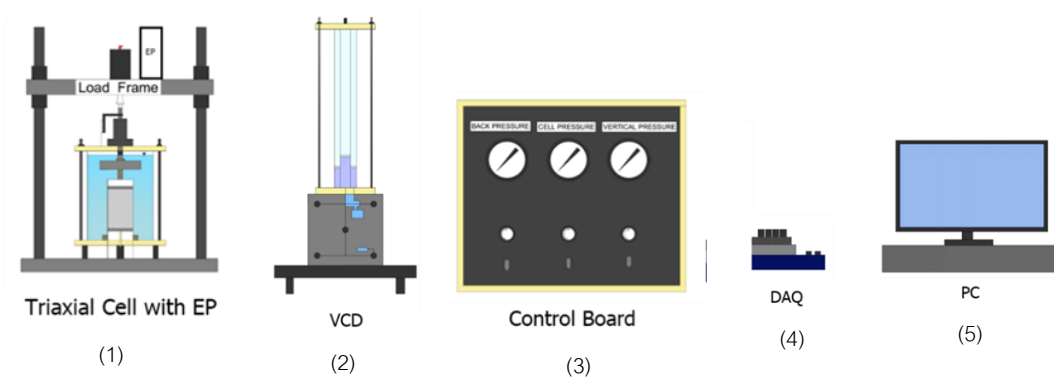


Fig. 2 Components of the cyclic triaxial instrument

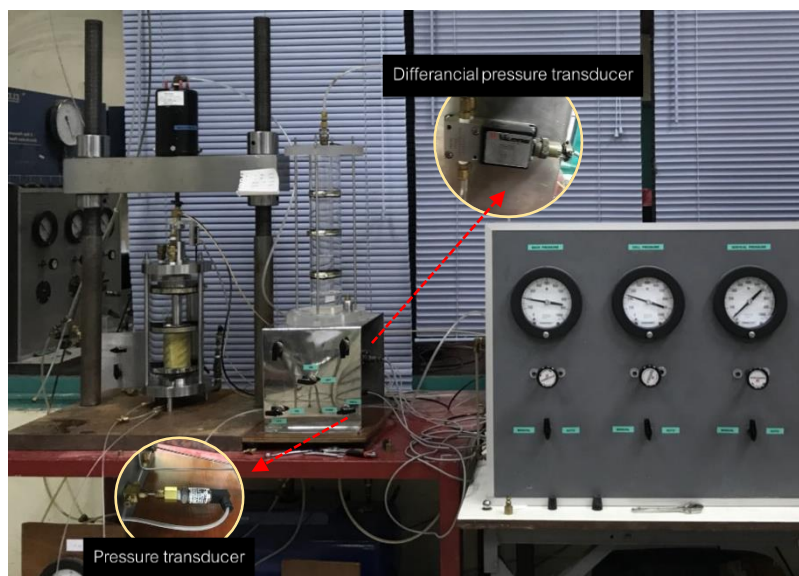


Fig. 3 Cyclic triaxial apparatus

Table 1 Index properties of tested soil

Liquid limit	54
Plastic index	26
Specific gravity	2.64
Water content of sample (%)	38
Void ratio of sample	0.95

ผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบดินด้วยสภาพอัดแน่นปกติด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่ให้แรงเฉือนแบบกระทำซ้ำนี้ พบว่าความเครียดถาวร (Plastic strain) เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบแรงกระทำ และนอกจากนี้ความเครียดถาวรยังแปรผันตรงกับ CSR ด้วย ดังจะเห็นได้ใน Fig. 4 เส้นโค้งที่ค่า CSR เท่ากับ 0.90 มีค่าความเครียดถาวรสะสมสูงสุด ถัดลงมาเป็นเส้นโค้ง CSR ที่ 0.75 0.60 0.45 และ 0.30 ตามลำดับ ช่วงจำนวนรอบตั้งแต่ 100 รอบขึ้นไปนั้นเส้นโค้งที่ CSR เท่ากับ 0.90 มีค่าความชันสูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเส้นโค้งอื่นๆ แสดงถึงพฤติกรรมการพังวิบัติของตัวอย่างดินที่ทดสอบ (Failure state) และจัดว่าเป็นพฤติกรรมแบบ Ratcheting ตามทฤษฎีของ Shakedown ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบจะมีโอกาสเกิดพฤติกรรมแบบ Ratcheting อย่างรวดเร็วหากได้รับแรงแบบกระทำซ้ำที่ระดับ CSR เท่ากับ 0.90

นอกจากนี้แรงแบบกระทำซ้ำที่ CSR เท่ากับ 0.75 ก็มีโอกาทำให้เกิดพฤติกรรมแบบ Ratcheting ได้เช่นกัน เนื่องจากมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดสะสมตามจำนวนรอบแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบยังไม่เกิดการพังวิบัติของตัวอย่างดินแต่อัตราการเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นชัดเจนถึงแนวโน้มที่จะเกิดการพังของตัวอย่าง หากมีการให้แรงกระทำกับตัวอย่างดินต่อไป ในขณะที่ตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.30 และ 0.45 นั้นแสดงพฤติกรรมแบบ Elastic shakedown เนื่องจากมีความเครียดสะสมไม่มาก ความชันของเส้นโค้งแทบจะเป็นเส้นตรงใน Semi-log plot และตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.60 แสดงพฤติกรรมแบบ Plastic shakedown เพราะมีความชันของกราฟความเครียดสะสมอยู่ระหว่าง Elastic shakedown และ Ratcheting ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบใน Fig. 5 อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันน้ำระหว่างอนุภาคดิน (Pore water pressure) ตามจำนวนรอบ (N) นั้นกราฟของตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.90 ที่เกิดการพังวิบัติมีความชันมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กราฟของตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.60 นั้นไม่ได้เกิดการพังวิบัติ อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำตามจำนวนรอบจึงน้อยกว่ากราฟของตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.90

การเปรียบเทียบผลการทดสอบ Cyclic triaxial test ของตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.90 กับ 0.60 กับเส้น Effective stress path (ESP) จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบปกติ (Anantanasakul and Roth, 2018) บน p'-q diagram ในรูปที่ 6 นี้จะเห็นว่ากราฟที่ได้จาก Cyclic triaxial test (กราฟสี่เหลี่ยมและสี่วงในรูปที่ 6) เคลื่อนที่ขึ้นและลงเป็นไปตามค่า amplitude ความยาวคลื่น และความสูงคลื่นของ σ_d ซึ่งกราฟเริ่มจากค่า Effective mean stress (p') ที่ 200 kPa แล้วกราฟจึงค่อยๆ มาทางซ้ายตามค่า p' ที่ลดลงจากการรับแรงแบบกระทำซ้ำหลายๆ และจะเห็นว่ากราฟของตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.90 มีค่า p' ที่ลดลงเรื่อยๆ จนกราฟสัมผัสกับเส้น Failure envelope ก่อนครบ 10,000 รอบ

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทำนายความเครียดสะสมถาวรของ Li and Selig. (1996) ในสมการที่ 1 ดังที่แสดงในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.30 มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมากที่สุด แม้ว่าผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ CSR อื่นๆ จะมีค่าต่ำกว่า และสูงกว่าแบบจำลอง แต่ก็มี

ทิศทางของกราฟไปในทางเดียวกัน ทั้งนี้ผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.90 นั้นเกิดการพังวิบัติจึงไม่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Li and Selig.

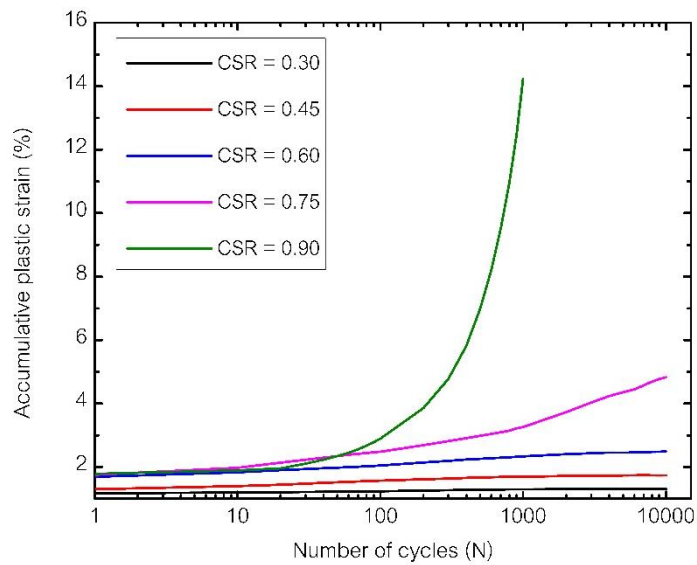


Fig. 4 Relationships between accumulative plastic strain and number of cycles of Kaolin at frequency of 0.05Hz

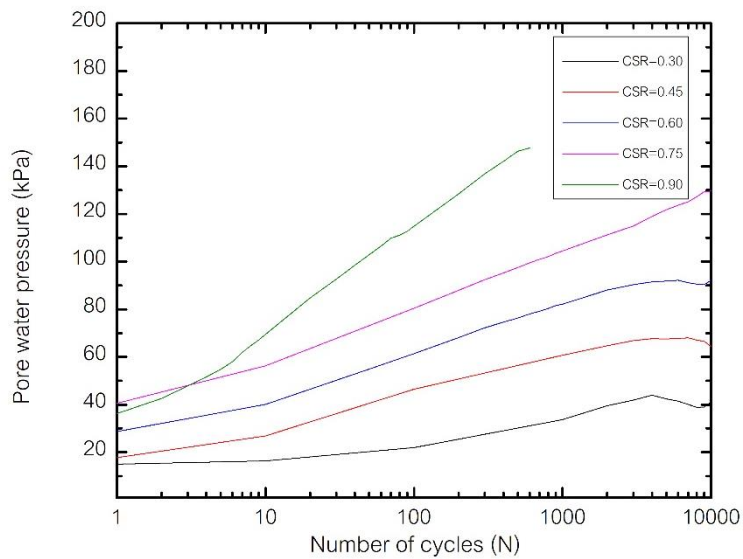


Fig. 5 Relationships between pore water pressure and number of cycles of Kaolin at frequency of 0.05 Hz

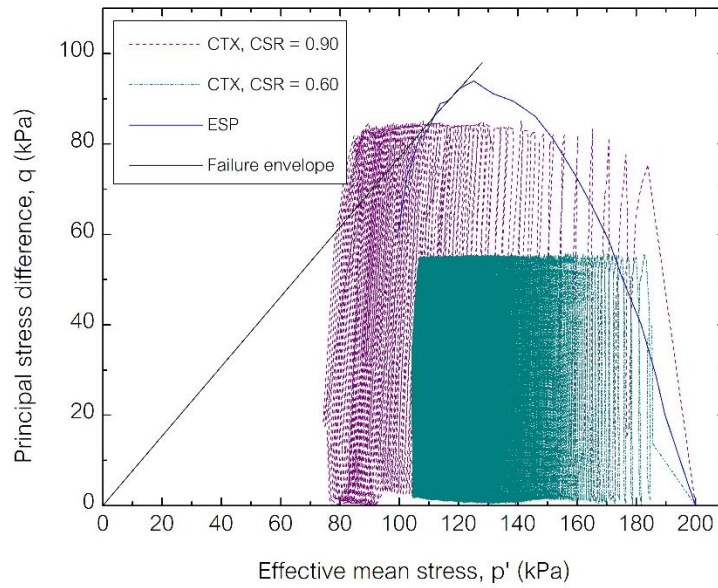


Fig. 6 Comparison between effective stress paths of cyclic test and ESP of monotonic test

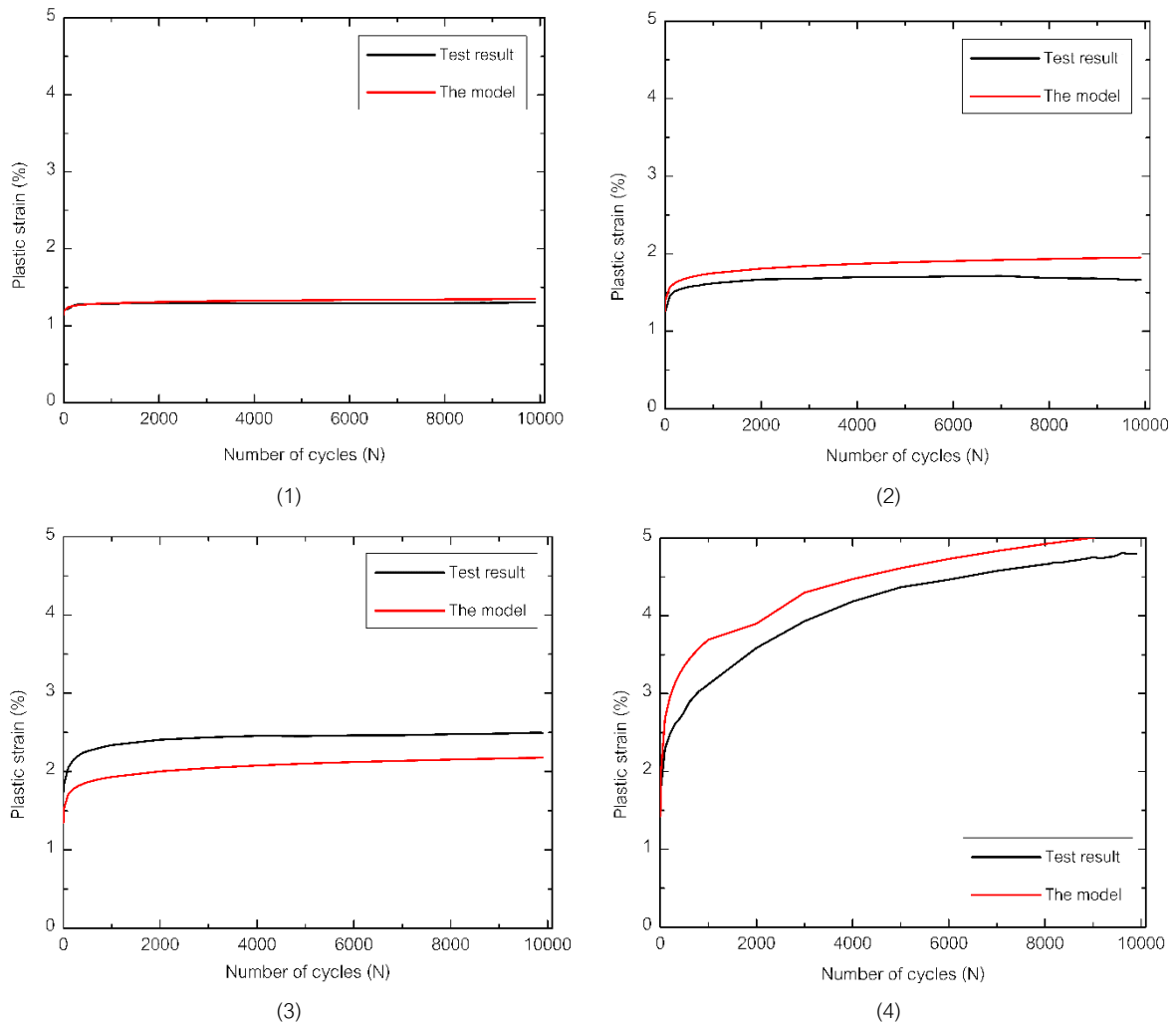


Fig. 7 Comparison between experimental results and predictions of Li's model for CSR values of: (1) CSR = 0.30, (2) CSR = 0.45, (3) CSR = 0.60, (4) CSR = 0.75

สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงแบบกระทำซ้ำของดินเหนียวเคลโอลิน (Kaolin clay) ด้วยเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนกับตัวอย่างดินสภาพอัดแน่นปกติที่รับแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำ ความถี่ 0.05 Hz จำนวน 10,000 รอบนั้น พบว่าความเครียดดาวรสะสมที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับระดับความเค้น (CSR) ที่ตัวอย่างดินได้รับ ที่ระดับ CSR เท่ากับ 0.90 และ 0.75 จะแสดงพฤติกรรมแบบ Ratcheting และ Plastic shakedown ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างดินที่รับ CSR เท่ากับ 0.30 และ 0.45 จะแสดงพฤติกรรมแบบ Elastic shakedown ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบผลการทดสอบ Cyclic triaxial test กับเส้น ESP จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบปกติบน p'-q diagram การสัมผัสกับเส้น Failure envelope ของกราฟตัวอย่างดินที่ CSR เท่ากับ 0.90 นั้นแสดงให้เห็นถึงค่าความเครียดดาวรที่สะสมที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Pore pressure) จนเกิดการพังวิบัติของตัวอย่างดิน ทั้งนี้ปัจจัยอื่นก็มีอิทธิพลกับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของดินที่รับแรงแบบกระทำซ้ำด้วย เช่น ความถี่ และ อัตราส่วนอัดเกินตัว (OCR) เพียงแต่ในจุดประสงค์ของการทำวิจัยนี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของระดับความเค้นแบบกระทำซ้ำที่มีผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวเท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.พงษ์พิพัฒน์ อานันทนสกุล ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา สำหรับทำวิจัย ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- Anantanasakul, P., Roth, C. 2018. Undrained behavior of silt-clay transition soils with varying degrees of overconsolidation. *J. GeoEngin* 13: 001–012.
- ASTM, D. 2010. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (USCS). 2487-10. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.04, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, D. 2010. 4318. Test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. American Society for the Testing and Materials, ASTM Book of Standards Soil and Rock (I). 4: D420–D5876.
- ASTM, A. 2017. D7928: Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soil using the sedimentation (hydrometer) analysis. American Society for Testing and Materials: D7928-16.
- Brown, S.F., Lashine, A.K.F., Hyde, A.F.L. 1975. Repeated load triaxial testing of a silty clay. *Geotechnique* 25: 95–114.
- Hyodo, M., Yamamoto, Y. Sugiyama, M., 1970. Undrained cyclic shear behaviour of clay with initial static shear stress. *WIT Transactions on the Built Environment* 3: 299–313.
- Malla, R.B., Joshi, S., 2007. Resilient modulus prediction models based on analysis of LTPP data for subgrade soils and experimental verification. *J. Transp. Eng.* 133: 491–504.
- Melan, E. 1936. Theorie statisch unbestimmter systeme aus ideal-plastischem baustoff. *Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. Wien* 2A: 195–218.
- Monismith, C.L., Ogawa, N., Freeme, C.R. 1975. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading. In: 54th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington District of Columbia, Transportation Research Record, Vol. 537, pp. 1–17.
- Li, D., Selig, E.T. 1996. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils. *J. Geotech. Eng.* 122: 1006–1013.

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จของการอนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ของการประปานครหลวง

Factors Affecting the Success of Permit Consideration of Water Piping Work from viewpoint of Authorities in the Bangkok Province of Metropolitan Waterworks Authority (MWA)

วิจิตรา โสมสูงเนิน^{a,*}, วีระเกษตร สวนผกา^b

Wijitra Somsungnoen^{a,*}, Weerakaset Suanpaga^b

^aภาควิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bรองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ 10900

^aInfrastructure Engineering and Management, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

^bAssociate professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

*Corresponding author. E-mail address: wijitra.so@ku.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จในการดำเนินการขออนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ของการประปานครหลวง ด้วยการส่งแบบสอบถามไปยังผู้บริหารหน่วยงาน ผู้อำนวยการ วิศวกร นายช่างโครงการ และช่าง ของหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ได้แก่ สำนักการโยธา สำนักการระบายน้ำ สำนักงานเขต กรมชลประทาน กรมทางหลวง กรมเจ้าท่า กรมทางหลวงชนบท เอกชน จำนวน 200 ตัวอย่าง นำไปประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้ค่าสถิติพีการณาพร้อมวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) และนำผลการวิเคราะห์มาจัดระดับความสำคัญ การวิจัยพบว่า ปัจจัยด้านบุคคลและนโยบาย มีค่าองค์ประกอบน้ำหนัก (Factor Loading) สูงที่สุดเท่ากับ 0.98 ประกอบด้วย 5 ตัวแปร รองลงมาเป็นปัจจัยด้านสถานที่ ค่าองค์ประกอบน้ำหนัก (Factor Loading) เท่ากับ 0.91 ประกอบด้วย 4 ตัวแปรและปัจจัยด้านการออกแบบ ค่าองค์ประกอบน้ำหนัก (Factor Loading) ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.73 ประกอบด้วย 3 ตัวแปร

คำสำคัญ: การขออนุญาต, ท่อประปา, องค์ประกอบเชิงยืนยัน

Abstract

The Objective of this research was to identify factors affecting the Success of Permit Consideration of water piping work from viewpoint of authorities in the Bangkok Province of Metropolitan Waterworks Authority (MWA) the sample of this research was 200 of Project's manager in the authorized area to analyze statistical data by using Confirmatory Factor Analysis (CFA). The findings were as follows: CFA indicated that the three elements of the model. The factor loadings ranking were personnel and policy factors the highest factor loading is 0.98, consisting of 5 variables. Location factor where factor loading is 0.91, consists of 4 variables and design factors. The lowest factor loading factor is 0.73, consisting of 3 variables.

Keywords: CFA, Permit Consideration, Water Piping

คำนำ

ทรัพยากรน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และเป็นปัจจัยพื้นฐานของโครงสร้างพื้นฐานในการบริหารประเทศ ความเพียงพอของทรัพยากรน้ำนำมาซึ่งความสุข ความพึงพอใจในชีวิต ตอบสนองความต้องการขั้นต่ำสุดของมนุษย์ รวมทั้งเพียงพอที่จะบรรเทาความเสี่ยงอันเกิดจากน้ำที่กระทบกับประชาชน สิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ นอกจากนี้จะเป็นปัจจัยพื้นฐานแล้ว ทรัพยากรน้ำยังถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตที่สำคัญ ในภาคการเกษตร อุตสาหกรรม บริการและรักษาระบบนิเวศน์ (Grey and Sadoff, 2007)

นอกจากนี้ประชาชนทุกคนสามารถเข้าถึงน้ำที่สะอาด ปลอดภัย ในปริมาณเพียงพอ โดยมีค่าใช้จ่ายในระดับราคาที่สมารถจ่ายได้ เพื่อให้ชีวิตมีสุขอนามัย และมีคุณภาพชีวิตที่ดี ในขณะที่เดียวกันสิ่งแวดล้อมที่รับรู้ก็ได้รับการปกป้องรักษา โดยมีความสำคัญเชื่อมโยงกับความมั่นคงด้านต่าง ๆ เช่น ความมั่นคงด้านอาหาร พลังงาน สิ่งแวดล้อม รวมทั้งน้ำยังช่วยลดความยากจน และนำมาสู่การพัฒนาและความมั่งคั่งของประเทศได้ (Global Water Partnership, 2010)

การประปานครหลวงเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจในสังกัดกระทรวงมหาดไทย ที่มีอำนาจหน้าที่ตามพระราชบัญญัติการประปานครหลวง พ.ศ. 2510 โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการสำรวจ จัดหาแหล่งน้ำดิบ จัดให้ได้มาซึ่งน้ำดิบเพื่อใช้ในการประปาเพื่อดำเนินการผลิต จัดส่ง และจำหน่ายน้ำประปาในเขตท้องที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ ดำเนินการควบคุมมาตรฐานเกี่ยวกับระบบประปาเอกชนในเขตท้องที่ดังกล่าว ดำเนินธุรกิจอื่นที่เกี่ยวข้องเนื่องกันหรือเป็นประโยชน์แก่การประปา โดยคำนึงถึงประโยชน์ของรัฐและประชาชน (การประปานครหลวง, 2559)

การให้บริการน้ำประปาเริ่มต้นจากการจัดตั้งโครงการงานสัญญา ทำการสำรวจและออกแบบวางระบบส่งและจ่ายน้ำ โดยที่ก่อนจะนำไปสู่ขั้นตอนการประมาณราคาและจัดประกวดราคาหรือให้เสนอราคาแก่ผู้รับจ้างนั้น จำเป็นจะต้องมีการขออนุญาตจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่หรือหน่วยงานผู้ดูแลพื้นที่

หนึ่งในขั้นตอนที่ทำให้แผนการดำเนินงานล่าช้า และไม่สามารถดำเนินการไปยังขั้นตอนต่อไปได้ คือการขออนุญาตกรรมสิทธิ์ที่ดินจากเจ้าของพื้นที่ หากเจ้าของพื้นที่ไม่อนุญาต ส่งผลให้ต้องมีแก้ไขวิธีการวางท่อให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ของหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ รวมไปถึงอาจยกเลิกเส้นทาง ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งด้านทรัพยากร เงินเวลา ซึ่งส่งผลกับแผนการดำเนินงานปีงบประมาณที่ล่าช้าไป

การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จในการวางท่อประปา หากผลการพิจารณาตรงตามปัจจัยจะส่งผลให้ขั้นตอนการพิจารณาขออนุญาตนั้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว ลดความล่าช้าในขั้นตอนการดำเนินงานให้อยู่แผนการดำเนินงาน ลดความเสี่ยงในการยกเลิกงานสัญญาในกรณีไม่อนุญาตให้เข้าดำเนินการจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ รวมไปถึงลดการสูญเสียทรัพยากรคน แรงงาน เงินและเวลา อีกทั้งยังสามารถเข้าดำเนินการแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนของประชาชนได้อย่างรวดเร็ว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิเคราะห์ปัจจัย และจัดระดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จในการดำเนินการขออนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่อยู่ในความรับผิดชอบของการประปานครหลวง

ขอบทวนวรรณกรรม

ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาขออนุญาตวางท่อประปาในมุมมองของหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ หากสามารถดำเนินการได้ตรงกับปัจจัยก็จะส่งผลให้การพิจารณาเป็นไปอย่างรวดเร็ว สามารถดำเนินการไปได้ตรงตามแผนงานที่กำหนด

ลดความเสี่ยงในการยกเลิกงานในกรณีที่หน่วยงานเจ้าของพื้นที่พิจารณาแล้วไม่อนุญาตให้เข้าดำเนินการหรือใช้ระยะเวลาในการพิจารณานานเกินไปไม่สามารถแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนของประชาชนได้ทันท่วงที (สาริต, 2554)

ผู้วิจัยจึงต้องการค้นหาเกณฑ์การขออนุญาตว่ามีปัจจัยใดบ้างที่อาจส่งผลกระทบต่อการขออนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ของการประปานครหลวง โดยจัดเรียงระดับความสำคัญจากมากไปน้อย เพื่อเป็นแนวทางในการลดการเกิดสาเหตุปัจจัยดังกล่าว โดยกำหนดกรอบแนวความคิดการวิจัย ดังแสดงใน Fig.1

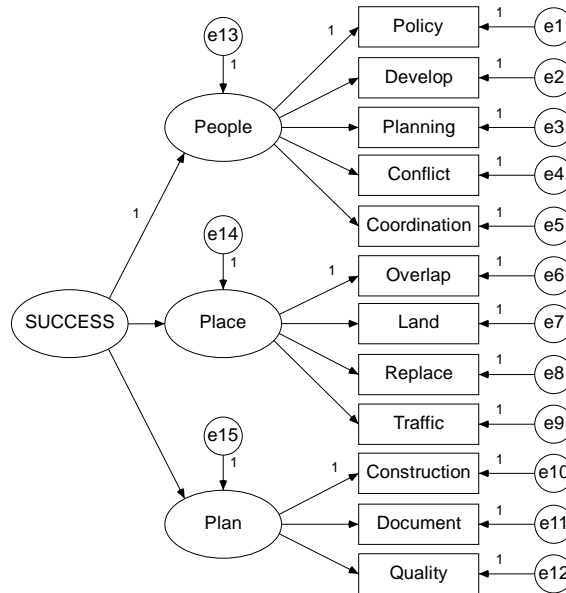


Fig. 1 Second-order factor model of Factors Affecting the Success of Permit Consideration of Water Piping Work

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นวิธีการวิจัยเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จของการขออนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ของการประปานครหลวง ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis : CFA) เป็นการยืนยันความสัมพันธ์ถึงตัวแปรว่ามีอิทธิพลต่อปัจจัยที่สร้างขึ้นหรือไม่ โดยสร้างคำถามและใช้ตัวแปร (Observed Variable) เพื่อให้สะท้อนปัจจัยแฝง (Latent Variable) สำหรับการสร้างตัวโมเดลสมมติฐาน ซึ่งเป็นการรวบรวมข้อมูล แล้วประมวลผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์หาค่าทางสถิติต่อระดับความสำคัญของปัจจัย

การเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

จากการสัมภาษณ์ผู้ที่ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ตรงกับปัจจัยที่ทำการศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นการตอบคำถามเกี่ยวกับข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา หน้าที่การทำงาน ในส่วนงานที่มีผลต่อการขออนุญาต หน่วยงานที่ท่านทำงานอยู่ในสังกัดใด ประสบการณ์การทำงาน จำนวนโครงการก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับงานวางท่อจ่ายน้ำประปาที่ท่านมีส่วนร่วม ส่วนที่ 2 เป็นการตอบคำถามเกี่ยวกับความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถาม จะมีลักษณะมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ส่วนที่ 3 เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับข้อเสนอแนะ

การหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามที่สร้างขึ้นสำหรับการวิจัย ให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบคุณภาพ ความเหมาะสมของสำนวนภาษาที่ใช้ ความถูกต้องของเนื้อหา โดยมีการหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ดังนี้

วิธีคำนวณหาดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ (Item Objective Congruence: IOC)

$$\text{(Equation 1):} \quad \text{IOC} = \frac{\sum R}{N} \quad (1)$$

เมื่อ $\sum R$ = ผลรวมของคะแนนผลการตัดสินในข้อคำถามนั้นจากผู้เชี่ยวชาญ

N = จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

เกณฑ์การตัดสินดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ (IOC)

ถ้า $\text{IOC} > 0.50$ ถือว่า สอดคล้องกับเนื้อหา ถ้า $\text{IOC} < 0.50$ ถือว่า ไม่สอดคล้องกับเนื้อหา

การทดสอบคุณภาพแบบสอบถาม

ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามที่สร้างขึ้นสำหรับกรวิจัยไปทดสอบความเที่ยงตรงและความเชื่อมั่น ดังนี้

1. การหาความเที่ยงตรง (Validity) โดยนำแบบสอบถามที่สร้างขึ้นไปเสนออาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาของคำถามว่าตรงตามจุดประสงค์ของการวิจัยหรือไม่ และนำมาแก้ไขปรับปรุงเพื่อดำเนินการในขั้นต่อไป

2. การหาความเชื่อมั่น (Reliability) ผู้วิจัยได้หาความเชื่อมั่นโดยนำแบบสอบถามไปทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างผู้ตอบแบบสอบถามเดียวกันกับกลุ่มผู้ตอบจริง โดยใช้แบบสอบถามจำนวน 30 ชุด นำมาวิเคราะห์หาความเชื่อมั่น โดยใช้สูตรสัมประสิทธิ์แอลฟา (Alpha Coefficient) ของครอนบาช (Cronbach, 2003: 204) แล้วจึงนำมาแก้ไขปรับปรุงเพื่อดำเนินการในขั้นต่อไป

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้กำหนดกลุ่มประชากรในการวิจัย คือ ผู้บริหารหน่วยงาน ผู้อำนวยการ วิศวกร นายช่างโครงการ ช่าง ของหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ได้แก่ สำนักการโยธา สำนักการระบายน้ำ สำนักงานเขต กรมชลประทาน กรมทางหลวง กรมเจ้าท่า กรมทางหลวงชนบท เอกชน ในส่วนที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับงานวางท่อจ่ายน้ำประปา จำนวน 8 หน่วยงาน กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงคำนวณขนาดตัวอย่าง จากสูตรการคำนวณกรณีที่ไม่ทราบจำนวนที่แน่นอน (Infinite Population) ควรจะต้องกำหนดค่า P ไม่ต่ำกว่า 50% ขนาดของกลุ่มตัวอย่างจึงจะอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้ (ธานินทร์, 2560) ดังนั้นผู้วิจัยกำหนดความต้องการของขนาดตัวอย่างที่ 50% หรือ 0.50 จากประชากรทั้งหมด ค่าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่าง 0.05 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร (Equation 2) ดังนี้

$$n = \frac{P(1-P)(Z)^2}{e^2} \quad (2)$$

เมื่อ n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

P = ขนาดของประชากร

e = ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้

Z = ค่าระดับความเชื่อมั่น

ทำให้สามารถคำนวณกลุ่มตัวอย่างได้เท่ากับ 384 แต่เมื่อพิจารณาขนาดกลุ่มตัวอย่างจากแนวคิด อัตราส่วนของกลุ่มตัวอย่างกับจำนวนพารามิเตอร์หรือตัวแปรสังเกตได้ เท่ากับ 10–20 ต่อ 1 พารามิเตอร์หรือตัวแปรสังเกตได้ (Osborne & Costello, 2004) ซึ่งกรอบแนวคิดการวิจัยมีตัวแปรสังเกตได้จำนวน 12 ตัวแปร ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้จึงต้องการขนาดกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 120–340 ทั้งนี้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สมการโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM) เนื่องจากการใช้โปรแกรม AMOS โดยส่วนใหญ่ผู้เชี่ยวชาญมักจะใช้วิธีการประมาณค่าความเป็นไปได้สูงสุด (Maximum Likelihood : ML) ดังนั้นหากใช้วิธี ML แล้ว มีข้อเสนอแนะว่า จำนวนของกลุ่มตัวอย่างควรใช้

อย่างต่ำประมาณ 100–200 ชุดตัวอย่าง และไม่ควรมีน้อยกว่า 100 ตัวอย่าง เนื่องจากขนาดตัวอย่างที่น้อยเกินไป จะไม่เพียงพอในการวิเคราะห์ข้อมูล (Hair et al., 2019)

การวิเคราะห์ข้อมูล

จากข้อมูลที่เกิดขึ้นรวบรวมได้จะถูกนำมาตรวจสอบความเรียบร้อย และความสมบูรณ์ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการประมวลผล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Window version 20.0 และ AMOS version 16.0

ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SPSS for Window

1. การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Analysis) อธิบายลักษณะข้อมูลทั่วไปโดยนำข้อมูลที่รวบรวมได้ มาวิเคราะห์หาค่าทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่าร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Means) ค่าความถี่ (Frequency Distribution) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) การวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จของการอนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ของการประปานครหลวง โดยใช้เครื่องมือเป็นแบบสอบถามปลายปิด ซึ่งมีลักษณะมาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale) มี 5 ระดับ

ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม AMOS (Analysis of Moment Structure)

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) โดยใช้โปรแกรม AMOS เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) กับปัจจัยแฝง (Latent Variable) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแฝงกับปัจจัยแฝงเพื่อพิสูจน์โมเดลสมมติฐาน โดยดัชนีที่ใช้ตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลกับข้อมูลเชิงประจักษ์ที่นิยมใช้สรุปได้ (Hair, et al., 2019) โดยใช้โมเดลการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันลำดับที่สอง (Second Order Confirmatory Factor Analysis) เพื่อตรวจสอบยืนยันความสอดคล้องผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจตามทฤษฎีกับข้อมูลเชิงประจักษ์ และทำการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย (กัลยา, 2562) โมเดลปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จของการอนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ของการประปานครหลวง แสดงดัง Fig. 1

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยเรื่องปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จของการอนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ของการประปานครหลวง ที่ผู้ศึกษาได้ทำการรวบรวมข้อมูลของแบบสอบถามจากกลุ่มเป้าหมาย แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และพิจารณาผล โดยใช้โปรแกรม SPSS for Window version 20.0 และโปรแกรม AMOS (Analysis of Moment Structure) version 16.0 มาช่วยในการวิเคราะห์ผลการศึกษา

1. การหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผลการประเมินตามดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ (Item Objective Congruence: IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 5 คน พบว่า แบบสอบถามในส่วนที่ 1 (ข้อ 1–7) ข้อคำถามนั้นสอดคล้องกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ ส่วนที่ 2 (ข้อ 5) ข้อคำถามนั้นสอดคล้องกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ (ข้อ 1–4) ข้อคำถามนั้นวัดไม่ได้ ไม่สอดคล้องกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขแบบสอบถามตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ และนำเสนออาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ก่อนนำไปใช้ทดลองสำรวจกลุ่มเป้าหมาย 30 ชุด

2. การหาค่าความเชื่อมั่นและอำนาจจำแนก

ผลการทดสอบความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบสอบถาม สุ่มจากกลุ่มเป้าหมาย 30 ชุด นำผลที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา (Alpha Coefficient) โดยผลการวิเคราะห์ความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบสอบถาม ผลการทดสอบพบว่า ความเชื่อมั่นภาพรวมเท่ากับ 0.861 ถือว่าเป็นค่าความเชื่อมั่นที่ดี และค่า Corrected Item-Total Correlation ใช้ในการพิจารณาหาค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถามทั้งชุด และใช้เป็นตัวบอกถึงค่าอำนาจจำแนก (Discrimination) ของข้อคำถามในแต่ละข้อด้วย ซึ่งผลจากการหาค่าอำนาจจำแนก เป็นรายชื่อของแบบสอบถามในการวิจัยครั้งนี้มีค่าระหว่าง 0.433–0.645 (ค่าอำนาจจำแนกรายข้อไม่ควรต่ำกว่า 0.300)

3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน

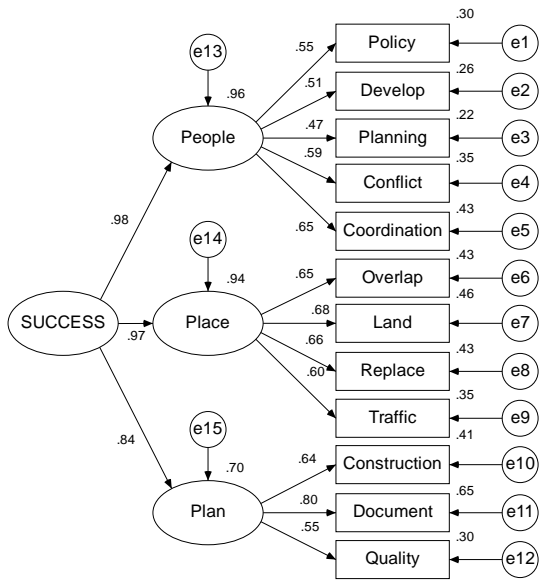
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis) ของกลุ่มตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของการอนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ของการประสานครหลวง ดังแสดงใน Fig. 2 หากพิจารณาตามเกณฑ์ที่เหมาะสมในการยอมรับโมเดลหนึ่ง ๆ แล้ว จะพบว่าโมเดลนี้ยังเป็นโมเดลที่ยังไม่เหมาะสม ทั้งนี้หากพิจารณาค่า Factor Loading ที่ปรากฏบนแต่ละเส้นของปัจจัยแฝงทั้ง 3 ปัจจัยแล้ว จะพบว่าเมื่อตรวจสอบความกลมกลืนของโมเดลด้วยสถิติ Chi-Square หรือ CMIN=77.025 และค่า p -value=0.011 น้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติ จะสรุปว่าโมเดลไม่มีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ แต่เมื่อศึกษาสถิติ CMIN/DF = 1.510 (ต่ำกว่า 2 มีความกลมกลืน), ค่า TLI=0.949, CFI=0.960, GFI =0.943 (ระหว่าง 0.900-0.950 มีความกลมกลืนพอใช้ได้), RMR=0.023 (เข้าใกล้ศูนย์มีความกลมกลืน) และ RMSEA=0.051 (ระหว่าง 0.050-0.080 มีความกลมกลืน) สรุปว่าโมเดลมีความกลมกลืน ทั้งนี้จากการวิเคราะห์พบว่าโมเดลที่ได้จาก Fig.2 เป็นโมเดลที่สามารถปรับให้เป็นโมเดลที่เหมาะสมได้ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงถึง ค่าน้ำหนักของปัจจัย ที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จในการขออนุญาตวางท่อประปาในระดับที่ดีขึ้นอย่างแท้จริง ดังนั้น จึงปรับโมเดลโดยลากเส้นเชื่อมที่ค่าแปรปรวนร่วม เริ่มจากค่าแปรปรวนร่วมที่มีค่ามากที่สุดที่จะทำให้ค่า Chi-Square ลดลงมากที่สุด โดยที่การเชื่อมร่วมกันนั้นต้องเป็นเหตุเป็นผลกัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับโมเดล (Model Modification) โดยพิจารณาจากคำแนะนำในการปรับพารามิเตอร์ในโมเดลด้วยค่าดัชนีปรับโมเดล (Model Modification Indices: MI) ที่มีค่าพารามิเตอร์มากที่สุด ในการเลือกลดตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันบางตัวออกไป และใช้วิธีการเชื่อมเส้นลูกศร (Silpcharu, 2014) โดยยินยอมให้ผอนคลายข้อตกลงเบื้องต้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์กันได้จนกระทั่งค่าดัชนีความกลมกลืนมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ แสดงว่า โมเดลที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลเชิงประจักษ์ Chi-Square หรือ CMIN ลดลงเหลือ 53.749, p -value=0.232 (มากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ), CMIN/DF = 1.144 (ต่ำกว่า 2 มีความกลมกลืน), TLI=0.986, CFI=0.990, GFI=0.958 (ค่า 0.950 มีความกลมกลืนดี), RMR=0.020 (เข้าใกล้ศูนย์มีความกลมกลืน) และ RMSEA=0.027 (ต่ำกว่า 0.05 มีความกลมกลืนดี) สามารถแสดงผลการวิเคราะห์แต่ละองค์ประกอบ ดังแสดงใน Fig.3

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

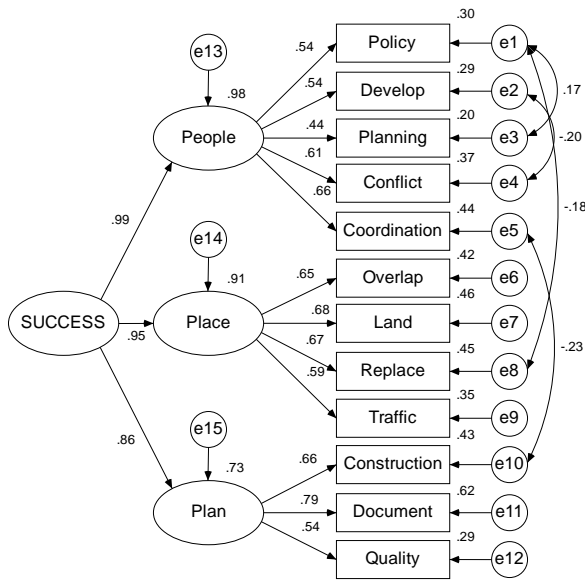
การวิเคราะห์และทดสอบสมมติฐานการวิจัย ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Survey Research) โดยใช้โปรแกรม SPSS for Window และโปรแกรม AMOS (Analysis of Moment Structure) สรุปได้ว่าองค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis) ของโมเดลปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของการอนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร มีความสอดคล้องกลมกลืนกับเชิงประจักษ์ จึงยอมรับสมมติฐานและมีระดับความสำคัญ โดยปัจจัยด้านบุคคลและนโยบาย (People) มีค่าองค์ประกอบน้ำหนัก (Factor Loading) สูงที่สุด

เท่ากับ 0.98 รองลงมาเป็นปัจจัยด้านสถานที่ (Place) ค่าองค์ประกอบน้ำหนัก (Factor Loading) เท่ากับ 0.91 และปัจจัยด้านการออกแบบ (Plan) ค่าองค์ประกอบน้ำหนัก (Factor Loading) ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.73 ตามลำดับ ดังนี้



Chi-square=77.025, df=51, p=.011
CMIN=1.510, GFI=.943, RMSEA=.051

Fig. 2 Result of Amos standardized Estimate Model



Chi-square=53.749, df=47, p=.232
CMIN=1.144, GFI=.958, RMSEA=.027

Fig. 3 Result of Amos standardized Estimate Model (Adjust)

1. ปัจจัยด้านบุคคลและนโยบาย เมื่อพิจารณาค่าระดับความสำคัญในแต่ละตัวแปร พบว่า การขาดการติดต่อประสานงาน รวมถึงความร่วมมืออันดีกันระหว่างหน่วยงาน อยู่ในเกณฑ์มากที่สุด (0.44) ซึ่งระดับความสำคัญรองลงมาคือ ความขัดแย้งกันระหว่างบุคลากรของหน่วยงาน /ความสัมพันธ์ส่วนตัวไม่ตรงกัน (0.37) ความแตกต่างของข้อกำหนด/มาตรฐาน/นโยบายของหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ (0.30) แผนพัฒนาและปรับปรุงสาธารณูปโภคขัดแย้งกัน (0.29) และไม่มี ความจำเป็นเร่งด่วนและเป็นโครงการที่ทำเพื่อรองรับอนาคต (0.20) ตามลำดับ

2. ปัจจัยด้านสถานที่ เมื่อพิจารณาค่าระดับความสำคัญในแต่ละตัวแปร พบว่า ดิถกรรมสิทธิที่ดินหรือมีพื้นที่ทับซ้อนในเขตพื้นที่เอกชน อยู่ในเกณฑ์มากที่สุด (0.46) ซึ่งระดับความสำคัญรองลงมาคือ หน่วยงานเจ้าของพื้นที่ต้องการให้วางท่อประปาที่ทำกรหรือย้ายในแนวท่อเดิม (0.45) พื้นที่ที่ทำการก่อสร้าง ทับซ้อนในแนวเดียวกับระบบสาธารณูปโภคใต้ดินอื่น ๆ (0.42) ความหนาแน่นของการจราจร/ประชากรอยู่อย่างหนาแน่นในบริเวณที่ขออนุญาต (0.35) ตามลำดับ

3. ปัจจัยด้านการออกแบบ เมื่อพิจารณาค่าระดับความสำคัญในแต่ละตัวแปร พบว่า เอกสารแบบแปลนที่ใช้ขอ อนุญาต มีรายละเอียดข้อมูลไม่ครบถ้วน/ไม่ตรงกับสภาพหน้างานจริง สภาพหน้างานเปลี่ยนไปจากเดิม อยู่ในเกณฑ์มากที่สุด (0.62) ซึ่งระดับความสำคัญรองลงมาคือ รูปแบบก่อสร้างไม่เหมาะสม/ไม่ชัดเจน แนววางท่อเป็นอุปสรรคต่องานอื่น ๆ ของหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ (0.43) คุณภาพงานซ่อมผิวคืบสภาพของงานก่อนหน้าไม่ได้มาตรฐาน ส่งผลให้การพิจารณา ในครั้งต่อไปด้วย (0.29) ตามลำดับ

หากพบว่าการขออนุญาตวางท่อประปาที่มีปัจจัยข้อใดข้อหนึ่งข้างต้น ก็จะมีโอกาสและความเสี่ยงที่อาจจะไม่ได้ รับอนุญาตจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่หรือได้รับอนุญาตล่าช้าและหากมีข้อปัจจัยที่มีค่าระดับความสำคัญยิ่งยงอาจ ส่งผลให้การขออนุญาตไม่ผ่านมากด้วย ส่งผลต่อแผนงานที่กำหนดไว้หรือกระทบต่อแผนการเบิกจ่ายงบประมาณของ

หน่วยงาน ซึ่งนอกจากการประสานครหลวงจะใช้วิธีในการตรวจสอบข้อกำหนดของหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ รวมไปถึงการสำรวจและประสานงานข้อมูลก่อนการออกแบบแล้วก็ตาม ก็อาจเกิดข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้ การเพิ่มการจัดทำ Checklist เอกสารการขออนุญาตให้พิจารณาการก่อสร้างวางท่อประปา และการปรับเปลี่ยนรูปแบบการก่อสร้างให้สามารถยืดหยุ่นต่อพื้นที่หน้างานได้หลากหลายมากขึ้น อาจทำให้ข้อผิดพลาดในการขออนุญาตลดลงได้

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

ในการทำการวิจัยครั้งต่อไปควรทำการวิจัยในการหาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสมหรือเทคนิคในการวางท่อประปา รูปแบบใหม่ นำมาแก้ปัญหาข้างต้น เพื่อให้เกิดความพึงพอใจร่วมกันทั้งผู้ขออนุญาตและหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ แนวคิดการวิจัย อีกทั้งเพื่อน ๆ และเจ้าหน้าที่โครงการปริญญาโทวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน และการบริหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคุณพ่อคุณแม่ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดทุกเรื่อง

เอกสารอ้างอิง

การประสานครหลวง. เกี่ยวกับการประสานครหลวง ประวัติ ภาระหน้าที่ของการประสานครหลวง. แหล่งที่มา:

http://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=1624&filename=about_us, 29 พฤษภาคม 2559.

กัลยา วานิชย์. 2562. การวิเคราะห์สมการโครงสร้าง (SEM) ด้วย (AMOS). พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพมหานคร. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธานินทร์ ศิลป์จารุ. 2560. การวิจัยและการวิเคราะห์สถิติด้วย SPSS. พิมพ์ครั้งที่ 17. กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

สาธิต สิทธิ. 2554. การศึกษาปัจจัยในการพิจารณาอนุญาตวางท่อประปาจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ ในเขตพื้นที่สำนักงานประปาสาขาสมุทรปราการ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุทธิ คงประสาธ. 2559. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จในการดำเนินงานก่อสร้างโครงการบูรณะทางหลวงสายหลัก ทางหลวงหมายเลข 35. การศึกษาค้นคว้าอิสระ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Cronbach, L.J. 2003. Essential of psychology testing. New York, Hanper Collins.

Global Water Partnership. Global Water Security: Submission by the Global Water Partnership to ICE/RAE/CIWEM Report to Professor John Beddington. Chief Scientific Adviser to HM Government.

Grey, D. Sadoff, C. 2007. Sink or Swim? Water Security for Growth and Development. Water Policy.

Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E. 2019. Multivariate data analysis. 8th Ed. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice Hall.

Silpcharu, T. 2014. Research and Statistic Information Analysis by SPSS and Amos. Public Company Limited. Bangkok se-education, Thailand.

Osborne, J. W. , Costello, A. B. 2004. Sample size and subject to item ratio in principal components analysis. Practical Assessment. Research and Evaluation.

การนำวัสดุเหลือทิ้งจำพวกกระเบื้องเซรามิกมาผสมหินคลุกเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง

The mixture of crushed rocks with abundant ceramic tiles in order to use as base's materials

กฤต อินทรกุล*, ก่อโชค จันทวารังกูร, วีระเกษตร สวนผกา

Krit Intarakul*, Korchoke Chantawarangul, Weerakaset Suanpaga

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

Corresponding author. E-mail address: krit_grit@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งจำพวกกระเบื้องเซรามิกจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังคา จังหวัดสระบุรี มาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางโดยผสมแทนที่หินคลุก ในอัตราส่วน ร้อยละ 0, ร้อยละ 10, ร้อยละ 20, ร้อยละ 30, ร้อยละ 40 และ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ผลการศึกษาพบว่า กระเบื้องเซรามิกที่ผสมแทนที่หินคลุกมีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม กระเบื้องเซรามิกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ร้อยละการผ่านตะแกรงเพิ่มขึ้น ร้อยละความสึกหรอของวัสดุมากขึ้น ค่า C.B.R. ลดลง ความหนาแน่นแห้งลดลง และความชื้นที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์กำหนดวัสดุชั้นพื้นทางสามารถนำไปใช้งานก่อสร้างได้ และต้นทุนในงานก่อสร้างยังถูกกว่าอัตราส่วนผสมที่มีแต่หินคลุก สรุปได้ว่าวัสดุเหลือทิ้งจำพวกกระเบื้องเซรามิก สามารถนำมาใช้แทนที่หินคลุกในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง โดยต้องใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จึงจะผ่านเกณฑ์การทดสอบวัสดุงานทาง การนำกระเบื้องเซรามิกมาแทนที่หินคลุกนอกจากจะลดต้นทุนการก่อสร้างได้แล้ว ยังเป็นการลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

คำสำคัญ: กระเบื้องเซรามิก, คุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท, หินคลุก

ABSTRACT

This research studies the use of abundant ceramic tiles, which is waste from a roof manufacturing factory in Saraburi Province, to mix with crushed rocks for the final use as Base's materials. The mixture portion are 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50%, by weight. The experiment tests the engineering properties under the Standard of Department of Rural Roads. The result appears that the portion of ceramic tiles effects the engineering properties. The more portion of ceramic tiles increases %passing and %LA. However, it decreases C.B.R. and dry density value while it only effects minor change in the optimum moisture content value. In addition, the mixture portion of 10% meets the standard and can be used in base construction. Moreover, the cost is lower than pure crushed rock. In conclusion, the abundant ceramic tiles can be used to replace crushed rocks as Base's material provided that the portion of the ceramic tiles to mix shall meet the Standard. The use of ceramic tiles will not only save cost of construction but also save the environment.

Keywords: Abundant Ceramic Tiles, Crush Rocks, Properties of the ceramic tiles according to the Standard of Department of Rural Roads

คำนำ

ปัจจุบันการคมนาคมมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศทั้งทางบก ทางน้ำ และทางอากาศ โดยเฉพาะการขนส่งทางบกเป็นการคมนาคมที่จำเป็นต่อการของการขยายตัวทางเศรษฐกิจ การขนส่งทางบกที่พบแพร่หลาย ได้แก่ การขนส่งทางราง และการขนส่งทางถนน ซึ่งถือเป็นหัวใจหลักในการขนส่งทางบก รัฐบาลได้ให้ความสำคัญกับการสร้างถนนหรือทาง และได้จัดสรรงบประมาณเพื่อใช้ในการก่อสร้างและซ่อมบำรุงรักษาถนนในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการใช้งานถนนประกอบด้วย ปริมาณยานพาหนะ สภาพแวดล้อม และคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้าง การศึกษาทดลองเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างทางอาจนาไปสู่การค้นพบวัสดุที่มีคุณภาพดีกว่า หรือการนำวัสดุชนิดอื่นที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับวัสดุที่ใช้เดิม แต่สามารถหาซื้อได้ง่ายกว่า หรือมีราคาถูกกว่า มาใช้แทนที่วัสดุที่ใช้เดิม

หินคลุก (Crushed Rock) ได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการว่ามีคุณสมบัติในการนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทาง (Base's Materials) แต่ส่วนใหญ่หินคลุกที่นำมาใช้จะเป็นหินจำพวกหินปูน (Limestone) ซึ่งได้มาจากการระเบิดภูเขา จึงเท่ากับว่าการแสวงหาหินคลุกแต่ละครั้งย่อมเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อมไปด้วย ทั้งเรื่องฝุ่นและมลภาวะ ต่อมารัฐบาลได้ออกข้อบังคับเพื่อลดปริมาณการระเบิดภูเขา ทำให้หินคลุกคุณภาพดีหาได้ยากและมีราคาแพง ดังนั้นต้นทุนในการก่อสร้างทางจึงสูงขึ้นตามไปด้วย

ในขณะที่เดียวกันพบว่า มีวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมจำนวนมาก โดยเฉพาะจากอุตสาหกรรมการผลิตหลังคา กล่าวคือ กระเบื้องเซรามิกที่ไม่ผ่านการตรวจสอบการควบคุมคุณภาพจะถูกนำมาทิ้งและไม่ได้มีการนำกลับมาใช้ประโยชน์อีก จากข้อมูลของโรงงานอุตสาหกรรมหลังคารายหนึ่งในจังหวัดสระบุรี ระบุว่าในแต่ละปีมีปริมาณการผลิตกระเบื้องเซรามิกเฉลี่ย 60,000 ตัน/ปี ใช้พลังงานในการผลิต 146,000 กิกะจูล (GJ) มีกระเบื้องเซรามิกที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพประมาณร้อยละ 4 หรือ ประมาณ 2,400 ตัน/ปี ใช้พลังงานโดยเปล่าประโยชน์ 5,840 กิกะจูล (GJ) (โรงงานอุตสาหกรรมหลังคา จ.สระบุรี, 2563)

ผู้วิจัยตระหนักว่า หากนำกระเบื้องเซรามิกซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ปรับปรุงคุณภาพหินคลุกโดยนำมาผสมกับหินคลุกและใช้เป็นวัสดุก่อสร้างชั้นพื้นทางจะช่วยลดปัญหาสภาพแวดล้อมได้ เนื่องจากกระเบื้องเซรามิกที่เหลือทิ้งดังกล่าวมีจำนวนมากและไม่ใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างได้ เนื่องจากปัจจุบันหินคลุกเป็นวัสดุที่หาได้ยากและมีราคาแพง ดังกล่าวข้างต้นจึงนำไปสู่การวิจัยฉบับนี้ ซึ่งผู้วิจัยมุ่งทดสอบคุณสมบัติของกระเบื้องเซรามิกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมหลังคาโดยนำมาผสมกับหินคลุกเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง ทั้งนี้ผู้วิจัยจะใช้มาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุกของกรมทางหลวงชนบท (มทช. 203-2557) เป็นเกณฑ์ในการทดสอบ หากผลการวิจัยพบว่าวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าหินคลุก ย่อมสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมวัสดุพื้นทางได้ ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้จะนำไปสู่การประเมินผลเพื่อนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงหรือเป็นทางเลือกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัสดุ

1. นำกระเบื้องเซรามิกที่ไม่ผ่านคุณภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังคา เข้าเครื่องบดย่อยขนาด 30 ตัน/กะ บดกระเบื้องเซรามิกได้ขนาด 3-10 มม. และ ขนาด 10-30 มม. จำนวน 50 กก.
2. นำกระเบื้องเซรามิกมาผสมหินคลุกในอัตราส่วน 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60 และ 50:50 โดยน้ำหนัก

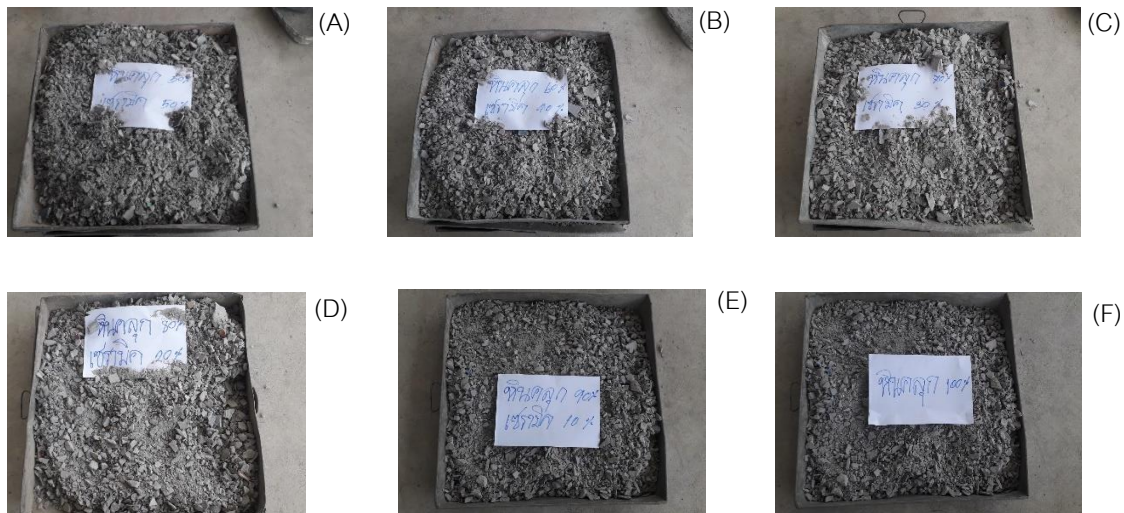


Fig. 1 Mixture of Crushed Rocks with Abundant Ceramic: (A) Crushed Rock 50% : Abundant Ceramic 50% ; (B) Crushed Rock 60% : Abundant Ceramic 40% ; (C) Crushed Rock 70% : Abundant Ceramic 30%; (D) Crushed Rock 80% : Abundant Ceramic 20% ; (E) Crushed Rock 90% : Abundant Ceramic 10%; (F) Crushed Rock 100% : Abundant Ceramic 0%

การทดสอบวัสดุ

- 1.หาขนาดคละของวัสดุ ตามมาตรฐานการทดสอบกรมทางหลวงชนบท รวมทั้งสิ้น 6 สัดส่วนผสม
- 2.ทดสอบความสึกหรอของวัสดุ Los Angeles Abrasion ทุกสัดส่วนผสม ทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท
- 3.ทดสอบ Compaction Test (Modified Proctor) เพื่อหาความหนาแน่นสูงสุดและปริมาณความชื้นทุกสัดส่วนผสม ตามมาตรฐานการทดสอบกรมทางหลวงชนบท
- 4.ทำการทดสอบหาค่า C.B.R. ตามมาตรฐานการทดสอบกรมทางหลวงชนบท
- 5.ศึกษาความคุ้มค่าในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางโดยคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมและราคาต้นทุน
- 6.วิเคราะห์ผลและประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง



Fig. 2 Sieve Analysis test



Fig. 3 Compaction test



Fig. 4 CBR test



Fig. 5 LA test

ความคุ้มค่าในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางโดยคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมและราคาต้นทุน

เปรียบเทียบราคาก่อสร้างระหว่างชั้นพื้นทางหินคลุกและหินคลุกผสมกระเบื้องเซรามิคโดยใช้หลักเกณฑ์และวิธีการกำหนดราคางานก่อสร้าง ตุลาคม 2560 กรมบัญชีกลาง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาคูณสมบัติของวัสดุมวลหินคลุกผสมกระเบื้องเซรามิคตามอัตราส่วนต่างๆ ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

1. การทดสอบขนาดคละของวัสดุมวลรวม ตาม Fig. 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุที่ผ่านตะแกรงกับขนาดของตะแกรง ได้ผลดังนี้ แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การผ่านตะแกรง (% passing) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของกระเบื้องเซรามิคมากขึ้น โดยอัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิคร้อยละ 0 : หินคลุกร้อยละ 100 , อัตราส่วนผสมวัสดุมวล

รวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 10 : หินคลุกร้อยละ 90 และอัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 20 : หินคลุกร้อยละ 80 มีขนาดคละอยู่ในเกณฑ์ทดสอบของมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท อัตราส่วนผสมอื่นๆ ไม่เข้าเกณฑ์ขนาดคละการทดสอบของมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท

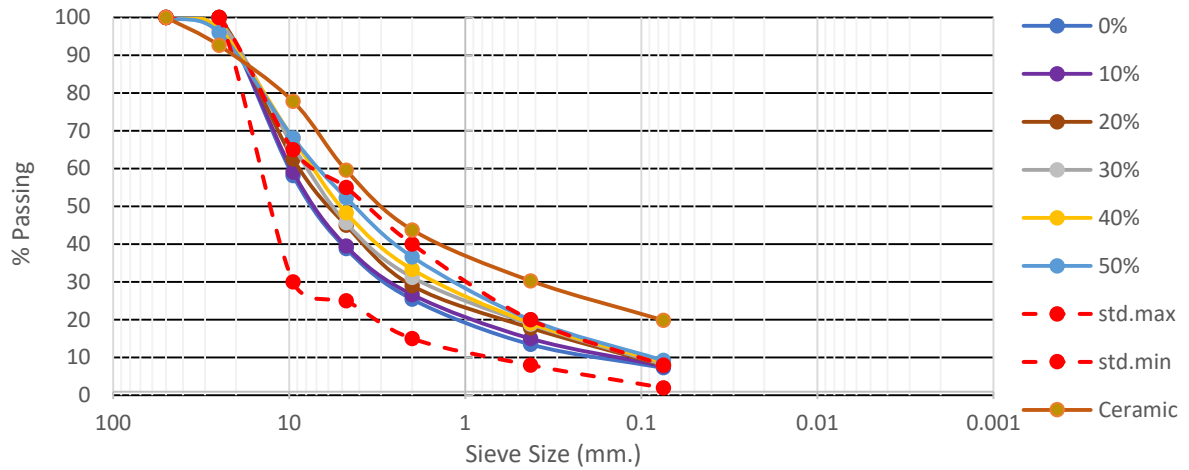


Fig. 6 Relationship with Percent Passing and Sieve Size

2. ความสึกหรอของวัสดุมวลรวม Los Angeles Abrasion Test โดยการหมุนเครื่อง Los Angeles Machine จำนวน 500 รอบ ตาม Fig. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Los Angeles และจำนวนรอบที่หมุน ได้ผลดังนี้ อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 0 : หินคลุกร้อยละ 100 มีน้ำหนักวัสดุค้างบนตะแกรงมากที่สุด 3,964 กรัม คิดเป็นค่า LA ร้อยละ 20.72 อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 10 : หินคลุกร้อยละ 90 มีน้ำหนักวัสดุค้างบนตะแกรง 3,671 กรัม คิดเป็นค่า LA ร้อยละ 26.58 และอัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 50 : หินคลุกร้อยละ 50 มีน้ำหนักวัสดุค้างบนตะแกรงน้อยที่สุด 3,044 กรัม คิดเป็นค่า LA ร้อยละ 39.12 โดยวัสดุมวลรวมระหว่างหินคลุกและกระเบื้องเซรามิกทั้ง 6 อัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณสมบัติวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบทซึ่งที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 40

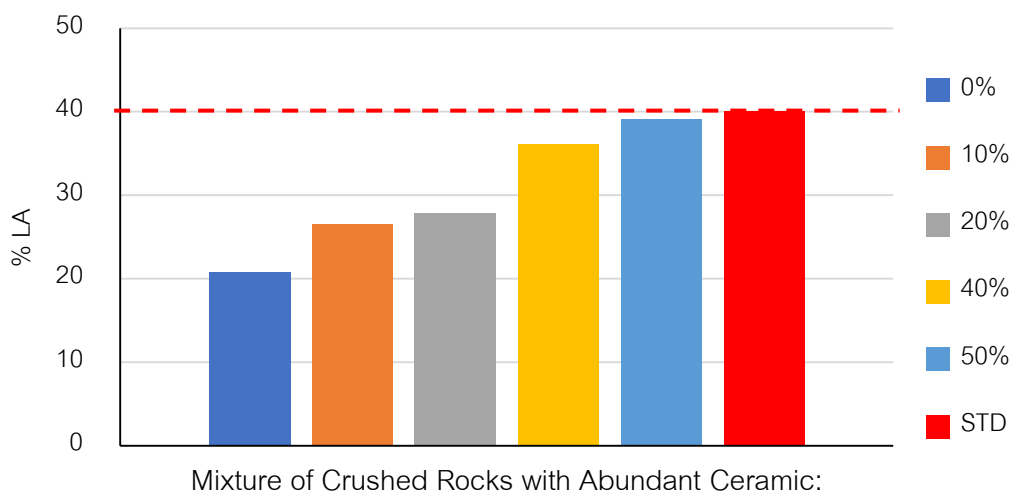


Fig. 7 Relationship with % LA and Mixture of Crushed Rocks with Abundant Ceramic

3. การทดสอบ Compaction Test (Modified Proctor) เพื่อหาความหนาแน่นสูงสุดและปริมาณความชื้นทุกสัดส่วนผสม ตาม Fig. 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นบดอัด ได้ผลดังนี้ อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 0 : หินคลุกร้อยละ 100 มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.366 kg/m³ มีค่าความชื้นในการบดอัดร้อยละ 5.55 และ อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 50 : หินคลุกร้อยละ 50 มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.054 kg/m³ มีค่าความชื้นในการบดอัดร้อยละ 10.03 โดยอัตราส่วนกระเบื้องเซรามิกที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ลดลง และค่าความชื้นในการบดอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก จากการทดสอบหาขนาดคละ เมื่อนำกระเบื้องเซรามิกมาผสมหินคลุกในอัตราส่วนต่างๆ ทำให้ขนาดคละเปลี่ยนไปจากหินคลุกร้อยละ 100 ปริมาณกระเบื้องเซรามิกมากขึ้น จะทำให้ขนาดคละมวลละเอียดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง

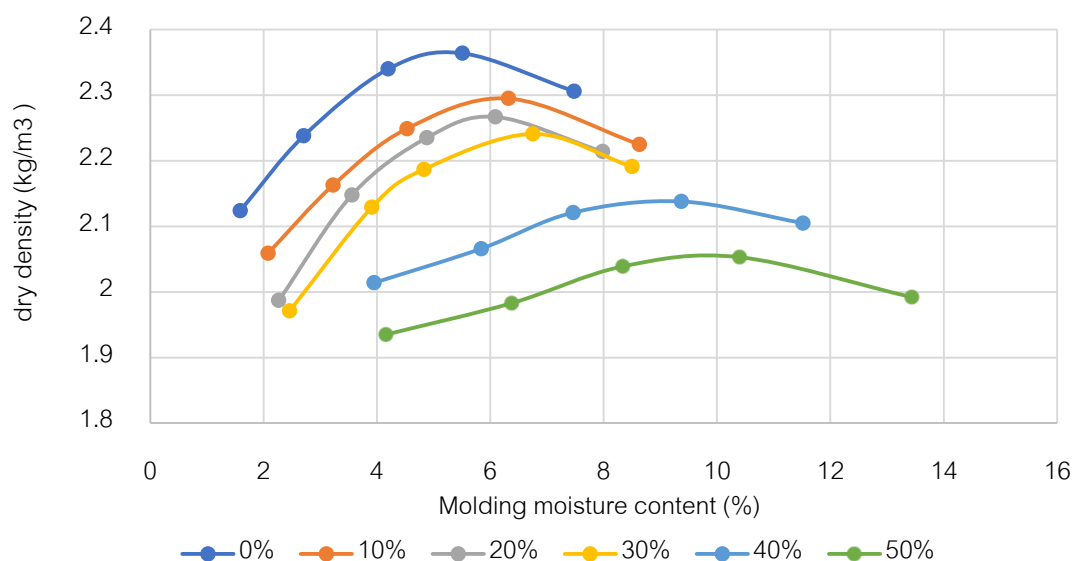


Fig. 8 Relationship with % Molding moisture content and Dry Density

4. การทดสอบ C.B.R. เป็นการทดสอบแรงเฉือนของดินที่บดอัดแน่นแล้ว ตาม Fig. 9 ซึ่งได้ผลดังนี้ อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกแต่ละส่วนผสมหลังการแช่น้ำ 4 วัน พบว่า อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิก ร้อยละ 0 : หินคลุกร้อยละ 100 และ อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิกร้อยละ 10 : หินคลุกร้อยละ 90 มีค่า C.B.R ร้อยละ 83.45 และ ร้อยละ 81.80 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ที่กำหนดไว้ร้อยละ 80 ส่วนอัตราส่วนอื่น ๆ มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 80 โดยปริมาณกระเบื้องเซรามิกที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า C.B.R น้อยลง เนื่องจาก จากการทดสอบความสึกหรอของวัสดุ ปริมาณกระเบื้องเซรามิกที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าความสึกหรอเพิ่มขึ้นแสดงถึงความแกร่งของวัสดุน้อยลง ประกอบกับการทดสอบ Compaction Test (Modified Proctor) ปริมาณกระเบื้องเซรามิกที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง ทำให้กำลังรับน้ำหนักแบกทานของวัสดุมีค่าลดลง

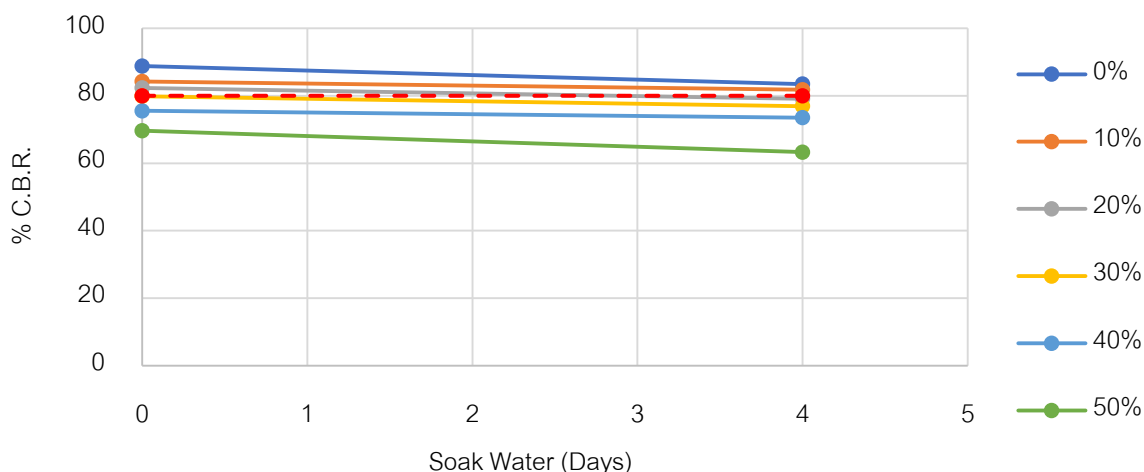


Fig. 9 Relationship with C.B.R. and Soak Water

ความคุ้มค่าในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางโดยคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมและราคาต้นทุนโดยเปรียบเทียบราคาก่อสร้างชั้นพื้นทางหินคลุกและกระเบื้องเซรามิค

ปัจจัยทางด้านราคาวัสดุ

1. ราคาหินคลุกอ้างอิงจากราคาพาณิชย์ จังหวัดอยุธยา เดือน ตุลาคม 2563
2. กระเบื้องเซรามิค จากโรงงานอุตสาหกรรมหลังคา จังหวัดสระบุรี

ปัจจัยทางด้านขนส่งและค่าดำเนินการ

1. การคิดราคาค่าขนส่งอ้างอิงจากหลักเกณฑ์การคำนวณค่าขนส่งวัสดุก่อสร้างของกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง โดยพิจารณารถบรรทุก 10 ล้อ ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่ 25.00-25.99 บาท/ลิตร
2. การคิดค่าดำเนินการและค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร อ้างอิงจากรางราคาดำเนินการและค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรของกรมบัญชีกลางกระทรวงการคลังโดยพิจารณาราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่ 25.00-25.99 บาท/ลิตร

Table 1 Comparison of Construction Cost between Crushed Rocks and Ceramic Tiles

รายการ	หินคลุก	กระเบื้องเซรามิค	หน่วย
ราคาวัสดุ	336.45	0	บาท/ลูกบาศก์เมตร (หลวม)
ค่าบดวัสดุ	0	140.25	บาท/ลูกบาศก์เมตร
ระยะทางขนส่งวัสดุ	0	59	กิโลเมตร
ค่าขนส่งวัสดุ	0	114	บาท/ลูกบาศก์เมตร (หลวม)
รวมค่าวัสดุ	336.45	254.25	บาท/ลูกบาศก์เมตร (หลวม)
ค่าส่วนการยุบตัว (50%)	504.675	119.16	บาท/ลูกบาศก์เมตร (แน่น)
ค่าเสื่อมราคา งานขุด-ตัก	0	0	บาท/ลูกบาศก์เมตร (หลวม)
ค่าเสื่อมราคา งานผสม	25.05	25.05	บาท/ลูกบาศก์เมตร (แน่น)
ค่าเสื่อมราคา งานบดทับ	89.87	89.87	บาท/ลูกบาศก์เมตร (แน่น)
รวมต้นทุน	619.595	496.295	บาท/ลูกบาศก์เมตร

หมายเหตุ

1. ค่าส่วนการยุบตัว(ร้อยละ 50) = รวมค่าวัสดุ \times 1.50
2. รวมต้นทุน = ค่าส่วนการยุบตัว (ร้อยละ 50) + ค่าเสื่อมราคา(งานชุดตัก+งานผสม+งานบดทับ)
3. ราคาหินคลุก ที่มา ราคาพาณิชย์จังหวัดอยุธยา และราคากระบือเชิงเซรามิค 85 บาท/ตัน ที่มา โรงงานอุตสาหกรรมหลังคา จังหวัดสระบุรี หลักเกณฑ์การคิดราคากลาง การแปลงหน่วยตันเป็นลูกบาศก์เมตร 1 ลูกบาศก์เมตร = 1.65 ตัน

จากการศึกษาความคุ้มค่าของการนำวัสดุเหลือทิ้งจำพวกกระเบื้องเซรามิคมาแทนที่หินคลุก ซึ่งจะมีราคาที่ถูกกว่า $619.595 - 496.295 = 123.3$ บาท/ลูกบาศก์เมตร และจากการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมระหว่างหินคลุกผสมกระเบื้องเซรามิคจะได้ว่า อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิคร้อยละ 10 : หินคลุกร้อยละ 90 มีคุณสมบัติที่ผ่านมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งงานซ่อมบำรุงถนนในพื้นที่ อ.วังน้อย จ.อยุธยา มีชั้นพื้นทางหินคลุก 1,835 ลูกบาศก์เมตร ถ้านำกระเบื้องเซรามิคมาแทนหินคลุกร้อยละ 10 จะมีราคาค่าก่อสร้าง $((0.1 \times 1,835) \times 496.295) + ((0.9 \times 1,835) \times 619.595) = 1,114,331.275$ บาท ถ้าใช้หินคลุกร้อยละ 100 มีราคาค่าก่อสร้าง $619.595 \times 1,835 = 1,136,956.825$ บาท จะเห็นว่าถ้านำวัสดุเหลือทิ้งจำพวกกระเบื้องเซรามิคมาทดแทนวัสดุงาน จะทำให้ต้นทุนราคาก่อสร้างลดลง 22,625.55 บาท อีกทั้งยังช่วยลดขยะในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

สรุป

จากการทดลองพบว่า การทดสอบขนาดคละส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิคร้อยละ 0 : หินคลุกร้อยละ 100 ,อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิคร้อยละ 10 : หินคลุกร้อยละ 90 และอัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมกระเบื้องเซรามิคร้อยละ 20 : หินคลุกร้อยละ 80 อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ค่าสึกหรอของวัสดุทุกอัตราส่วนผสมมีค่าผ่านเกณฑ์กำหนดที่ร้อยละ 40 ตาม มทข.203-2557 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่า ถ้าปริมาณกระเบื้องเซรามิคมีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงและความชื้นในการบดอัดเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบค่า C.B.R. พบว่า มีส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์กำหนดที่ร้อยละ 80 ตาม มทข.203-2557 อัตราส่วน คือ สัดส่วนกระเบื้องเซรามิคร้อยละ 0 และร้อยละ 10 ดังนั้นผู้วิจัยพบว่า อัตราส่วนผสมแทนที่หินคลุกด้วยเซรามิคร้อยละ 10 ผ่านเกณฑ์ทุกเกณฑ์คุณสมบัติวัสดุ ตาม มทข.203-2557 สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างถนนจริงได้ อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนค่าก่อสร้างได้ และเป็นการนำเอาเศษกระเบื้องเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานอุตสาหกรรมหลังคา จังหวัดสระบุรี ที่มอบวัสดุเหลือทิ้งที่กระเบื้องเซรามิคมาเป็นวัสดุมวลรวมในการทดสอบ และโรงโม่ทรัพยากรวิสิน จ.สระบุรี ที่มอบหินคลุกให้มาเป็นวัสดุมวลรวมในการทดสอบ และขอพระคุณสำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท ที่ให้ใช้เครื่องมือทดสอบสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวงชนบท. มาตรฐานงานทางหลวงชนบท สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, กระทรวงคมนาคม,

กรมบัญชีกลาง. 2560. หลักเกณฑ์และวิธีการกำหนดราคากลางงานก่อสร้าง ตุลาคม 2560. กรมบัญชีกลาง, กระทรวงการคลัง, กรุงเทพฯ.

สุเมธ วรรณทะนะ. 2560. การปรับปรุงคุณภาพหินคลุกถั่วลอยจีโอโพลีเมอร์ สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. 2556. การปรับปรุงหินคลุกด้วยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา.

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข, สุนิต ประเวระทัง 2563. ศักยภาพการนำเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์มาใช้ทดแทนวัสดุในงานทาง ภัทรพล เรืองศรี และจตุรงค์ เลาะห์เพ็ญแสง การศึกษากระบวนการใช้ประโยชน์ จากวัสดุเหลือใช้ประเภทกระเบื้องเซรามิกส์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลผลิตผลิตภัณฑ์ชุมชน

Hausmann, M.R. 1990. Engineering principles of ground modification. McGraw-Hill College, USA, pp. 632.

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกในโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร**The study of microplastic removal efficiency in wastewater treatment plant, Bangkok****วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์, พรรณทิวา จิตรชวาล*, สุชีลา พลเรือง****Varinporn Asokbunyarat, Puntiva Jitchawan*, Sucheela Polruang**

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: puntiwa.j@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติก รวมทั้งขนาดและรูปร่างไมโครพลาสติกจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำกรุงเทพมหานคร โดยทำการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกในน้ำเสีย น้ำทิ้งและตะกอนหมุนเวียนของระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 แบบ two-stage activated sludge process จำนวน 4 ครั้ง (สิงหาคม 2563, ตุลาคม 2563, กุมภาพันธ์ 2564 และมีนาคม 2564) และวิเคราะห์จำนวนไมโครพลาสติกขนาด 75–300 μm และ 300–5,000 μm โดยวิธีการแยกตามความหนาแน่น จากการศึกษพบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำสามารถกำจัดไมโครพลาสติกทั้งสองขนาด $76.4 \pm 5.9\%$ โดยพบไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้งมีค่า 22.3 ± 10.3 MP/L และ 6.7 ± 1.6 MP/L ตามลำดับ และพบไมโครพลาสติกจากตัวอย่างตะกอนหมุนเวียนในปริมาณสูง (206.4 ± 135.1 MP/g) ส่วนใหญ่ไมโครพลาสติกมีรูปร่างแบบชิ้นส่วนแตกหัก $82.1 \pm 10.1\%$ ของไมโครพลาสติกทั้งหมดในตัวอย่างน้ำ และ $69.5 \pm 20.4\%$ ของไมโครพลาสติกทั้งหมดในตัวอย่างตะกอนหมุนเวียน และพบไมโครพลาสติกขนาด 300–5,000 μm มีค่า $52.8 \pm 18.4\%$ ของไมโครพลาสติกทั้งหมดในตัวอย่างน้ำ และ $48.7 \pm 16.1\%$ ของไมโครพลาสติกทั้งหมดในตัวอย่างตะกอนหมุนเวียน

คำสำคัญ: กรุงเทพมหานคร, ไมโครพลาสติก, โรงควบคุมคุณภาพน้ำ**Abstract**

This research aimed to study microplastic removal efficiency, as well as shape, and size microplastics found in a wastewater treatment plant, Bangkok. The microplastic samples in influent, effluent, and returned sludge of secondary wastewater treatment plant with two-stage activated sludge process were collected with 4 periods of sampling (August 2020, October 2020, February 2021, and March 2021) and the number of microplastic samples with sizes of 75–300 μm and 300–5,000 μm were analyzed by density separation. The study showed that the microplastic removal efficiency of this secondary wastewater treatment plant was $76.4 \pm 5.9\%$. The number of microplastics in influent and effluent samples was 22.3 ± 10.3 MP/L and 6.7 ± 1.6 MP/L, respectively, and the highest number of microplastics was found in returned sludge samples (206.4 ± 135.1 MP/g). Most of the microplastic samples found in this study were fragment microplastics that were $82.1 \pm 10.1\%$ of total microplastics in water samples and $69.5 \pm 20.4\%$ of total microplastics in return sludge samples. Microplastics with a size of 300–5,000 μm were $52.8 \pm 18.4\%$ of total microplastics in water samples and $48.7 \pm 16.1\%$ of total microplastics in returned sludge samples.

Keyword: Bangkok, Microplastics, Wastewater treatment plant

คำนำ

ในปัจจุบันแนวโน้มการผลิตและใช้ผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์พลาสติกสูงขึ้น ส่งผลต่อการสะสมของขยะพลาสติกในแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม (แสงกระจ่าง และคณะ, 2556) สำนักงานจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ (2560) พบปริมาณขยะมูลฝอยรวมทั้งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2559 มีค่า 27.06 MT แบ่งเป็นขยะถูกกำจัด ถูกวิธี 9.57 ล้านตัน (35.4%) ขยะรีไซเคิล 5.81 ล้านตัน (21.5%) ขยะกำจัดไม่ถูกวิธี 11.40 ล้านตัน (42.1%) และขยะไม่ถูกกำจัด 0.28 ล้านตัน (1.0%) เมื่อขยะพลาสติกถูกกำจัดไม่ถูกวิธีจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพอนามัย เศรษฐกิจ และปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำ ซึ่งขยะในทะเลส่วนใหญ่เป็นขยะพลาสติก ได้แก่ กุ้งพลาสติก 19% หลอดพลาสติก 15% ฝาขวดน้ำพลาสติก 12% ภาชนะใส่อาหาร 12% เชือก 9% บุหรี่ 8% กระป๋อง 8% กระดาษ 7% โฟม 7% และขวดแก้ว 3% (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2558)

ไมโครพลาสติกเป็นพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มล. แบ่งเป็น 2 ประเภทตามแหล่งกำเนิด ได้แก่ ไมโครพลาสติกแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งไมโครพลาสติกแบบปฐมภูมิเป็นพลาสติกที่ถูกสร้างให้มีขนาดเล็กกว่า 5 มล. ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในซ็อมเม็คสับ หรือไมโครบีดส์ (microbead) และไมโครพลาสติกแบบทุติยภูมิเกิดจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกขนาดใหญ่ เช่น ปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยแสงยูวีและความร้อน และการขูด ทำให้ไมโครพลาสติกเกิดการแตกหัก ซึกขาด มักมีรูปร่างเป็นชิ้นส่วนแตกหัก (fragment) และแผ่นฟิล์ม (film) นอกจากนี้ยังรวมถึงไมโครพลาสติกแบบเส้นใย (fiber) ที่หลุด หรือขาดออกจากเส้นด้ายระหว่างการซักล้างทำความสะอาด เสื้อผ้า และเส้นใยซึกขาดจากเชือก แห และตาข่าย โรงควบคุมคุณภาพน้ำเป็นเส้นทางหนึ่งของแหล่งกำเนิดไมโครพลาสติก เนื่องจากเป็นแหล่งรวบรวมน้ำเสียที่ปนเปื้อนไมโครพลาสติกจากอาคาร บ้านเรือน ผ่านท่อระบายน้ำ (Thomas et al., 2012; Napper et al., 2015) Conley et al. (2019) พบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำสามารถกำจัดไมโครพลาสติกด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพและชีวภาพ $97.6 \pm 1.2\%$ แต่ยังไม่พบไมโครพลาสติกในน้ำทิ้งและปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ $0.5 \times 10^9 - 1 \times 10^9$ MP/d จึงจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีของโรงควบคุมคุณภาพน้ำเพื่อลดการแพร่กระจายไมโครพลาสติกสู่แหล่งน้ำ ในขณะที่ประเทศไทยกระบวนการบำบัดน้ำเสียหลักของโรงควบคุมคุณภาพน้ำเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารในน้ำ หากโรงควบคุมคุณภาพน้ำไม่สามารถลดและกำจัดไมโครพลาสติกจะส่งผลต่อการแพร่กระจายไมโครพลาสติกสู่แหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา 1) ปริมาณไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในโรงควบคุมคุณภาพน้ำและประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติก และ 2) รูปร่างและขนาดของไมโครพลาสติกที่พบในตัวอย่างน้ำเสีย น้ำทิ้ง และตะกอนหนวนเวียนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำกรุงเทพมหานคร เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประเมินสถานการณ์และแนวทางในการป้องกันการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา จุดเก็บตัวอย่างและวิธีการเก็บตัวอย่าง

โรงควบคุมคุณภาพน้ำแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานครถูกเลือกเป็นพื้นที่ศึกษาในการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติก ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Two-stage Activated Sludge มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย 40,000 ลบ./วัน และปริมาณน้ำเสียเฉลี่ย 17,173 ลบ./วัน (สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ, 2561) ซึ่งจุดเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกมี 3 จุด ได้แก่ จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียหลังออกจากถังตกกรวดทราย (Influent) จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง (Effluent) และจุดเก็บตะกอนหนวนเวียนจากท่อสูบทะกอนกลับ (Sludge) (ดังแสดงใน Fig. 1) เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของระบบ

บำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 (Two-stage Activated Sludge) ในการศึกษานี้ทำการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกทั้งหมด 4 ครั้ง ได้แก่ สิงหาคม 2563 (ฤดูฝน) ตุลาคม 2563 (ฤดูฝน) กุมภาพันธ์ 2564 (ฤดูแล้ง) และมีนาคม 2564 (ฤดูแล้ง) โดยเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนหมุนเวียนแบบจ้วง (grab sample) จำนวนตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้ง 20 ลิตร และตะกอนหมุนเวียน 6 ลิตร

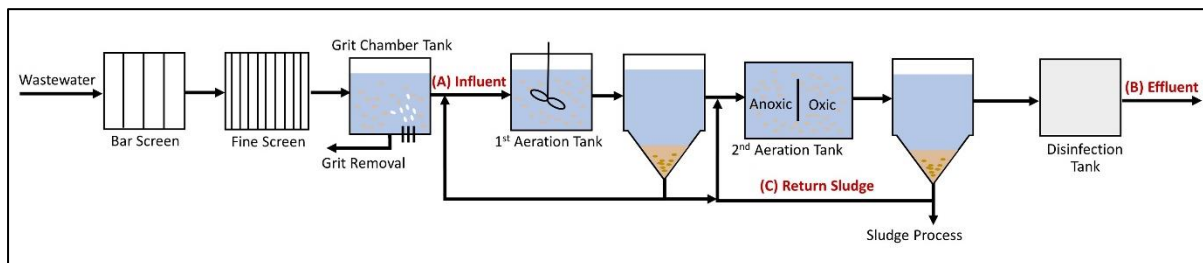


Fig. 1 Flow chart of Two-Stage Activated Sludge and sampling site: (A) Influent, (B) Effluent, and (C) Sludge sampling point.

วิธีการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสีย น้ำทิ้ง และตะกอนหมุนเวียน

กรองตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้งปริมาณ 10 ลิตร ผ่านตะแกรงขนาด 75 และ 300 μm และกรองตัวอย่างตะกอนหมุนเวียนปริมาณ 1.5 ลิตร ผ่านตะแกรงทั้งสองขนาด จากนั้นถ่ายตัวอย่างของแข็งที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาดไปยังบีกเกอร์และอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 90°C จนตัวอย่างแห้งสนิท จากนั้นเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% และสารละลายเหล็ก (II) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จำนวน 20 มล. บนเครื่องกวนสารให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ และเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 6 มล. เป็นเวลา 30 นาที เพื่อย่อยสลายวัสดุที่ไม่ใช่พลาสติก เช่น เซลลูโลส เส้นใยสังเคราะห์ (คอตตอน ไรอยอน และวิสโคส) เดิมซิงค์ (II) คลอไรด์ ความหนาแน่น 1.9 กรัม/ลบ.ซม. จำนวน 50 มล. เพื่อแยกสารอินทรีย์กับไมโครพลาสติกด้วยหลักของความหนาแน่น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำตัวอย่างไมโครพลาสติกที่ได้ ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ Olympus รุ่น SZ61 เพื่อนับจำนวน และจำแนกรูปร่างและขนาดไมโครพลาสติก (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Protocol, 2015; Conley et al., 2019)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ปริมาณไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบและน้ำทิ้ง

จาก Table 1 แสดงปริมาณไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้งเป็น 4.5–28.8 MP/L และ 5.0–8.9 MP/L ตามลำดับ (คิดเป็นปริมาณไมโครพลาสติกเฉลี่ยในตัวอย่างน้ำเสีย 22.3 ± 10.3 MP/L และตัวอย่างน้ำทิ้ง 6.7 ± 1.6 MP/L) พบว่าปริมาณไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำทิ้งมีจำนวนลดลง เนื่องจากไมโครพลาสติกจะถูกดักและกักขังโดยกลุ่มจุลชีพภายในภายในถังเติมอากาศ ทำให้น้ำหนักและความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นจนสามารถจมตัวลงสู่ก้นถังตกตะกอนได้ โดยจากการศึกษาอื่นพบว่าปริมาณไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบบำบัดแบบ Activated Sludge มีค่าตั้งแต่ 3.40–72.6 MP/L (Murphy et al, 2016; Liu et al 2019; Jiang et al, 2020) ซึ่งความแตกต่างของปริมาณไมโครพลาสติกมีความแปรปรวนสูงอาจเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น วิธีการเก็บตัวอย่าง โดยวิธีการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีการเก็บตัวอย่างแบบผสมรวม (composite sample) เช่น การใช้ปั๊มสุบตัวอย่างน้ำ 24 ชั่วโมง ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถเก็บตัวอย่างน้ำได้ในปริมาณสูง จึงมีโอกาสพบตัวอย่างไมโครพลาสติกมากยิ่งขึ้น แต่มีข้อจำกัดใน

เรื่องของขนาดตะแกรงและลักษณะน้ำเสียซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันของตะแกรงในขณะเก็บตัวอย่าง และวิธีการเก็บตัวอย่างแบบจ้วง (grab sample) เป็นวิธีการที่สะดวกและเหมาะกับตัวอย่างน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยสูง แต่สามารถเก็บตัวอย่างน้ำได้ในปริมาณต่ำ (Conley et al., 2019; Sun et al., 2019) และจากการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกในน้ำเสียครั้งที่ 1 ในเดือนสิงหาคม (ฤดูฝน) พบว่าปริมาณไมโครพลาสติกต่ำกว่าครั้งอื่น อาจเนื่องจากสภาพอากาศในขณะเก็บตัวอย่างมีฝนตก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ปริมาณไมโครพลาสติกในน้ำเสียน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นฤดูกาลในการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกอาจมีผลต่อปริมาณไมโครพลาสติก ต่างจากการศึกษาของ Conley et al. (2019) พบว่าปริมาณไมโครพลาสติกมีความแปรผันมาก แต่ไม่ขึ้นอยู่กับการฤดูกาลในการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติก

จากปริมาณไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบและน้ำทิ้งออกจากระบบ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของโรงควบคุมคุณภาพน้ำในการศึกษานี้ มีค่าเป็น 68.6–82.6% ($76.4 \pm 5.9\%$) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Two-stage Activated Sludge ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์สองขั้นตอน โดยมีถังเติมอากาศขั้นตอน 1 เพื่อทำหน้าที่เลี้ยงจุลชีพแบบใช้อากาศจำนวนมาก เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียและถังเติมอากาศขั้นตอน 2 เป็นถังปฏิกิริยาทางชีวภาพแบบ Anoxic-Oxic เพื่อใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่นพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge สามารถกำจัดไมโครพลาสติกได้ตั้งแต่ 3.6–77.3% (Murphy et al., 2016; Hidayaturrahman and Lee, 2019; Liu et al., 2019; Jiang et al., 2020) โดย Hidayaturrahman and Lee (2019) ระบุว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge ไมโครพลาสติกจะถูกจับและกักขังโดยกลุ่มจุลชีพ ส่งผลให้ปริมาณไมโครพลาสติกปนเปื้อนในน้ำทิ้งที่ถูกปล่อยจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำมีจำนวนลดลง อย่างไรก็ตามกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อกำจัดไมโครพลาสติก จึงทำให้ไมโครพลาสติกบางส่วนปนเปื้อนในน้ำทิ้งและปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Mason et al., 2016; Jiang et al., 2020) นอกจากนี้ เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาคำนวณปริมาณไมโครพลาสติกที่ถูกปลดปล่อยจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำในการศึกษานี้ พบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำสามารถปลดปล่อยไมโครพลาสติกในน้ำทิ้งและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมคิดเป็นประมาณ 0.11×10^9 MP/d ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญต่อการจัดการขยะพลาสติกที่จะเป็นต้นเหตุของการเกิดไมโครพลาสติก รวมทั้งควรเพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำ (Mintenig et al., 2017; Ziajahromi et al., 2017)

Table 1 The amount of microplastics found in this study and microplastic removal efficiency of the WWTP.

Date	Microplastic (MP/L)		Microplastic in Sludge (MP/g)	Microplastic removal (%)	Microplastics released ($\times 10^9$ MP/d)
	Influent	Effluent			
Aug-20	4.5	6.7	62.9	-	0.12
Oct-20	28.3	8.9	281.9	68.6	0.15
Feb-21	27.6	6.1	91.4	77.9	0.10
Mar-21	28.8	5.0	389.5	82.6	0.09
Average	22.3 ± 10.3	6.7 ± 1.4	206.4 ± 135.1	76.4 ± 5.9	0.11 ± 0.02

Table 2 The amount of microplastics found in different studies.

Country	Microplastic (MP/L)		Source	Sampling technique	Finish sieve (μm)	Reference
	Influent	Effluent				
Scotland	3.40 \pm 0.28	0.25 \pm 0.04	Municipal	Grab	65	(Murphy et al, 2016)
Wuhan, China	47.4 \pm 7.0	28.4 \pm 7.8	Municipal and industrial	Composite	20	Liu et al, 2019)
Harbin, China	72.6 \pm 9.3	30.6 \pm 7.8	Municipal and industrial	Composite	20	Jiang et al, 2020)
Bangkok, Thailand	22.3 \pm 10.3	6.7 \pm 1.4	Municipal	grab	75	This study

ปริมาณไมโครพลาสติกในตัวอย่างตะกอนจุลชีพจากท่อสูบน้ำดิบ

ในการศึกษานี้พบว่าปริมาณไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนอยู่ในตะกอนจุลชีพมีค่าเป็น 62.9–389.5 MP/g จากปริมาณไมโครพลาสติกที่พบในตัวอย่างตะกอนจุลชีพในการศึกษาต่างๆ พบว่าปริมาณไมโครพลาสติกที่พบในตะกอนจุลชีพมีค่าตั้งแต่ 4.2–240 MP/g (Mahon et al., 2017; Liu et al., 2019; Jiang et al., 2020) เนื่องจากไมโครพลาสติกที่ถูกกำจัดภายในระบบ Activated Sludge จะถูกกักขังโดยกลุ่มของตะกอนจุลชีพในถังเติมอากาศ ทำให้น้ำหนักและความหนาแน่นของไมโครพลาสติกเพิ่มขึ้นจนสามารถจมตัวลงสู่ถังตกตะกอนไปพร้อมกับกลุ่มตะกอนจุลชีพ ดังนั้นไมโครพลาสติกสะสมอยู่ในตะกอนจุลชีพและหมุนเวียนอยู่ในโรงควบคุมคุณภาพน้ำ ส่งผลให้ไมโครพลาสติกในตัวอย่างตะกอนจุลชีพมีปริมาณสูง หากไม่ได้รับการบำบัดตะกอนส่วนเกินที่ถูกรวบรวม อาจส่งผลให้ไมโครพลาสติกสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้

ขนาดไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบ น้ำทิ้ง และตะกอนจุลชีพ

จากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบ น้ำทิ้ง และตะกอนจุลชีพทั้งหมด 4 ครั้งของโรงบำบัดน้ำเสียแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร สามารถจำแนกขนาดไมโครพลาสติกเป็น 2 ขนาดตามขนาดของตะแกรงที่ใช้ ได้แก่ ขนาดใหญ่ 300–5,000 μm และขนาดเล็ก 75–300 μm พบว่าไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบและน้ำทิ้งมีสัดส่วนของขนาดไมโครพลาสติกขนาดใหญ่เป็น 28.5–78.6% (54.4 \pm 17.9%) และ 16.4–63.9% (47.6 \pm 18.4%) ตามลำดับ และไมโครพลาสติกขนาดเล็กในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบและน้ำทิ้งเป็น 21.4–71.5% (45.6 \pm 17.9%) และ 36.1–83.6% (52.4 \pm 18.4%) ตามลำดับ โดยในตะกอนจุลชีพพบไมโครพลาสติกขนาดใหญ่และขนาดเล็กเป็น 33.5–78.8% (48.7 \pm 16.1%) และ 21.2–66.5% (51.3 \pm 16.1%) ตามลำดับ

จากสัดส่วนของขนาดไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบ น้ำทิ้ง และตะกอนจุลชีพ พบว่าสัดส่วนของไมโครพลาสติกขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีสัดส่วนใกล้เคียงกัน โดยไมโครพลาสติกขนาดใหญ่มีจำนวนลดลงในตัวอย่างน้ำทิ้ง อาจเนื่องจากไมโครพลาสติกขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะจมตัวลงสู่ถังตกตะกอนได้มากกว่า ในขณะที่ไมโครพลาสติกขนาดเล็กยังคงเหลืออยู่ในตัวอย่างน้ำเสีย (Murphy et al., 2016; Liu et al., 2019)

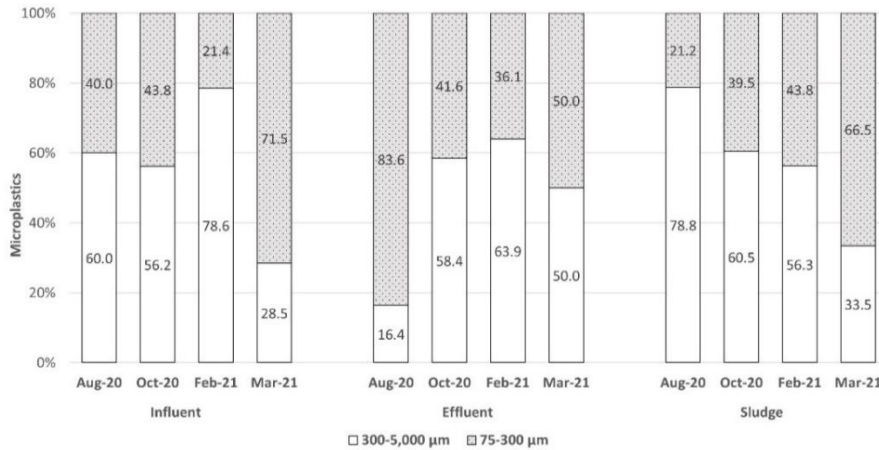


Fig. 2 Size of microplastics in influent, effluent, and sludge samples.

รูปร่างไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบ น้ำทิ้ง และตะกอนจุลชีพ

ในการศึกษาครั้งนี้รูปร่างไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบ น้ำทิ้ง และตะกอนจุลชีพแบ่งเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ไมโครพลาสติกแบบชิ้นส่วนแตกหัก (fragment) แผ่นฟิล์ม (film) เส้นใย (fiber) และไมโครบีดส์ (microbead) โดยจากตัวอย่างไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำ พบไมโครพลาสติกแบบชิ้นส่วนแตกหัก 60.0–88.0% ($82.1 \pm 10.1\%$) แผ่นฟิล์ม 4.5–31.1% ($15.8 \pm 8.7\%$) และเส้นใย 2.8–18.0% ($7.2 \pm 4.5\%$) เช่นเดียวกับไมโครพลาสติกในตัวอย่างตะกอนจุลชีพพบไมโครพลาสติกส่วนใหญ่เป็นไมโครพลาสติกแบบชิ้นส่วนแตกหัก 34.8–87.5% ($69.5 \pm 20.4\%$) แผ่นฟิล์ม 7.3–59.1% ($24.1 \pm 21.0\%$) และเส้นใย 2.4–13.5% ($6.5 \pm 4.3\%$) Plastic Waste Management Subcommittee (2018) รายงานว่าประเทศไทยมีการผลิตและใช้ถุงพลาสติกมากกว่า 45,000 ล้านใบ เกิดขยะพลาสติกในปี พ.ศ. 2560 ทั้งหมด 791,408 ตัน แบ่งเป็นถุงพลาสติกหูหิ้ว 517,054 ตัน แก้วน้ำพลาสติกแบบครั้งเดียวทิ้ง 241,233 ตัน หลอดพลาสติก 3,873 ตัน และกล่องโฟมบรรจุอาหาร 29,248 ตัน ซึ่งประมาณ 5–10% จากปริมาณขยะพลาสติกทั้งหมดในปี พ.ศ. 2560 กลายเป็นไมโครพลาสติกแบบทุติยภูมิ 39,570.4–79,140.8 ตัน/ปี ไมโครพลาสติกแบบทุติยภูมิหรือไมโครพลาสติกที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกชิ้นใหญ่จนมีขนาดเล็กกว่า 5 มล. มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนแตกหัก แผ่นฟิล์ม และรวมถึงเส้นใยที่เกิดจากการหลุดรอดจากการซักเสื้อผ้าและจากการแตกหักจากเชือกเส้นใหญ่ ดังนั้นรูปร่างไมโครพลาสติกอาจสอดคล้องกับชนิดและปริมาณขยะที่ถูกทิ้งและปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ จากการเก็บตัวอย่างทั้ง 4 ครั้งพบไมโครพลาสติกแบบไมโครบีดส์เฉพาะในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบ 0–2.2% ($0.4 \pm 0.8\%$) เนื่องจาก

ขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการจำแนกขนาดไมโครพลาสติก ซึ่งไมโครพลาสติกแบบเส้นใยและไมโครบีดส์มีขนาดเล็กมากจึงมีโอกาสที่จะหลุดลอดผ่านตะแกรงระหว่างขั้นตอนการกรองตัวอย่างน้ำเพื่อแยกขนาดไมโครพลาสติก

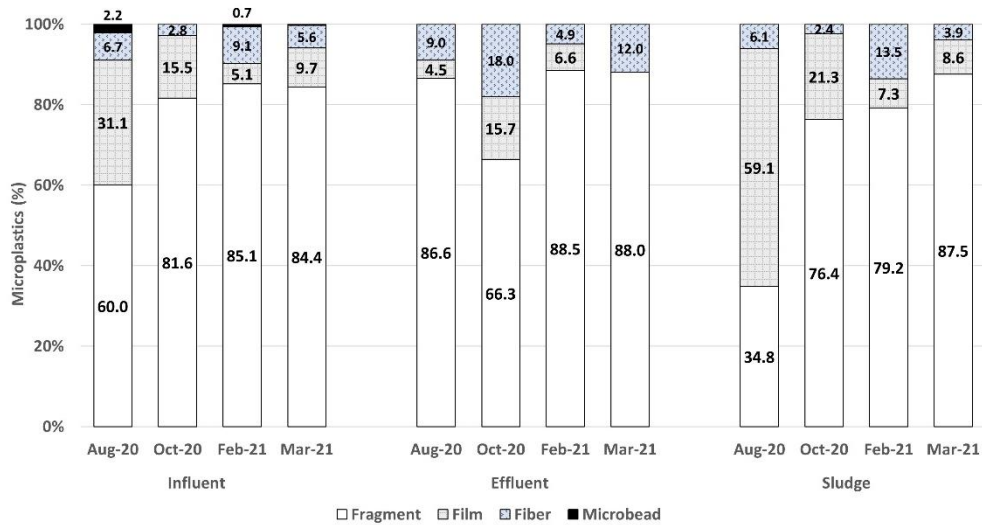


Fig. 3 Shape of microplastics in influent, effluent, and sludge samples.

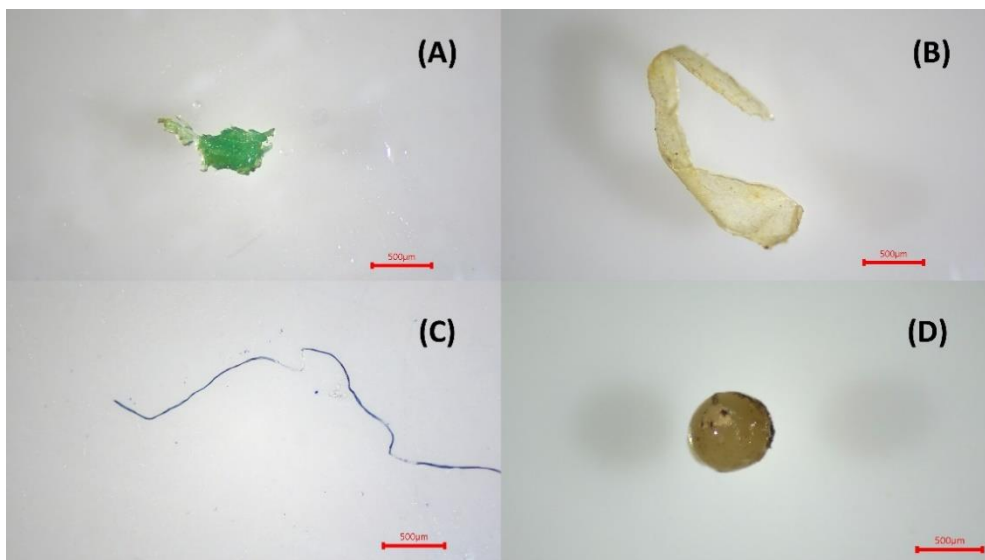


Fig. 4 Different shapes of microplastics: (A) Fragment; (B) Film; (C) Fiber; (D) Microbead

สรุปผลการทดลอง

จากการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกทั้ง 4 ครั้ง ในตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบ น้ำทิ้ง และตะกอนจุลชีพของโรงควบคุมคุณภาพน้ำในกรุงเทพมหานคร พบว่าไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงบำบัดน้ำเสียมีค่าเป็น 22.3 ± 10.3 MP/L และ 6.7 ± 1.6 MP/L ตามลำดับ คิดประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของโรงบำบัดน้ำเสียแห่งนี้เป็น 76.4% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไมโครพลาสติกของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Two-stage Activated Sludge ดังนั้นไมโครพลาสติกที่ถูกกำจัดจะสะสมอยู่ในส่วนของตะกอนจุลชีพ (206.4 ± 135.1 MP/g) ซึ่งไมโครพลาสติกส่วนใหญ่ที่อยู่ในตัวอย่างน้ำและตะกอนจุลชีพมีลักษณะเป็นชิ้นส่วนแตกหักมีค่า $82.1 \pm 10.1\%$ และ $69.5 \pm 20.4\%$ จากจำนวนไมโครพลาสติกทั้งหมดตามลำดับ และพบไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ ($300-5,000 \mu\text{m}$) $52.8 \pm 18.4\%$ ในตัวอย่างน้ำและ $48.7 \pm 16.1\%$ ในตัวอย่างตะกอนหมุนเวียน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสโครงการวิจัย ร-ม 14.63

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2558. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2558.

<http://www.dmcr.go.th/detailLib/2586>, 26 พฤศจิกายน 2564.

ศุภีพร แสงกระจ่าง, บัทยา พลอยสว่าง, ปริณมา พรหมหิตาธร. 2556. ผลกระทบของพลาสติกต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม.

วารสารพิษวิทยาไทย 28: 39–50.

สำนักงานจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ. 2560. รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของ

ประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559. <http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER3/DRAWER056/GENERAL/00000/00000689.PDF>, 26 พฤศจิกายน 2564.

สำนักงานคุณภาพน้ำ สำนักงานการระบายน้ำ. 2561. รายงานประจำปี 2561.

https://drive.google.com/file/d/1Gx6HfLndxKSHL51puZZtUyTzBm8rt_Jh/view, 26 พฤศจิกายน 2564.

Carr, S.A., Liu, J., Tesoro, A.G. 2016. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Res.* 91: 174–182. doi:10.1016/j.watres.2016.01.002

Conley, K., Clum, A., Deepe, J., Lane, H., Beckingham, B. 2019. Wastewater treatment plants as a source of microplastics to an urban estuary: Removal efficiencies and loading per capita over one year.

Water Res. X3: 100030. doi:10.1016/j.wroa.2019.100030

Hidayaturrehman, H., Lee, T.G. 2019. A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea:

Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. *Mar. Pollut. Bull.*

146: 696–702.

Jiang, J., Wang, X., Ren, H., Cao, G., Xie, G., Xing, D., Liu, B. 2020. Investigation and fate of microplastics in

wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China. *Sci. Total Environ.* 746:

141378. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141378

Liu, X., Yuan, W., Di, M., Li, Z., and Wang, J. 2019. Transfer and fate of microplastics during the conventional

activated sludge process in one wastewater treatment plant of China. *Chem. Eng. J.* 362: 176–182.

doi:10.1016/j.cej.2019.01.033

Mahon, A.M., O'Connell, B., Healy, M.G., O'Connor, I., Officer, R., Nash, R., and Morrison, L. 2017.

Microplastics in Sewage Sludge: Effects of treatment. *Environ. Sci. Technol.* 51: 810–818.

doi:10.1021/acs.est.6b04048

Mason, S.A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., Fink, P., Papazissimos, D., Rogers, D.

L. 2016. Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant

effluent. *Environ. Pollut.* 218: 1045–1054. doi:10.1016/j.envpol.2016.08.056

Mintenig, S.M., Int-Veen, I., Loder, M.G. J., Primpke, S., Gerdts, G. 2017. Identification of microplastic in

effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based. *Water Res.* 108: 365–372.

doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015

- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., Quinn, B. 2016. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environ. Sci. Technol.* 50: 5800–5808.
doi:10.1021/acs.est.5b05416
- Napper, I.E., Bakir, A., Rowland, S.J., Thompson, R.C. 2015. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. 99: 178–185.
doi:doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.029
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Protocol.
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C., Herring, C., Technical Editor. 2015. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. Silver Spring, MD, USA. pp. 31.
- Plastic Waste Management Subcommittee. 2018. Draft Integrated plastic waste management plan (2017–2021). <http://www.pcd.go.th/public/News/GetNews Thai.cfm?task=It2018&id=18518>, 26 November 2021.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M.C.M., Ni, B.J. 2019. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Res.* 152: 21–37. doi:10.1016/j.watres.2018.12.050
- Thomas, N.L., Clarke, J., McLauchlin, A.R., Patrick, S.G. 2012. Oxodegradable plastics: degradation, environmental impact and recycling. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management* 165: 133–140. doi:10.1680/warm.11.00014
- Ziajahromi, S., Neale, P.A., Rintoul, L., Leusch, F.D. 2017. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Res.* 112: 93–99. doi:10.1016/j.watres.2017.01.04

การศึกษาปริมาณ รูปร่าง และขนาด ไมโครพลาสติกในโรงควบคุมคุณภาพน้ำกรุงเทพมหานคร A study of quantity, shape and size of microplastics in a wastewater treatment plant in Bangkok

สุชีลา พลเรือง, อารยา คงขวัญเมือง*, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์

Sucheela Polruang, Araya Khongkwanmueang*, Varinporn Asokbunyarat

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: azaza52@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณ รูปร่าง และขนาดไมโครพลาสติกของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งของกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนระบบตะกอนเร่ง Activated sludge with nutrient removal โดยทำการเก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง ในช่วงระยะเวลา 7 เดือน ผลการศึกษาพบว่า สามารถตรวจพบไมโครพลาสติกในทุกจุดเก็บตัวอย่างทั้ง ไมโครพลาสติกขนาด 75–300 μm และ 300–5000 μm โดยปริมาณไมโครพลาสติกพบมากที่สุดที่ตะกอนจุลินทรีย์ รองลงมาในน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดและน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการบำบัด ตามลำดับ ปริมาณไมโครพลาสติกที่พบในตะกอนจุลินทรีย์ 15.7–85.4 ชิ้นต่อกรัม ในตัวอย่างน้ำเสีย 10.0–30.5 ชิ้นต่อลิตร และน้ำทิ้ง 2.2–13.8 ชิ้นต่อลิตร นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์พบว่า ไมโครพลาสติกที่พบในน้ำเสีย น้ำทิ้งและตะกอนจุลินทรีย์ส่วนใหญ่มีรูปร่าง ไม่แน่นอน (Fragment) คิดเป็นร้อยละ 85, 73 และ 91 ตามลำดับ

คำสำคัญ: น้ำเสีย, โรงควบคุมคุณภาพน้ำ, ไมโครพลาสติก

Abstract

This research aimed to study quantity, shape and size of microplastics in an activated sludge with nutrient removal wastewater treatment system in Bangkok. Samples were collected 4 times over a period of 7 months. The results showed that microplastics can be detected at every sampling point. Size of microplastics found ranged between 75–300 μm and 300–5000 μm . The highest amount of microplastics was found in sludge (15.7_{min} - 85.4_{max} MP/g), followed by those in wastewater influent, and treated effluent, which ranged between 10.0_{min} -30.5_{max} MP/L, 2.2_{min} -13.8_{max} MP/L in both water lines. Moreover, it was found that the majority of microplastics were fragments 85% in wastewater, 73% in effluent and 91% in sludge.

Keywords: Microplastics, Wastewater, Wastewater treatment plant

คำนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันเพิ่มสูงขึ้น อาทิ บรรจุภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ รวมถึงสิ่งของเครื่องใช้ในครัวเรือน และส่งผลทำให้เกิดขยะพลาสติกเป็นจำนวนมาก โดยขยะพลาสติกดังกล่าวสามารถแตกหรือเสื่อมสภาพกลายเป็นพลาสติกขนาดเล็กหรือที่เรียกว่า ไมโครพลาสติก (Microplastics, MP) ไมโครพลาสติก (Microplastics, MP) คือชิ้นพลาสติกขนาดเล็กที่มีขนาดต่ำกว่า 5 มิลลิเมตร (Thevenon et al., 2014 ; Boucher et al., 2017) สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Primary microplastics เป็นพลาสติกที่ถูกผลิตให้มีขนาดเล็ก เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะด้าน เช่น เม็ดพลาสติกที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวหน้า เครื่องสำอาง หรือยาสีฟัน (Plastic scrub) และอีกประเภทคือ Secondary microplastics เกิดขึ้นจากการแตกออกของขยะพลาสติกที่มีขนาดใหญ่ด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น กระบวนการย่อยสลายด้วยแสงอาทิตย์ (UV degradation) กลายเป็นเศษพลาสติกลดขนาดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่ระดับไมโครพลาสติก (Boucher et al., 2017) ไมโครพลาสติกทั้งสองประเภทนี้สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำเสียโดยตรงจากบ้านเรือนสู่แหล่งน้ำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และห่วงโซ่อาหารในธรรมชาติ

โรงบำบัดน้ำเสียเป็นแหล่งกำเนิดหนึ่งที่มีความสามารถปล่อยไมโครพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อมได้ทั้งทางน้ำและบนบก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเส้นใยสังเคราะห์จากเสื้อผ้าและพลาสติกที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล (Hidayaturrahman et al., 2019) จากการศึกษาที่ผ่านมา ส่วนมากจะศึกษาด้านการประเมินศักยภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกโดยศึกษาจากกระบวนการบำบัดที่แตกต่างกันออกไปของโรงควบคุมคุณภาพน้ำแต่ละแห่งทั่วโลก โดยทั่วไปแล้วมากกว่า 90% ของไมโครพลาสติกที่เข้าสู่ระบบบำบัดจะถูกกำจัดออกระหว่างกระบวนการบำบัดในแต่ละขั้นตอน (Talvitie et al., 2017; Lares et al., 2018 ; Conley et al., 2019) โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ให้ข้อสรุปตรงกัน ถึงการสะสมตัวของไมโครพลาสติกจำนวนมากในตะกอนจุลินทรีย์ (Talvitie et al., 2017; Li et al., 2018) แม้ว่าระบบบำบัดแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกสูง แต่ยังคงมีพลาสติกจำนวนมากที่ถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการบำบัด เนื่องจากมีการปล่อยน้ำเสียออกจากกระบวนการบำบัดอย่างต่อเนื่อง (Ziajahromi et al., 2017)

ไมโครพลาสติกจากบ้านเรือนและกิจกรรมในชุมชนส่วนหนึ่งปนเปื้อนในน้ำเสียและถูกรวบรวมเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน อย่างไรก็ตามก็จนถึงปัจจุบันข้อมูลเกี่ยวกับการบำบัดไมโครพลาสติกในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยมีการเผยแพร่เพียงน้อยมาก ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนจุลินทรีย์ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร เพื่อศึกษาปริมาณ รูปร่าง และขนาดของไมโครพลาสติกทั้งในน้ำเสียเข้าระบบ น้ำทิ้งรวมทั้งในตะกอนจุลินทรีย์ใน ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เพื่อประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การกำหนดพื้นที่ศึกษาและจุดเก็บตัวอย่าง

ในการศึกษาปริมาณไมโครพลาสติกและประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกของโรงควบคุมคุณภาพน้ำแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ที่มีกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศระบบตะกอนเร่ง Activated sludge with nutrient removal มีความสามารถในการรับน้ำเสีย 120,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 4 จุด ได้แก่ จุดที่ 1 น้ำเข้าระบบบำบัดหลังผ่านตะแกรงกรอง จุดที่ 2 จุดเก็บตัวอย่างน้ำออกระบบหลังผ่านการบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จุดที่ 3 จุดเก็บตัวอย่างน้ำจากถัง Anoxic และจุดที่ 4 จุดเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge) เก็บตัวอย่างแบบจ้วง (Grab sample) โดยแต่ละจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 20 ลิตร และตะกอนจุลินทรีย์ปริมาตร 5

ลิตร ทำการเก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง ดังนี้ ครั้งที่ 1 เดือนสิงหาคม 2563 (ฤดูฝน) ครั้งที่ 2 เดือนตุลาคม 2563 (ฤดูฝน) ครั้งที่ 3 เดือนกุมภาพันธ์ 2564 (ฤดูแล้ง) และครั้งที่ 4 เดือนมีนาคม 2564 (ฤดูแล้ง)

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

นำน้ำตัวอย่างปริมาณ 10 ลิตร เทลงบนตะแกรงกรองขนาด 75 และ 300 ไมโครเมตร โดยให้ตะแกรงกรองทั้งสองขนาดวางซ้อนกัน นำขึ้นตัวอย่างที่ติดบนตะแกรงกรองแต่ละขนาด ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อน ก่อนนำไปประเหยน้ำออกด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้ง

ย่อยสารอินทรีย์ในตัวอย่าง โดยเติมเฟอร์รัสไอออน (Fe(II)) ปริมาณ 20 มิลลิลิตร และเติมกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ย่อยสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (Masura et al., 2015) จากนั้นย่อยเส้นใยจากธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ โดยเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 6 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (Conley et al., 2019)

จากนั้นทำการแยกไมโครพลาสติกออกจากสารอินทรีย์โดยใช้วิธีแยกความหนาแน่น (density separation) โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยสารอินทรีย์แล้ว เติมซิงค์คลอไรด์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในกรวยกรองแก้ว ตั้งทิ้งไว้จนสารแยกชั้นออกจากกัน เก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกในงานแก้วเพื่อรอการวิเคราะห์ นับจำนวนไมโครพลาสติกทั้งสองขนาด (ขนาด 75–300 ไมโครเมตร และขนาด 300–5,000 ไมโครเมตร) จำแนกประเภทไมโครพลาสติก (แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ชิ้นส่วนวัตถุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Fragment) แผ่นฟิล์ม (Film) และเส้นใย (Fiber)) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอและบันทึกผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ใช้ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ 1.5 ลิตร โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่างน้ำเสียทุกขั้นตอน (ขั้นตอนการย่อยสารอินทรีย์จะต้องทำการย่อยซ้ำหลายครั้งจนกว่าสารอินทรีย์จะถูกย่อยจนหมด)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกที่พบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (stereoscopic microscope) ที่ทำงานร่วมกับชุดถ่ายภาพอัตโนมัติจากกล้องจุลทรรศน์และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Automatic camera system) สามารถวิเคราะห์ปริมาณ จำแนกสีและรูปร่างของไมโครพลาสติกที่พบ โดยแบ่งเป็น 3 ประเภทตามรูปร่าง ได้แก่ ชิ้นส่วนวัตถุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Fragment) แผ่นฟิล์ม (Film) และเส้นใย (Fiber) จากการวิเคราะห์ปริมาณไมโครพลาสติกที่พบทั้งหมดในน้ำเสีย น้ำทิ้งและตะกอนจุลินทรีย์ ตรวจพบชิ้นส่วนวัตถุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Fragment) คิดเป็นร้อยละ 85, 73 และ 91 แผ่นฟิล์ม (Film) คิดเป็นร้อยละ 10, 21 และ 6.8 ตามลำดับ จากการสังเกตจากรูปร่างไมโครพลาสติกทั้ง 2 ประเภทเกิดจากการแตกออกของพลาสติกชิ้นใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากการแตกตัวของผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น แผ่นเฟรมใส่ปกรายงานแบบพลาสติก รวมถึงบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ถุงพลาสติก ฟิล์มยืด แผ่นฟิล์มสำหรับการบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์ (Fig. 1A และ Fig. 1B) นอกจากนี้ยังพบเส้นใย (Fiber) ในน้ำเสีย น้ำทิ้งและตะกอนจุลินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 5, 6 และ 2.2 ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากซีกขาดของเสื้อผ้าและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ผลิตโดยใช้เส้นใยสังเคราะห์ (Fig. 1C) Conley et al. (2019) ระบุว่าเส้นใยที่พบในน้ำเสียชุมชนส่วนมากเกิดจากการซักล้าง โดยเส้นใยไมโครพลาสติกที่พบจะขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งทอและลักษณะการซักล้างผลิตภัณฑ์นั้น

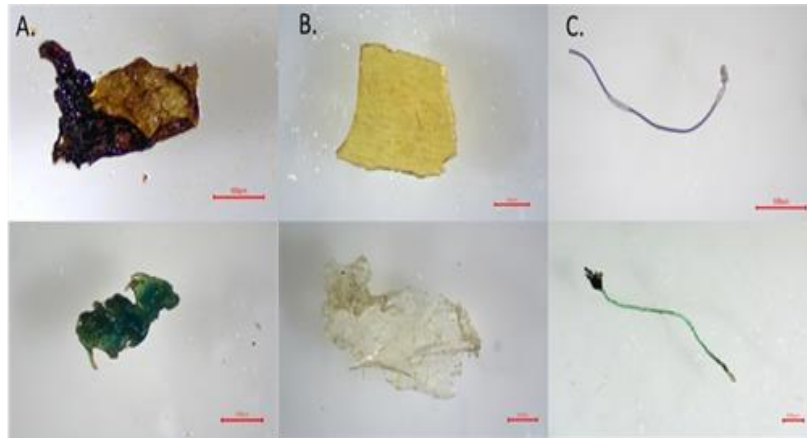


Fig. 1 Shape of microplastics found in this study: (A) Fragment; (B) Film; (C) Fiber

จากการเก็บตัวอย่างทั้ง 4 ครั้ง พบว่าช่วงเดือนที่เก็บตัวอย่างไม่ส่งผลต่อปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบ ซึ่งพบไมโครพลาสติกในน้ำเสียในระบบ 5.7–30.5 ชิ้นต่อลิตร (Table 1) โดยมีขนาดคละกันอยู่ในช่วง 75–5,000 ไมโครเมตร (Fig. 2B) โดยรูปร่างที่พบมากที่สุดคือเป็นแบบที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนมากที่สุด (Fragment) รองลงมาคือ แผ่นฟิล์ม (Film) และเส้นใย (Fiber) ตามลำดับ (Fig. 2C) จากการศึกษารายงานของ Arhant et al. (2019) พบว่าไมโครพลาสติกที่พบในน้ำเสียในระบบเกิดจากขยะพลาสติกที่กระจายตัวอยู่ในสิ่งแวดล้อมสัมผัสกับรังสี UV จากแสงอาทิตย์ ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพ เปราะบาง และแตกออกเป็นชิ้นเล็กกลอง ร่วมกับการเสียดสีทางกายภาพ เช่น การกระทำจากการไหลของน้ำ และการเสียดสีกับวัตถุอื่นๆ ภายในท่อรวบรวมน้ำเสียก่อนไหลเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำ ซึ่งระบบท่อรวบรวมน้ำเสียของกรุงเทพมหานครเป็นการวางระบบท่อรวบรวมน้ำเสียแบบรวม กล่าวคือ น้ำเสียและน้ำฝนจะอยู่ในท่อรวบรวมน้ำเสียเดียวกัน โดยพลาสติกที่สะสมในสิ่งแวดล้อมจะถูกลำเลียงโดยน้ำฝน ไหลบ่าลงสู่ท่อรวบรวมน้ำเสียจากท่อระบายน้ำสาธารณะและเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย ณ โรงควบคุมคุณภาพน้ำ (Ou et al., 2016; Hidayaturrahman et al., 2019) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ Cole et al. (2011); Essel et al. (2015) และ Boucher et al. (2017) ได้ระบุว่าไมโครพลาสติกเกิดจากการแตกหักและย่อยสลายของชิ้นพลาสติกขนาดใหญ่กลายเป็นชิ้นพลาสติกที่มีขนาดเล็ก โดยมีปัจจัยที่ทำให้เกิดการย่อยสลายทั้งแสงแดด ลม กระแสน้ำ และอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ขยะที่ถูกทิ้งและนำไปกำจัดอย่างไม่ถูกต้องมีโอกาสปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและแตกหักย่อยสลายเป็นไมโครพลาสติก อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้พบไมโครพลาสติกในน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

สำหรับในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการบำบัดพบปริมาณไมโครพลาสติกคิดเป็น 34.5–51.5% จากปริมาณที่พบทั้งหมดในระบบบำบัด (Fig. 2A) ลักษณะที่พบส่วนใหญ่ คือ ชิ้นส่วนวัตถุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Fragment) รองลงมาคือ แผ่นฟิล์ม (Film) และเส้นใย (Fiber) ดังแสดงใน Fig. 2C โดยมีจำนวนไมโครพลาสติกในน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 2.2–13.8 ชิ้นต่อลิตร (Table 1) ต่ำกว่าปริมาณที่พบในตัวอย่างน้ำทิ้งของการศึกษาของ Ziajahromi et al. (2021) ที่ทำการศึกษาไมโครพลาสติกในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสีย 3 แห่ง ในประเทศออสเตรเลีย พบไมโครพลาสติกอยู่ในช่วง 9 ชิ้นต่อลิตร (ต่ำสุด) ถึง 91 ชิ้นต่อลิตร (สูงสุด) โดยมีค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 52 ชิ้นต่อลิตร เมื่อพิจารณาในหน่วยร้อยละ พบว่ามีไมโครพลาสติกในน้ำทิ้งเพียง 0.2–1.8% สาเหตุที่ค่าดังกล่าวแตกต่างกัน อาจเนื่องจากความแตกต่างของวิธีการเก็บตัวอย่างและเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ถึงแม้ว่า ไมโครพลาสติกที่พบในน้ำทิ้งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำจะมีปริมาณต่ำในหน่วยชิ้นต่อลิตร แต่เมื่อพิจารณาจากปริมาณน้ำทิ้งในหน่วยชิ้นต่อวัน แสดงให้เห็นว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำยังคงเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญที่ปล่อยไมโครพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อม (Hidayaturrahman et al., 2019; Ziajahromi et al., 2021).

Table 1 The amount of microplastics found in the wastewater treatment system.

Type of MPs	Influent				Effluent				Anoxic Tank				Sludge			
	MPs (MP/L)				MPs (MP/L)				MPs (MP/L)				MPs (MP/g)			
	Aug-20	Oct-20	Feb-21	Mar-21	Aug-20	Oct-20	Feb-21	Mar-21	Aug-20	Oct-20	Feb-21	Mar-21	Aug-20	Oct-20	Feb-21	Mar-21
Fragment	30.0	18.3	5.1	9.4	6.5	1.6	1.7	4.8	21.9	71.3	4.4	32.7	28.9	25.8	14.2	83.2
Flim	0.0	10.6	0.2	0.0	7.1	1.9	0.2	0.2	2.0	1.8	0.9	0.1	0.7	5.8	0.8	1.0
Fiber	0.5	0.1	0.4	0.6	0.2	0.5	0.3	0.2	3.9	0.8	1.1	0.0	0.8	0.3	0.7	1.2
Total	30.5	29.0	5.7	10.0	13.8	4.0	2.2	5.2	27.8	73.9	6.4	32.8	30.4	31.9	15.7	85.4

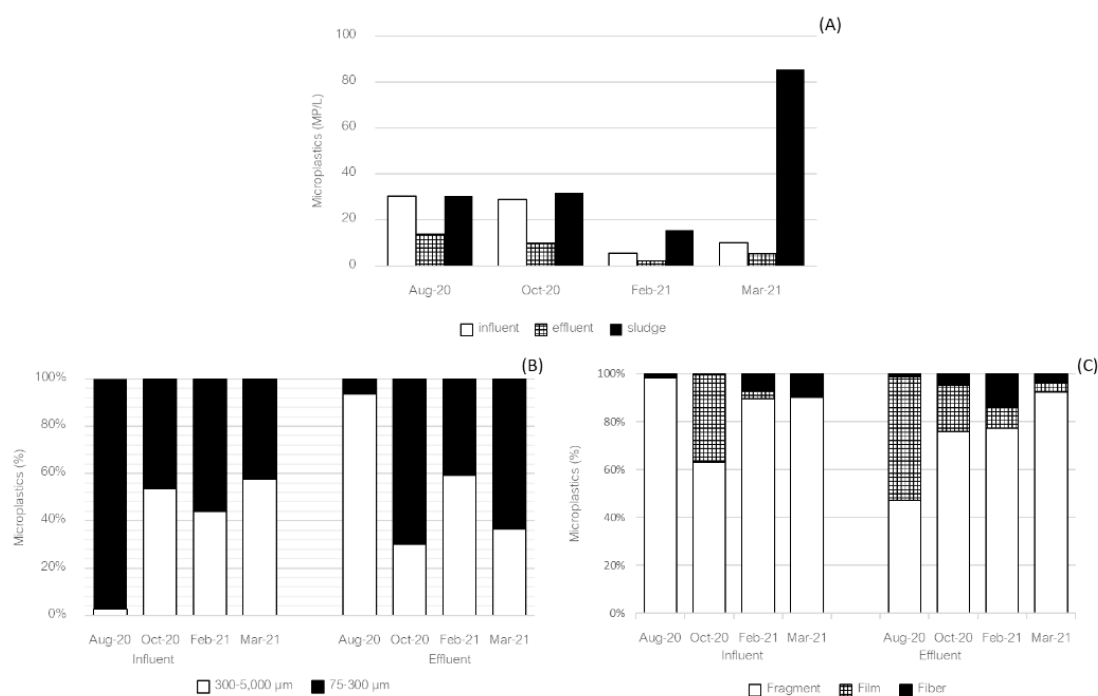


Fig. 2 Microplastics found in wastewater treatment systems: (A) The amount of microplastics in each sample; (B) Size of microplastics in influent and effluent; (C) Shape of microplastics influent and effluent

จากผลการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกใน Anoxic Tank พบว่าไมโครพลาสติกส่วนใหญ่ที่พบมีขนาดใหญ่ (300-5,000 ไมโครเมตร) มากกว่าไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็ก (75-300 ไมโครเมตร) จากกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ไมโครพลาสติก (Fig. 3A) แสดงปริมาณไมโครพลาสติกทั้งสองขนาด พบไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ปริมาณมากในทุกช่วงเวลาการสุ่มเก็บตัวอย่างทั้ง 4 ครั้ง โดยลักษณะรูปร่างที่พบ ได้แก่ ไมโครพลาสติกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Fragment) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 86 ของปริมาณไมโครพลาสติกทั้งหมดที่พบในตัวอย่างน้ำเสียจากถัง Anoxic Tank (หน่วยขึ้นต่อลิตร) รองลงมาคือ แผ่นฟิล์ม (Film) คิดเป็นร้อยละ 6 และเส้นใย (Fiber) คิดเป็นร้อยละ 8 ตามลำดับ (Fig. 3B) จากการเดินระบบของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดังกล่าว พบว่ามีการดึงตะกอนจุลินทรีย์กลับเข้ามาในถัง anoxic โดยภายในถังมีระบบกวนผสมแบบ Mixer ทำให้เกิดการกวนผสมระหว่างตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียเข้าด้วยกัน (ข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน) ซึ่งอาจส่งผลให้พบปริมาณไมโครพลาสติกจาก Anoxic Tank สูงกว่าในน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัด อย่างไรก็ตาม มีไมโครพลาสติกบางส่วนที่ไม่จับตัวและจมตัวกับตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำ และถูกปล่อยเข้าสู่กระบวนการบำบัดขั้นตอนถัดไป

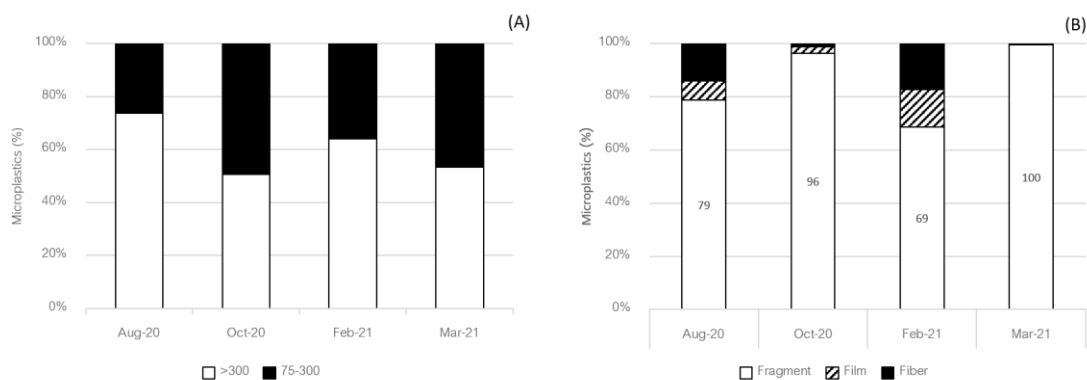


Fig. 3 Microplastics found in Anoxic Tank: (A) classified by size; (B) classified by shape.

การวิเคราะห์ไมโครพลาสติกที่สะสมในตะกอนจุลินทรีย์ ตรวจพบไมโครพลาสติกในตัวอย่างตะกอนมีตั้งแต่ 3–152 ชิ้นต่อกรัม (Table 1 ; Fig. 4A) ซึ่งค่าดังกล่าวสูงกว่าปริมาณไมโครพลาสติกที่พบในตะกอนจุลินทรีย์ของ Ziajahromi et al. (2021) ที่อยู่ในช่วง 48.5– 56.5 ชิ้นต่อกรัม แต่ต่ำกว่าปริมาณที่พบในตะกอนของ Lares et al. (2018) ตรวจพบไมโครพลาสติกอยู่ที่ 171 ชิ้นต่อกรัม เนื่องจากไมโครพลาสติกตกตะกอนลงพร้อมกับสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้ปริมาณไมโครพลาสติกลดลง จึงทำให้พบไมโครพลาสติกปริมาณมากในตะกอนจุลินทรีย์

ลักษณะของไมโครพลาสติกที่พบส่วนมากตรวจพบลักษณะชิ้นส่วนวัตถุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Fragment) มากที่สุด รองลงมาคือแผ่นฟิล์ม (Film) และเส้นใย (Fiber) ตามลำดับ (Fig. 4B) โดยมีความสอดคล้องกับตัวอย่างไมโครพลาสติกที่พบในน้ำเสียเข้าระบบบำบัด น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัด และน้ำจาก Anoxic Tank ผลการศึกษาที่ได้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Ziajahromi et al. (2021), Talvitie et al. (2017) และ Leslie et al. (2017) ที่พบไมโครพลาสติกชนิดเส้นใยมากที่สุดจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำในประเทศออสเตรเลีย ในขณะที่ Hidayaturrahman et al. (2019) พบไมโครบีดส์ มากที่สุดในน้ำเสียจากโรงบำบัดในประเทศเกาหลีใต้ อาจเนื่องมาจากปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และกระบวนการคัดแยกและเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน รวมทั้งนโยบายการยกเลิกการใช้พลาสติกไมโครบีดส์ในผลิตภัณฑ์ของแต่ละประเทศ

Boucher et al. (2017) รายงานว่าการแตกตัวของพลาสติกชิ้นใหญ่หรือมาโครพลาสติกจนกลายเป็นไมโครพลาสติกนั้น จะต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งกระบวนการย่อยสลายเกิดได้ทั้งกระบวนการย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) และกระบวนการย่อยสลายด้วยแสงอาทิตย์ (UV degradation) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ ส่งผลให้โครงสร้างของพลาสติกเกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็ก ซึ่งมีข้อมูลที่สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Cole et al. (2011), Uheida et al. (2012) และ Tang et al. (2019) เกี่ยวกับการสลายตัวของพลาสติก แม้ว่าพลาสติกจะสามารถแตกตัวเป็นไมโครพลาสติกได้ด้วยปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น แต่มีความเป็นไปได้น้อยที่ไมโครพลาสติกจะเกิดขึ้นได้ระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อย่อยสลายพลาสติกที่ตกค้างอยู่ในระบบได้อย่างสมบูรณ์ พลาสติกทั่วไปส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ทนทานและทนต่อการย่อยสลาย (Leslie et al., 2017)

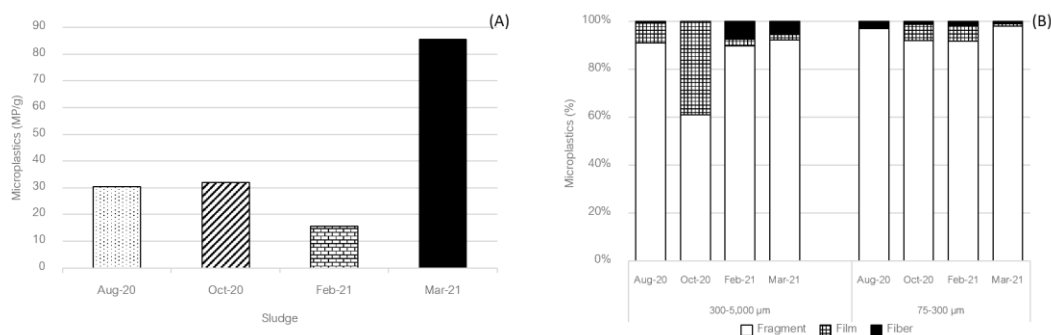


Fig. 4 Microplastics in Sludge: (A) the amount of microplastics found in sludge; (B) shape of microplastics found in sludge.

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาปริมาณ รูปร่าง และขนาดของไมโครพลาสติกในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนและตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดใหญ่แห่งหนึ่ง กรุงเทพมหานคร พบว่ามีปริมาณไมโครพลาสติกในน้ำเสียและน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 10.0–30.5 ชิ้นต่อลิตร และ 2.2–13.8 ชิ้นต่อลิตร ตามลำดับและปริมาณไมโครพลาสติกในตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 15.7–85.4 ชิ้นต่อกรัม รูปร่างส่วนใหญ่ที่พบเป็นไมโครพลาสติกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (fragment) ขนาดที่ตรวจพบมีขนาดคละกันอยู่ในช่วง 75–5,000 ไมโครเมตรทั้งในตัวอย่างน้ำเสีย น้ำทิ้งและตะกอนจุลินทรีย์ และพบไมโครพลาสติกส่วนใหญ่สะสมอยู่ในตะกอนจุลินทรีย์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสโครงการวิจัย ร-ม 14.63

เอกสารอ้างอิง

- Arhant, M., Gall, M.L., Gac, P.Y.L., Davies, P. 2019. Impact of hydrolytic degradation on mechanical properties of PET - Towards an understanding of microplastics formation. *Polym. Degrad. Stab.* 161: pp. 175–182. doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.021
- Uheida, A., Mejía, H.G., Abdel-Rehim, M., Hamd, W., Dutta, J. 2021. Visible light photocatalytic degradation of polypropylene microplastics in a continuous water flow system. *J. Hazard. Mater.* 406: 124299. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124299
- Boucher, J. Friot D. 2017. Primary Microplastics in the Oceans: A global evaluation of sources. Gland, Switzerland: IUCN. pp. 43. doi: dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en
- 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. *Mar. Pollut. Bull.* 149: 110626. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110626
- Conley, K., Clum, A., Deepe, J., Lane, H., Beckingham, B. 2019. Wastewater treatment plants as a source of microplastics to an urban estuary: Removal efficiencies and loading per capita over one year. *Water Res.* X3: 100030. doi:10.1016/j.wroa.2019.100030

- Thevenon, F., Carroll, C., Sousa, J. 2014. Plastic debris in the ocean: The Characterization of Marine Plastics and their Environmental Impacts, Situation Analysis Report. Gland, Switzerland: IUCN. pp. 52. doi: 10.2305/IUCN.CH.2014.03.en
- Hidayaturrahmana, H., Lee, T.G. 2019. A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.071
- Leslie, H.A., Brandsma, S.H., Velzen, M.J.M., Vethaak, A.D. 2017. Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota. *Environ. Int.* 101: 133–142. doi.org/10.1016/j.envint.2017.01.018
- Li, J., Green, C., Reynolds, A., Shi, H., Rotchell, J.M. 2018. Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environ. Pollut.* 241: 35–44. doi:10.1016/j.envpol.2018.05.038
- Ou, H., Zeng, E.Y. 2016. Occurrence and fate of microplastics in wastewater treatment plants. In: *Microplastic Contamination in Aquatic Environments: An Emerging Matter of Environmental Urgency*, Hutchins, L. (Ed), Janco, C. publisher, SPI Global, India pp. 317–338. doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00010-2
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C. 2015. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., Setälä, O. 2019. Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res.* 123: 401–407. doi: 10.1016/j.watres.2017.07.005.
- Lares, M., Ncibi, M.C., Sillanpaa, M., Sillanpaa, M. 2018. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Res.* 133: 236-246. doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049
- Napper, I.E., Thompson, R.C. 2016. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. *Mar. Pollut. Bull.* 112: 39–45 doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.025
- Essel, R., Engel, L., nova-Institut GmbH, M.C., Hürth, Germany. 2014. Sources of microplastics relevant to marine protection in Germany. The Federal Environment Agency (Germany), Umweltbundesamt, Germany, pp. 46.
- Ziajahromi, S., Neale, P.A., Rintoul, L., Leusch, F.D.L. 2017. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. doi: 10.1016/j.watres.2017.01.042.
- Ziajahromi, S., Neale, P.A., Silveira, I.T., Chua, A., Leusch, F.D.L. 2021. An audit of microplastic abundance throughout three Australian wastewater treatment plants. *Chemosphere* 263: 128294 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128294.

การศึกษาชนิดปริมาณและลักษณะของขยะทะเลบริเวณเกาะสีซังประเทศไทย

The study of types, quantity and characteristics of marine Wastes on Srichang Island, Thailand

วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์, กฤษฎา สุริศรี*, สุชีลา พลเรือง

Varinporn Asokbunyarat, Kudsada surisee*, Sucheela Polruang

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: kidsada.su@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษ ปริมาณขยะทะเลตกค้างและขยะทะเลที่เข้ามาใหม่ โดยพื้นที่ที่ทำการศึกษาคือ เกาะสีซัง ซึ่งแบ่งเป็น 3 พื้นที่ศึกษา คือ หาดหินหมวดศิลา (ทิศเหนือฝั่งตะวันออกของเกาะ) แหลมมูง (ทิศใต้ฝั่งตะวันออกของเกาะ) และหาดถ้ำพัง (ทิศตะวันตกของเกาะ) ทำการเก็บตัวอย่าง 3 ครั้งในช่วงเวลา 1 ปี คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และช่วงปลายฝนต้นหนาว เพื่อศึกษความแตกต่างของปริมาณและประเภทของขยะทะเล ผลการศึกษพบว่าในช่วงฤดูฝนพบขยะทะเลทั้งหมด 3986 ชิ้น น้ำหนัก 109.77 กิโลกรัม คิดเป็นความหนาแน่นเฉลี่ยต่อพื้นที่เท่ากับ 66.72 ± 49.75 ชิ้น/100 ตารางเมตร ในช่วงฤดูหนาวพบขยะทะเลทั้งหมด 508 ชิ้น น้ำหนัก 8.12 กิโลกรัม ในช่วงฤดูฝนขยะทะเลพบปริมาณมากกว่าในช่วงฤดูหนาวประมาณ 6.8 เท่า

คำสำคัญ: ขยะทะเล, ฤดูฝน, เกาะสีซัง

Abstract

This research studied the amount of residual marine debris and new marine debris, Koh Sichang. In the area of Koh Sichang, it was divided into 3 study areas. 2 study areas are at the east side of Koh Sichang; namely Hin Muat Sila beach and Laem Ngu, which are in the northern part and southern part of the island, respectively. The other one study area is Tham Phang beach, which is on the west side of Koh Sichang. In each study area samples were collected 3 times over a period of 1 year: rainy season, winter, and late rainy season. The difference in quantity and types of marine debris were examined. The results showed that in the rainy season the total amount of marine debris from all study areas were 3,986 pieces (109.77 kilograms), which representing an average density per area of 66.72 ± 49.75 pieces/100 square meters. During the winter and late rainy period, a total of 508 pieces of marine debris from all study areas were found, which weighed about 8.12 kg. The amount of waste in the rainy season was approximately 6.8 times more than in winter or in late rainy period.

Keywords: Marine debris, Rainy season, Sichang Island

คำนำ

การเติบโตของประชากรที่มากขึ้น และรูปแบบการดำเนินชีวิตปัจจุบันส่งผลต่อปริมาณขยะที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการจัดการขยะที่ไม่เพียงพอต่อปริมาณของขยะ และการจัดการขยะที่ไม่ถูกวิธี ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางอากาศจากการเผาขยะอย่างไม่ถูกวิธีทำให้ส่งผลเสียต่อสุขภาพ (Kanhai et al., 2021) มลพิษทางดินและน้ำใต้ดินจากการฝังกลบอย่างไม่ถูกวิธี (Qasim et al., 2020) และมลพิษทางน้ำจากการทิ้งขยะลงแม่น้ำ และขยะในแม่น้ำจะไหลลงสู่ทะเล ทำให้ส่งผลกระทบต่อชุมชนและระบบนิเวศริมชายฝั่ง (Perez-Venegas et al., 2017) จากข้อมูลทั่วโลกเกี่ยวกับขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น ความหนาแน่นของประชากร และสถานะทางเศรษฐกิจ ทำให้สามารถคาดการณ์ปริมาณขยะพลาสติกบนบกที่ไหลเข้าสู่ทะเล และมหาสมุทร จากการคาดการณ์ดังกล่าว พบว่าในปี ค.ศ. 2010 ปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นใน 192 ประเทศทั่วโลกบริเวณชายฝั่งทะเล คิดเป็น 275 ล้านเมตริกตัน (MT) ขยะดังกล่าวถูกปลดปล่อยสู่มหาสมุทรคิดเป็น 4.8 ถึง 12.7 ล้านตัน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยขยะพลาสติกปนเปื้อนในมหาสมุทรได้แก่ขนาดประชากร และคุณภาพของระบบการจัดการขยะ โดยคาดว่าหากไม่มีการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานด้านการจัดการของเสีย จะทำให้ปริมาณขยะพลาสติกสะสมจากแผ่นดินปนเปื้อนในมหาสมุทรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Jambeck et al., 2015) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สังคมและเศรษฐกิจของชุมชนที่อาศัยอยู่โดยรอบหรือการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ติดชายฝั่งดังกล่าว โดยปัญหาดังกล่าวมีแนวโน้มส่งผลกระทบมากขึ้นเนื่องจากการเติบโตของประชากรและการพัฒนาเมืองตามชายฝั่งต่างๆของโลกที่เพิ่มสูงขึ้น (Rangel-Buitrago et al., 2019).

งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมขยะทะเลบริเวณเกาะสีชังเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณชนิดของขยะทะเลในแต่ละพื้นที่ศึกษาของเกาะสีชังใน 3 ฤดูกาล (ฤดูฝน ฤดูหนาว และช่วงปลายฝนต้นหนาว) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและชนิดของขยะทะเล เช่น ฤดูกาล ทิศทางของกระแสลม พื้นที่ตั้งของจุดเก็บตัวอย่าง และกิจกรรมที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง

วิธีการศึกษา

การเก็บขยะทะเลบริเวณเกาะสีชัง แบ่งเป็น 3 พื้นที่ศึกษา คือ หาดหินหมวดศิลา (ทิศเหนือฝั่งตะวันออกของเกาะ) แหลมมู (ทิศใต้ฝั่งตะวันออกของเกาะ) และหาดถ้ำพัง (ทิศตะวันตกของเกาะ) ตาม Fig. 1 โดยแต่ละพื้นที่ศึกษา ทำการเก็บขยะทะเลในเขตน้ำขึ้น-น้ำลง 3 ครั้ง ใน 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาน้ำลงต่ำสุดครั้งที่ 1 (ขยะตกค้าง) ช่วงเวลาน้ำขึ้นสูงสุดครั้งที่ 1 (ขยะใหม่) และช่วงน้ำลงต่ำสุดครั้งที่ 2 (ขยะใหม่) โดยจะมีการใช้เรือเก็บขยะลอยน้ำชนิดไอโฟน KU Trash Sweeper V₃ เก็บขยะในน้ำ และคนเดินเก็บขยะบนชายฝั่งตามรอบพื้นที่ศึกษา ตาม Fig. 2

การกำหนดพื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่าง

ในการกำหนดพื้นที่ศึกษา จะกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาในเขตน้ำขึ้น-น้ำลง ขนาด กว้าง × m ยาว a m ตามรูป 2 ขนาดพื้นที่ศึกษาเกาะสีชัง คือ หาดหินหมวดศิลา ขนาด 1680 m² แหลมมู ขนาด 1885 m² และถ้ำพัง ขนาด 2175 m² โดยแต่ละพื้นที่ศึกษา จะเก็บขยะทะเลในเขตน้ำขึ้น-น้ำลงตามกรอบพื้นที่ศึกษา (Fig. 2) 3 ครั้ง ใน 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ครั้งที่ 1 เก็บขยะในช่วงเวลาน้ำลงต่ำสุด ใช้เรือเก็บขยะบริเวณผิวน้ำ และคนเดินเก็บขยะบนชายฝั่ง เพื่อกำจัดขยะที่ตกค้างอยู่ (set 0) ครั้งที่ 2 เก็บขยะในช่วงเวลาน้ำขึ้นสูงสุด ใช้เรือเก็บขยะในน้ำซึ่งเป็นขยะใหม่ที่เข้ามา และครั้งที่ 3 เก็บขยะในช่วงเวลาน้ำลงต่ำสุด ใช้เรือเก็บขยะบริเวณผิวน้ำ และคนเดินเก็บขยะบนชายฝั่งซึ่งเป็นขยะใหม่ที่เข้ามาในช่วงเวลาถัดมา

จากนั้นคัดแยกชนิด ชั่งน้ำหนักขยะ และเปรียบเทียบข้อมูลชนิดปริมาณและลักษณะความสมบูรณ์หรือการเสื่อมสภาพของขยะทะเล

ฤดูกาลที่ทำการศึกษาขยะทะเล ได้แก่ ช่วงฤดูฝน (ปลายเดือนกันยายน) เป็นตัวแทนของช่วงฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งมีทิศทางพัดจากตะวันตกของเกาะไปทางตะวันออกของเกาะ และในช่วงฤดูหนาว (ปลายเดือนพฤศจิกายน) เป็นตัวแทนของช่วงฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีทิศทางพัดจากตะวันออกของเกาะไปทางตะวันตกของเกาะเหมือนกันกับช่วงปลายฝนต้นหนาว (สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ, 2560)



Fig. 1 Location of study area on Koh Sichang

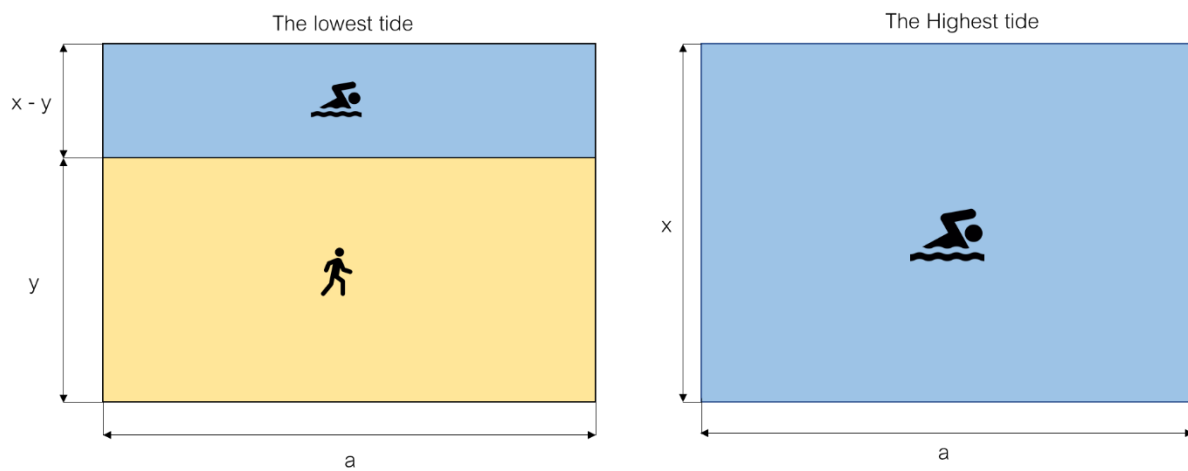


Fig. 2 Size of study area at the highest tide and the lowest tide

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

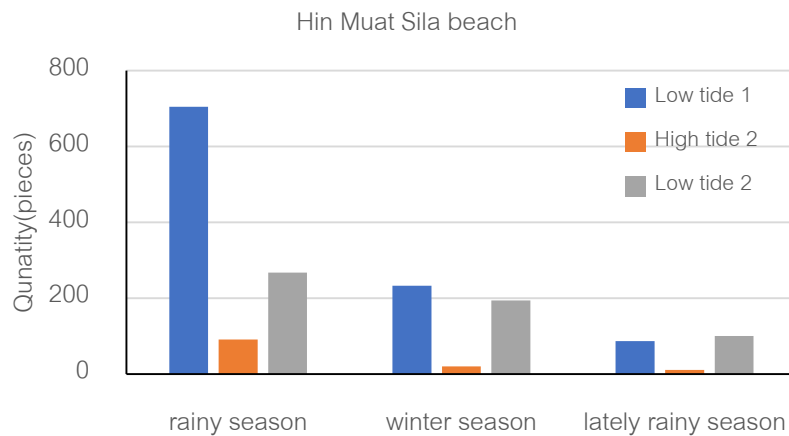


Fig. 3 Comparison of marine debris at Hin Muat Sila beach

จากกราฟแนวโน้มขยะในพื้นที่หาดหินหมวดศิลา (Fig. 3) พบว่ามีแนวโน้มของปริมาณขยะมีความใกล้เคียงกัน ทั้ง 3 ฤดู (ฤดูฝน ฤดูหนาว และช่วงปลายฝนต้นหนาว) คือ ปริมาณขยะพบจำนวนมากในช่วงน้ำลง และลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงน้ำขึ้น ในช่วงฤดูฝน (ฤดูมรสุม) ปริมาณขยะตกค้างพบจำนวนมากในช่วงน้ำลงครั้งที่ 1 และปริมาณขยะใหม่ลดลงชัดเจนในช่วงน้ำขึ้นครั้งที่ 1 ซึ่งปริมาณขยะในช่วงน้ำลงและน้ำขึ้นในฤดูมรสุมจะแตกต่างกับในฤดูหนาวและช่วงปลายฝนต้นหนาวอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามปริมาณขยะในฤดูหนาวและช่วงปลายฝนต้นหนาวพบจำนวนใกล้เคียงกัน และหลังจากเก็บขยะตกค้างในช่วงน้ำลง ปริมาณขยะที่เก็บได้ในช่วงน้ำขึ้นพบจำนวนลดลงอย่างชัดเจน และปริมาณขยะพบจำนวนเพิ่มขึ้นในช่วงน้ำลงอีกครั้ง เนื่องจากขยะจะพัดพาลับมาอีกครั้งในช่วงเวลาน้ำขึ้นในตอนกลางคืน

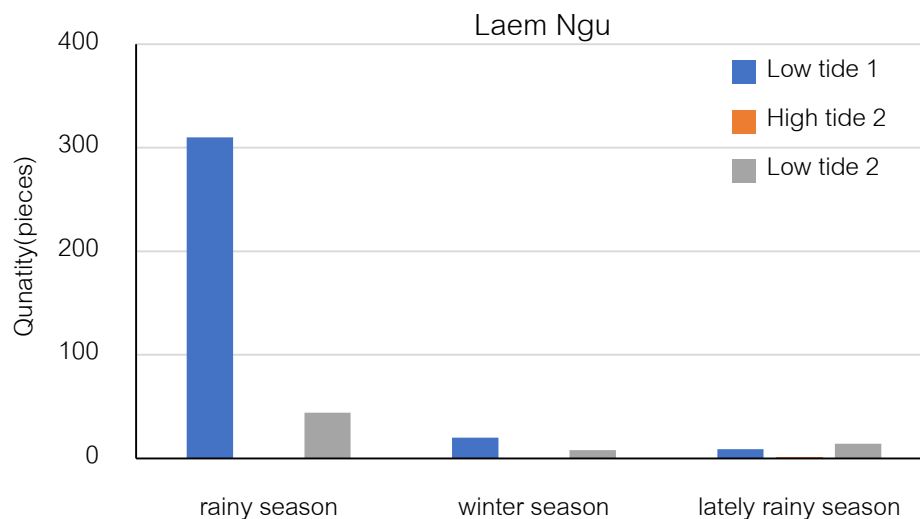


Fig. 4 Comparison of marine debris at Laem Ngu

แนวโน้มขยะในพื้นที่แหลมงู (Fig. 4) พบว่าแนวโน้มปริมาณขยะทั้ง 3 ฤดู มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณขยะในฤดูฝน (ฤดูมรสุม) ของบริเวณพื้นที่แหลมงู มีจำนวนมากกว่าในทั้ง 2 ช่วงเวลา (น้ำลงครั้งที่ 1 และ 2) เนื่องจาก

ขยะจะพัดพาเข้ามาสะสมตลอดเวลา ซึ่งจะแตกต่างกับในฤดูหนาวและช่วงปลายฝนต้นหนาว ที่ปริมาณขยะมีจำนวนน้อยในทุกช่วงเวลา (น้ำลงครั้งที่ 1 น้ำขึ้นครั้งที่ 1 และน้ำลงครั้งที่ 2) อีกทั้งลักษณะของคลื่นลมมีความเบาและสงบกว่า

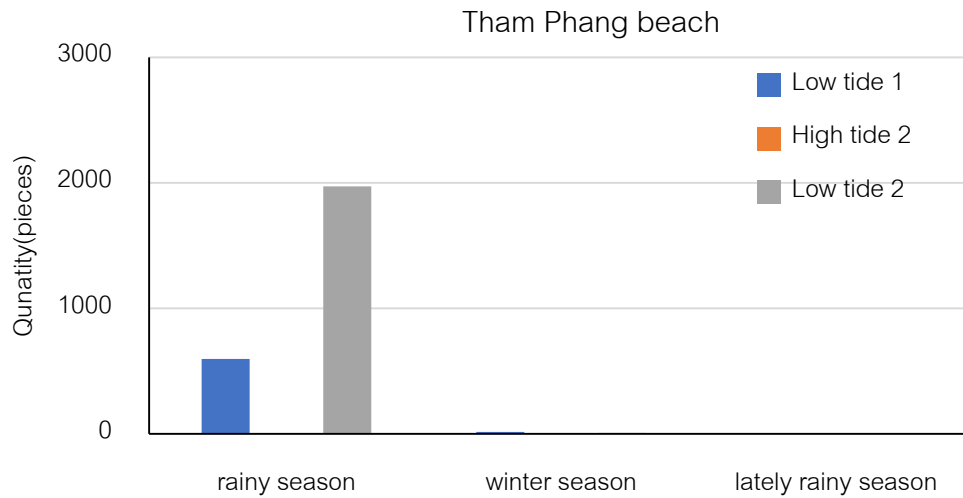


Fig. 5 Comparison of marine debris at Tham Phang beach

จากกราฟแนวโน้มขยะในพื้นที่ถ้ำพัง (Fig. 5) พบว่าแนวโน้มของปริมาณขยะในฤดูฝน (ฤดูมรสุม) ของบริเวณหาดถ้ำพังมีจำนวนมาก โดยในช่วงเวลาน้ำลงครั้งที่ 2 พบว่าขยะในฤดูมรสุมมีปริมาณสูงสุด แม้ว่าขยะสะสมและขยะใหม่จะถูกเก็บในช่วงเวลาก่อนหน้า สาเหตุจากคลื่นและลมที่ค่อนข้างแรงพัดพาขยะเข้ามาสู่หาดโดยตรงในช่วงมรสุมนั้น ซึ่งจะแตกต่างกับในช่วงฤดูหนาวและช่วงปลายฝนต้นหนาวที่คลื่นลมสงบ ทำให้ปริมาณขยะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจากการวิเคราะห์ พบว่าขยะจะพัดพาเข้ามาสะสมบริเวณหาดถ้ำพังเฉพาะในช่วงน้ำขึ้นตอนกลางคืน

เนื่องจากในฤดูฝน (ฤดูมรสุม) ขยะมีปริมาณมากที่สุดจึงได้ศึกษาชนิดและประเภทของขยะที่พบ จากการรวบรวมขยะในช่วงฤดูมรสุมเดือนกันยายน 2563 พบขยะทั้งหมด 3986 ชิ้น น้ำหนัก 109.77 กิโลกรัม คิดเป็นความหนาแน่นเฉลี่ยต่อพื้นที่เท่ากับ 66.72 ± 49.75 ชิ้น/100 ตารางเมตร โดยทำการแยกขยะเป็น 11 ประเภท ได้แก่ พลาสติก ยาง แก้ว เชือก โฟม โลหะ/อลูมิเนียม กระดาษ ถุงกระสอบ ผ้า วัสดุพิเศษไม้ และอื่น ๆ โดยประเภทขยะที่พบมากที่สุด (ตามรูป 6) คือ เชือก (ร้อยละ 44.81) รองลงมาเป็นพลาสติก (ร้อยละ 44.08) ยาง (ร้อยละ 4.14) โฟม (ร้อยละ 3.09) วัสดุพิเศษและเศษไม้ (ร้อยละ 1.51) แก้ว (ร้อยละ 0.98) กระดาษ (ร้อยละ 0.38) ถุงกระสอบ (ร้อยละ 0.30) ผ้า (ร้อยละ 0.28) อื่น ๆ (ร้อยละ 0.28) และโลหะ/อลูมิเนียม (ร้อยละ 0.18) ตามลำดับ

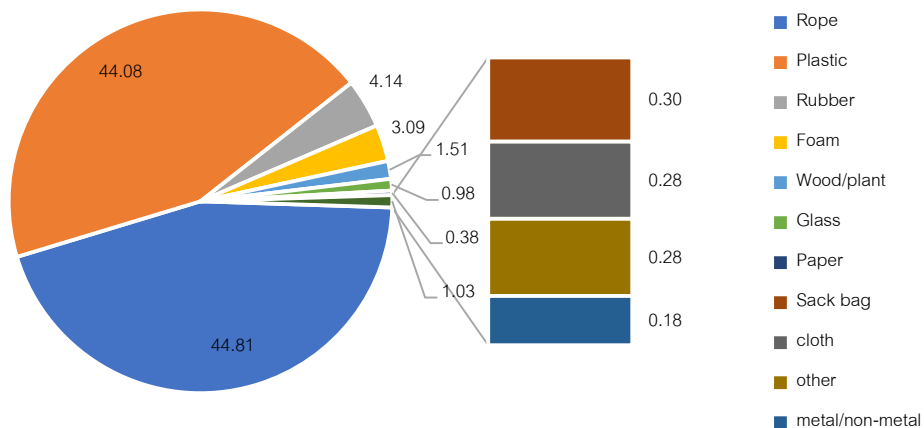


Fig. 6 Composition of marine debris around Koh Sichang in rainy season

ในช่วงฤดูฝน (ฤดูมรสุม) ขยะพลาสติกเป็นขยะที่พบมากที่สุดรองลงมาจากเศษเชือก มีจำนวน 1757 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 44.08 ของขยะที่พบทั้งหมด และมีน้ำหนัก 61.93 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 56.42 ของน้ำหนักขยะทั้งหมด โดยขยะที่พบมากที่สุดในขยะพลาสติก คือถุงพลาสติก จำนวน 807 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 49.03 ของขยะพลาสติกทั้งหมด รองลงมาเป็นหลอด จำนวน 199 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 12.09 ของขยะพลาสติกทั้งหมด โดยขยะพลาสติกส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นขยะที่มาจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์

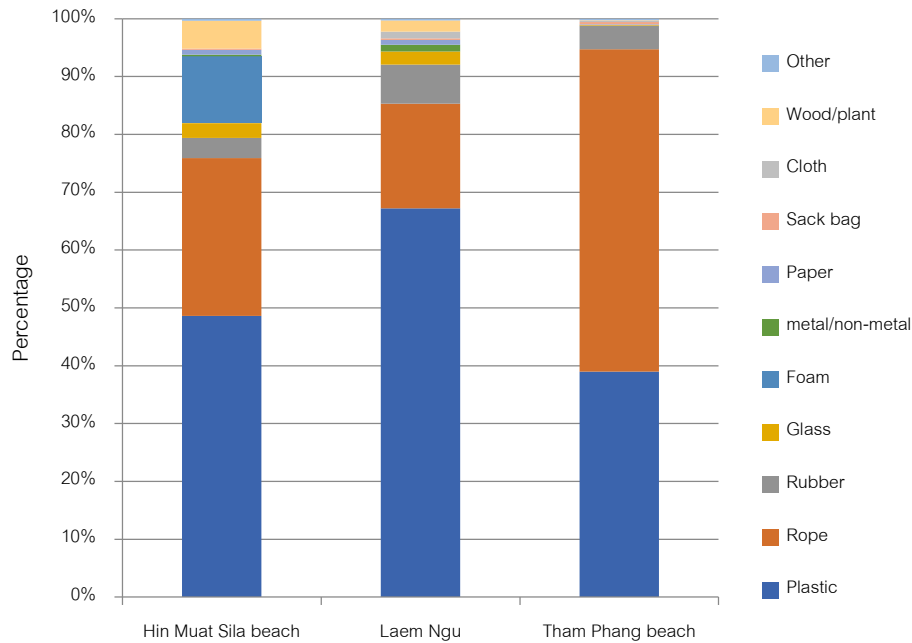


Fig. 7 Proportion of marine debris in each study area of Koh Sichang in rainy season

จากกราฟสัดส่วนของขยะในแต่ละพื้นที่ศึกษา (Fig. 7) พบว่ามีขยะพลาสติกและเชือกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kaviarasan et al., 2020) ได้ทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับขยะจาก 3 ชายหาดของหมู่เกาะลักษทวีป (Lakshadweep Islands) คือ เกาะ Kadmat เกาะ Suheli Par และเกาะ Minicoy โดยที่เกาะ Kadmat และเกาะ Minicoy จะมีผู้คนอาศัยอยู่ มีการประกอบอาชีพประมงเป็นหลัก ส่วนเกาะ Suheli Par ไม่มีผู้คนอาศัยอยู่ การเก็บรวบรวมขยะจะทำได้ในช่วงเวลาน้ำลง และกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลการเก็บรวบรวมขยะทั้ง 3 เกาะพบว่าความหนาแน่นของขยะในแต่ละเกาะ 0.48 0.38 และ 0.16 ชิ้นต่อตารางเมตร ตามลำดับ ขยะส่วนใหญ่ที่พบ คือ อวนประมงมากถึงร้อยละ 42.56 รองลงมาเป็นฝาขวดน้ำพลาสติกและขยะพลาสติก ร้อยละ 13.42 กับ 11.41 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นเกาะจะพบขยะจำพวกอวนประมง และเศษเชือกจำนวนมาก อาจเป็นเพราะกิจกรรมจากการประกอบอาชีพของพื้นที่ศึกษานี้ ซึ่งเหมือนกับเกาะสี่ซึ่งที่พบ เชือก และพลาสติกเป็นขยะที่มีมากที่สุด

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาขยะทะเลบริเวณพื้นที่เกาะสี่ซึ่ง จังหวัดชลบุรี พบว่าในช่วงฤดูฝน(ฤดูมรสุม) ขยะทะเลทั้งหมด 3986 ชิ้น น้ำหนัก 109.77 กิโลกรัม คิดเป็นความหนาแน่นเฉลี่ยต่อพื้นที่เท่ากับ 66.72 ± 49.75 ชิ้น/100 ตารางเมตร ขยะที่พบมากที่สุดคือ พลาสติก และเศษเชือก รวมกันมากกว่า 80 % ของขยะประเภทอื่น และมีปริมาณขยะทั้งหมดมากกว่าในช่วง

ฤดูหนาวมากถึง 6.8 เท่า แสดงให้เห็นว่าฤดูการ การเปลี่ยนแปลงของกระแสลม และการประกอบกิจกรรมของคนพื้นที่ ส่งผลต่อปริมาณและประเภทของขยะทะเลบริเวณริมชายฝั่ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิจัยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ 2564 โครงการการบริหารจัดการขยะพลาสติกเชิงพื้นที่: การจัดการพลาสติกแบบครบวงจร

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ. 2560. ข้อมูลทิศทางลมและความเร็วเฉลี่ยบนกระแสลมบริเวณเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี.

กรมอุตุนิยมวิทยา.

Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Law, K.L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347: 768–771. [science.org/doi/10.1126/science.1260352](https://doi.org/10.1126/science.1260352)

Kanhai, G., Fobil, J.N., Nartey, B.A., Spadaro, J.V., Mudu, P. 2021. Urban municipal solid waste management: Modeling air pollution scenarios and health impacts in the case of Accra, Ghana. *Waste Manage.* 123: 15–22. doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.005

Kaviarasan, T., Naik, S., Sivadas, S.K., et al. 2020. Assessment of litter in the remote beaches of Lakshadweep Islands, Arabian Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 161: 111760. [doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111760](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111760)

Perez-Venegas, D. Pavés, H., Pulgar, J., Ahrendt, C., Seguel, M., Galbán-Malagón, C.j. 2017. Coastal debris survey in a Remote Island of the Chilean Northern Patagonia. *Mar. Pollut. Bull.* 125: 530–534. [doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.026](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.026).

Qasim, M., Xiao, H., He, K., et al. 2020. Impact of landfill garbage on insect ecology and human health. *Acta Tropica* 211: 105630. doi.org/10.1016/j.actatropica.2020.105630

Rangel-Buitrago, N., Vergara-Cortés, H., Barria-Herrera, J., Contreras-López, M., Agredano, R. 2019. Marine debris occurrence along Las Salinas beach, Viña Del Mar (Chile): Magnitudes, impacts and management. *Ocean & Coastal Management* 178: 104842. [doi:10.1016/j.ocecoaman.2019.104842](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104842)

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการกวนผสมในบ่อแอน็อกซิกของระบบบำบัดน้ำเสีย โรงงานชำแหละและแปรรูปสุกร

CFD simulation of mixing in anoxic tank of swine slaughterhouse wastewater treatment plant

ศตวรรษ เพชรล่อ, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ*

Satawat phechlor, Peerakarn Banjerdki*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E mail address: fengpkba@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บ่อแอน็อกซิกมีบทบาทในการกำจัดไนโตรเจนของระบบบำบัดน้ำเสีย การกวนผสมในบ่อนี้เพื่อป้องกัน การตกตะกอน โดยไม่มีการเติมก๊าซออกซิเจนลงในน้ำเสีย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนลดลง งานวิจัยนี้ศึกษา การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาข้อมูล บ่อแอน็อกซิก กว้าง 5.0 ม. ยาว 11 ม. สูง 5.0 ม. ระดับน้ำสูง 4.5 ม. โดยใช้โมเดลเครื่องกวนผสมแบบจุ่มใต้น้ำ จำนวน 1 ตัว ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 0.30 ม. ตำแหน่งการติดตั้ง สูง 2.5 ม. จากระดับพื้น และอยู่กึ่งกลางความกว้างของบ่อ ติดตั้งใบพัดในแนว 90 องศา ห่างจากผนังบ่อ 0.5 ม. ผลที่ได้พบว่า ความเร็วต่ำสุดและ สูงสุด คือ 0.001 และ 8.951 ม./วินาที ค่าความเร็วที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดบริเวณแอน็อกซิก น้อยกว่า 0.3 ม./วินาที พบว่ารอบแนวรัศมีของใบพัดทั้งแกน X และ Y มีความเร็ว มากกว่า 0.3 ม./วินาที ทำให้บริเวณนี้เกิดกระบวนการแอน็อกซิกได้ยากเนื่องจากความเร็วสูงทำให้เกิดการเติมออกซิเจนลงสู่น้ำเสีย ทั้งนี้บริเวณที่มีความเร็วต่ำสุดอาจเป็นบริเวณที่เกิดตะกอนสะสมได้

คำสำคัญ: การกวนผสม, การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, บ่อแอน็อกซิก

Abstract

Anoxic tank play a role in the nitrogen removal of wastewater treatment system. Mixing purpose of this tank to prevent sedimentation without adding oxygen that causes of reduction efficiency of nitrogen removal. This research aims to generate and study of CFD Simulation of mixing in anoxic tank dimensions 5.0 m (width), 11 m (length), 5.0 m (height) and 4.5 m water level of swine slaughterhouse wastewater treatment plant. Boundary conditions of submersible mixer are speed 400 rpm, propeller diameter 0.30 m. Installation location at 2.5 m of tank height, 2.5 m of tank width, propeller agitating at 90-degree angle, 0.5 m from tank wall. The simulation results minimum and maximum velocity are 0.001 and 8.951 m/s. Due to velocity of an anoxic zone should be less than 0.3 m/s. So, the velocity greater than 0.3 m/s anoxic process do not occurs caused by oxygen dissolved in wastewater while minimum velocity is should be sludge accumulation.

Keywords: Anoxic Tank, CFD Simulation, Mixing

คำนำ

กระบวนการแอน็อกซิกในระบบบำบัดน้ำเสียมีบทบาทสำคัญในการกำจัดไนโตรเจนที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยการเกิดปฏิกิริยา Denitrification ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ทำให้ไนเตรตถูกเปลี่ยนด้วยกระบวนการทางชีวภาพเป็นก๊าซไนโตรเจน ปลดปล่อยสู่บรรยากาศ (สุเทพ, 2552) การออกแบบบ่อแอน็อกซิกให้มีสภาวะที่เหมาะสมให้เกิดปฏิกิริยา Denitrification นั้น ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ควรน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าที่เหมาะสมในการเดินระบบขึ้นอยู่กับที่ระหว่าง 0.2–0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยหรือข้อจำกัดที่เป็นตัวกำหนดการทำงานของบ่อแอน็อกซิกแล้ว การกวนผสมของน้ำเสีย (Mixing) เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ในการควบคุมประสิทธิภาพของบ่อแอน็อกซิก โดยวัตถุประสงค์หลักคือ ป้องกันการตกตะกอนของของแข็ง โดยไม่มีการเติมก๊าซออกซิเจนลงในน้ำเสีย (James, 2014) ทำให้การควบคุมการทำงานของเครื่องกวนผสมมีบทบาทสำคัญในการควบคุมระบบ

การกวนผสมในระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมมี 3 วิธี คือ การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล การกวนผสมโดยใช้วิธีการสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกิริยาให้เกิดการหมุนเวียน และ การกวนผสมโดยการนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกิริยามาใช้ในการกวนผสม สำหรับการกวนผสมในบ่อแอน็อกซิกนิยมใช้ การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical Mixers) โดยอาศัยใบพัดในการกวนผสมน้ำเสียให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเครื่องกวนผสมชนิดนี้ผลิตออกมาสู่ท้องตลาดอย่างหลากหลาย ทั้งขนาดและรูปแบบของใบพัด สามารถเลือกตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่ต่างกันออกไปได้ (สันตติ, 2552)

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย การเลือกใช้เครื่องกวนผสม มีความสำคัญ และทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดสูงขึ้น การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบ และเลือกใช้เครื่องกวนผสม สามารถนำการศึกษาด้านพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamic: CFD) ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) มาใช้ในการสร้างแบบจำลองการทำงานก่อนการนำไปใช้ในระบบจริงได้

เนื่องจาก CFD เป็นการนำความรู้ทางด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ในการแก้ไขปัญหา การออกแบบด้านสิ่งแวดล้อมได้สะดวกและรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งในบางครั้งการทดลองในห้องปฏิบัติการไม่สามารถที่จะแก้ไขปัญหาได้เนื่องจากจะต้องมีการจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์เป็นอย่างมาก (ปราโมทย์, 2559) โดย CFD สามารถทำให้มองเห็นการเคลื่อนที่ ของของไหลในสภาวะหนึ่งและสามารถทำนาย ความเร็ว หรือ ทิศทาง ได้อย่างแม่นยำ ขึ้น และจะนำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้องและประหยัดค่าใช้จ่าย รวมทั้งการนำไปปรับปรุงระบบที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

ในงานวิจัยของ Eishaw et al. (2018) เปรียบเทียบผลการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งและระยะเวลาการทำงานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกวนผสม ในบ่อแอน็อกซิก 3 บ่อ ในโรงบำบัดน้ำเสียภาคเหนือรัฐควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย จากผลการวิจัย มีการปรับปรุงการวางตำแหน่งเครื่องกวนผสม ในตำแหน่งที่เหมาะสมจากการใช้โปรแกรม CFD วิเคราะห์ เพิ่มความเร็วการไหลเฉลี่ยด้วยระยะเวลาที่ลดลง การศึกษาและการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกวนผสมจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้าง และศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการกวนผสมในบ่อแอน็อกซิกของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฆ่าและแปรรูปสุกร ขนาด 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมและปรับปรุงการทำงานของเครื่องกวนผสมที่ใช้ในการเดินระบบของแอน็อกซิกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

การเขียนแบบและการจำลอง ของโปรแกรม SolidWorks มีขั้นตอนดังนี้

1. การ Sketch Drawing 2.สร้างโมเดลให้เป็น 3D Part Module 3.ประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน Assembly Module 4.กำหนดเงื่อนไข ขอบเขต 5.การจำลองการไหล CFD Computation Fluid Dynamics วิเคราะห์การกวนผสมใน บ่อ Anoxic ใช้คำสั่ง Flow Simulation ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2020 ดังแสดงใน Fig.1 (ปราโมทย์ และคณะ, 2552)

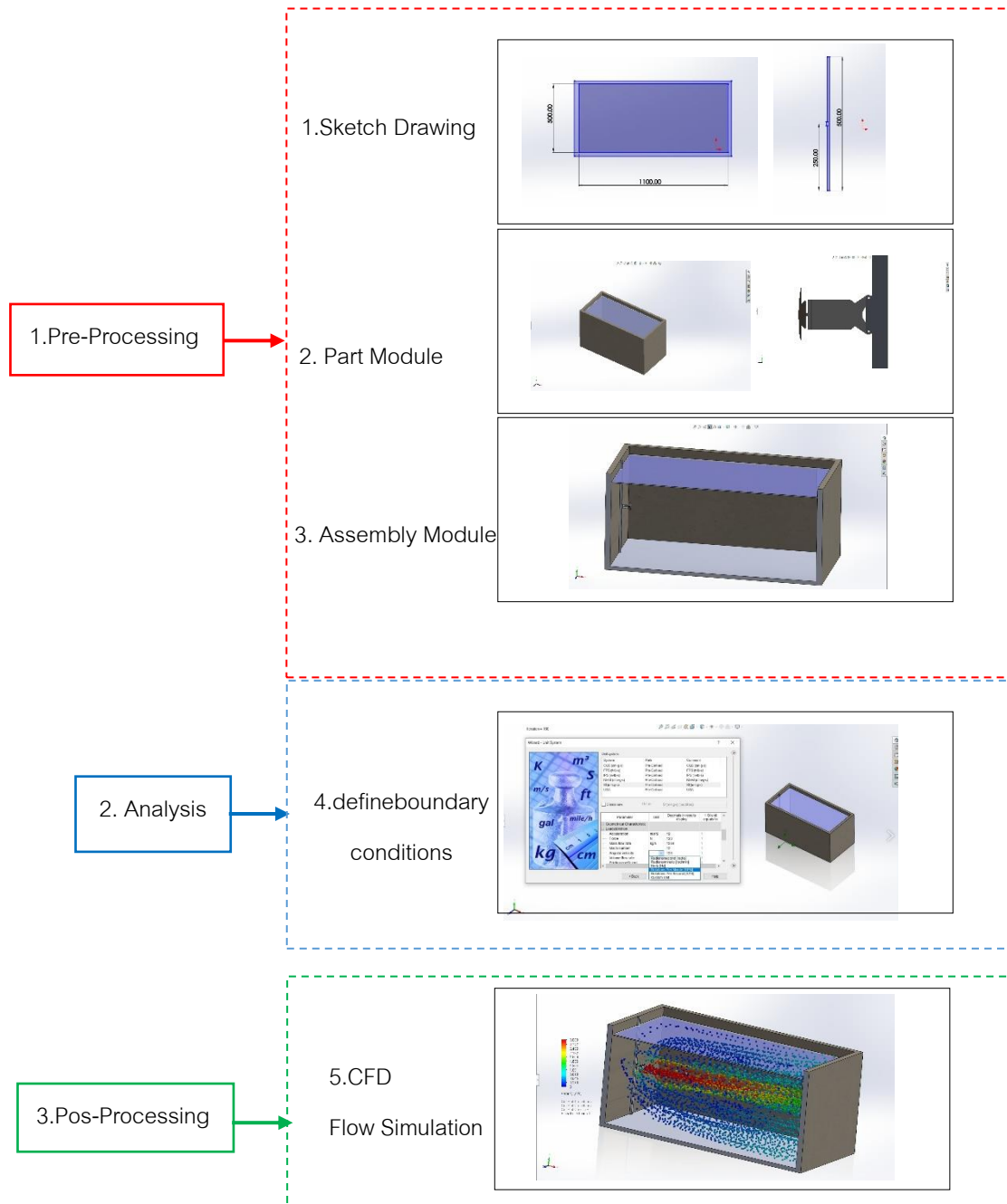


Fig.1 Design and flow simulation sequence

สมมติฐานที่ใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนี้ น้ำเสียมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) และความเร็ว จะขึ้นอยู่กับ ความเร็วรอบและขนาดของใบพัด ตามสมการ (Tchobanoglous, et al. 2003)

ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient) G หมายถึง ความปั่นป่วนของน้ำ ซึ่งน้ำในถังกวนจะต้องมีระดับความปั่นป่วนสูง การคำนวณค่า G ตาม Equation 1:

$$G = \left(\frac{P}{\mu V}\right)^{0.5} \quad (1)$$

โดย G คือ ระดับความปั่นป่วน (s^{-1}), P คือ พลังงานสร้างความปั่นป่วน ($lb.s/ft^2$), μ คือ ความหนืดของน้ำ ($lb.s/ft^2$) และ V คือ ปริมาตรในถัง (ft^3)

เมื่อพิจารณาพลศาสตร์ของไหลตัวแปรไร้มิติที่อธิบายลักษณะการไหลของของไหล คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynoldnumeber, Re) เป็นตัวเลขที่บอกถึงลักษณะการไหลของของไหลที่เปลี่ยนจากลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ไปเป็นลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) สำหรับนิยาม Re ของการไหลภายในถังกลมผสม อธิบายได้ดังนี้ (Equation 2):

$$Re = Nd^2/v \quad (2)$$

โดย N คือ ความเร็วรอบการหมุนของใบพัด (rps) และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (m)

ข้อจำกัดในการศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนี้ จำเป็นต้องได้รายละเอียดและข้อมูลครบทุกตำแหน่ง ในขอบเขตทั้งหมดที่สนใจ เพื่อผลการจำลองที่ถูกต้องแม่นยำ (ปราโมทย์, 2559)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในบ่อแอนน็อกซิก ซึ่งบ่อนี้ ออกแบบให้กำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฆ่าหูละและแปรรูปสุกร ขนาด 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ปริมาณ 186 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือ 18.60 มิลลิกรัมต่อลิตร จากประสิทธิภาพที่ต้องการกำจัดไนโตรเจน ทำให้ออกแบบบ่อนี้ กว้าง เมตร ยาว 11 เมตร สูง 5.0 เมตร ระดับน้ำสูง 4.5 เมตร ตามขนาดจริง (true scale)



Fig. 2 Anoxic tank dimension

เครื่องกวนผสมแบบจุ่มใต้น้ำ (Submersible mixer) ใช้ในบ่อแอนน็อกซิก จำนวน 1 ตัว มอเตอร์มีกำลัง 1.5 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที (Papp and Karches, 2018) เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 0.30 เมตร ความยาว 0.46 เมตร ดังแสดงใน Fig.3

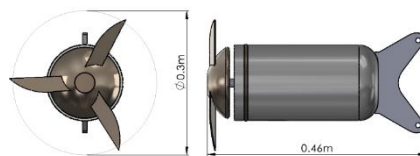


Fig. 3 Submersible mixer dimension

ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกวนผสมแบบจุ่มใต้น้ำ ในบ่อแอนน็อกซิก ความสูง 2.5 เมตร จากระดับพื้นบ่อ และห่างจากความกว้างของบ่อ 2.5 เมตร ติดตั้งใบพัดในแนว 90 องศา ใบพัดห่างจากผนังบ่อ 0.5 เมตร ดังแสดงใน Fig.4

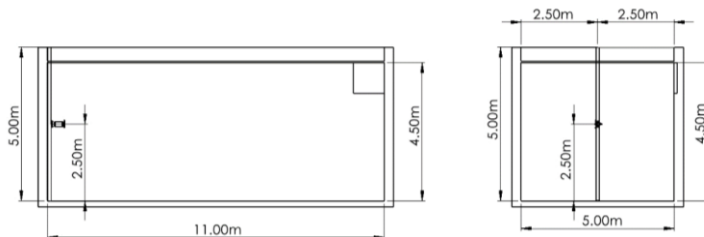


Fig. 4 Submersible mixer installation position

ความหนืดของน้ำที่ใช้ในการศึกษา คือ 1.0 มิลลิปาสกาลวินาที (Tian et al, 2012; Elshaw et al, 2018) ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดันที่ 1 ความดันบรรยากาศ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการสร้าง และศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการกวนผสมในบ่อแอ่นอกซิกของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานชำแหละและแปรรูปสุกร ขนาด 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งอยู่ในระยะก่อสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ เพื่อเดินระบบ โดยเงื่อนไขของเครื่องกวนผสมแบบจุ่มใต้น้ำ (Submersible mixer) ที่ใช้นั้น เป็นอุปกรณ์ที่จะทำการติดตั้งจริงในบ่อแอ่นอกซิก ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วในแนวแกน Y ของบ่อแอ่นอกซิก ที่ถูกกระทำจากการหมุนของใบพัดแบบซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที มีความเร็วที่ผิวหน้า คือ 0.003–0.597 เมตรต่อวินาที ความลึก 1.5 เมตร จากผิวหน้า ความเร็วเพิ่มขึ้นช่วงกลางบ่อ ความเร็วอยู่ในช่วง คือ 0.014–0.590 เมตรต่อวินาที โดยลดลงบริเวณขอบบ่อ สำหรับตำแหน่งติดตั้งเครื่องกวนผสมแบบจุ่มใต้น้ำ พบว่า มีความเร็ว อยู่ในช่วง 0.013–8.951 เมตรต่อวินาที โดยบริเวณใบพัดที่มีความปั่นป่วนสูง จะมีความเร็วสูงสุดในบ่อ 8.951 เมตรต่อวินาที และความเร็วจะลดลงตามระยะห่างจากจุดติดตั้ง สำหรับความลึก 3.0 เมตร ความเร็ว 0.009–1.232 เมตรต่อวินาที และความลึก 4.5 เมตร ความเร็วลดน้อยลง แต่ก็อยู่ในช่วง 0.003– 0.592 เมตรต่อวินาที ค่าความเร็วของการไหลในระนาบต่างๆ ตามแนวแกน Y แสดงดัง Fig. 5

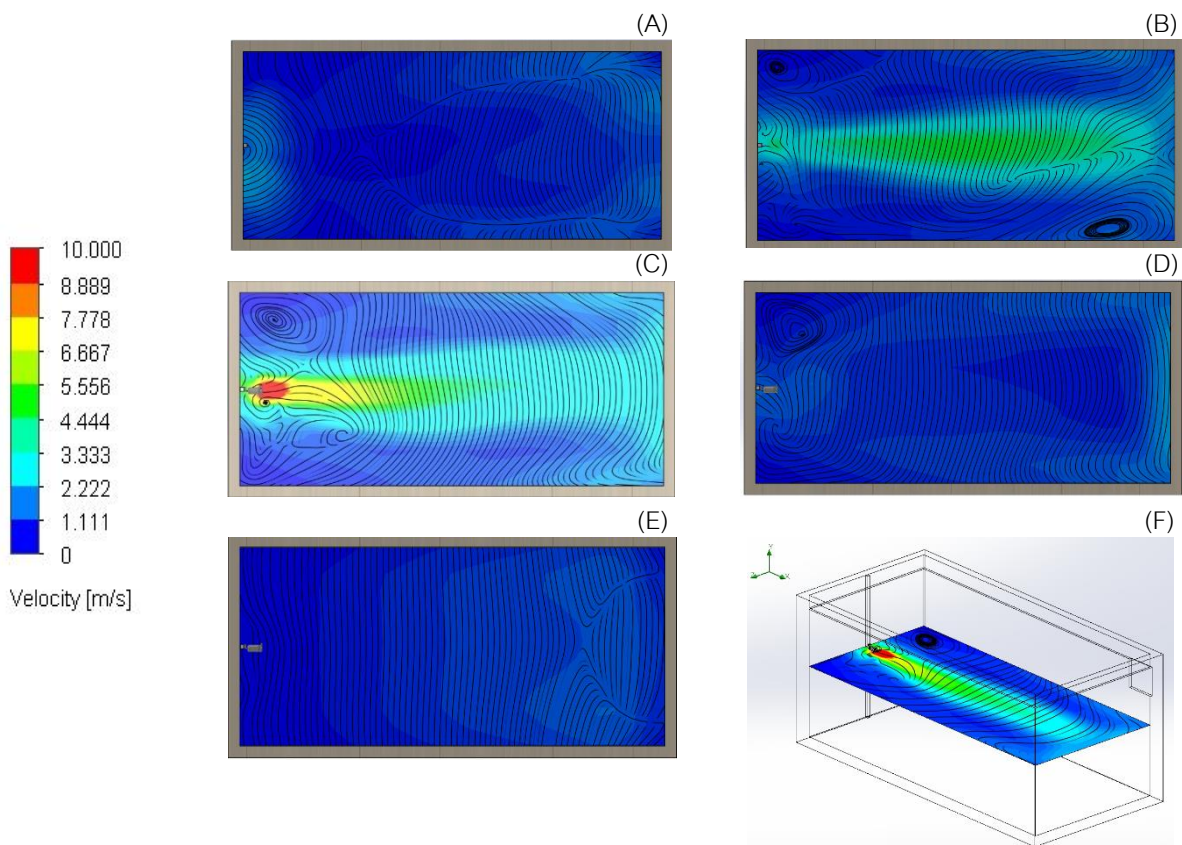


Fig. 5 Fluid velocity field Y axis cut plot in trimetric perspective (A) Water level (B) 1.5 m depth (C) 2.0 m depth (Submersible mixer position) (D) 3.0 m depth (E) 4.5 m depth and (F) Y axis cut plot

ความเร็วในแนวแกน X ของบ่อแอน็อกซิก พบว่าบริเวณขอบบ่อด้านหลังจุดติดตั้งเครื่องกวนผสมแบบจุ่มใต้น้ำ มีความเร็ว ในช่วง 0.001–1.609 เมตรต่อวินาที โดยความเร็วต่ำสุดจะอยู่บริเวณนี้ โดยความเร็วจะลดลงตามระยะห่างจากจุดติดตั้ง ในส่วนของตำแหน่งใบพัดมีความเร็วระหว่าง 0.008–4.456 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วลดลงตามรัศมีของใบพัด ระยะ 3.6 เมตร และ 7.2 เมตร จากตำแหน่งใบพัด มีความเร็ว 0.300–1.183 เมตรต่อวินาที ตามแนวรัศมีของใบพัด สำหรับระยะ 11 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ไกลที่สุดจากใบพัด พบว่ามีความเร็ว 0.05–0.609 เมตรต่อวินาที กระจายเป็นวงกว้าง เนื่องมาจากความเร็วของน้ำที่เกิดจากใบพัดในแนวระนาบขนขอบบ่อทำให้บริเวณนี้มีความเร็วบริเวณนี้เพิ่มมากขึ้น ค่าความเร็วของการไหลในระนาบต่างๆ ตามแนวแกน X แสดงดัง Fig. 6

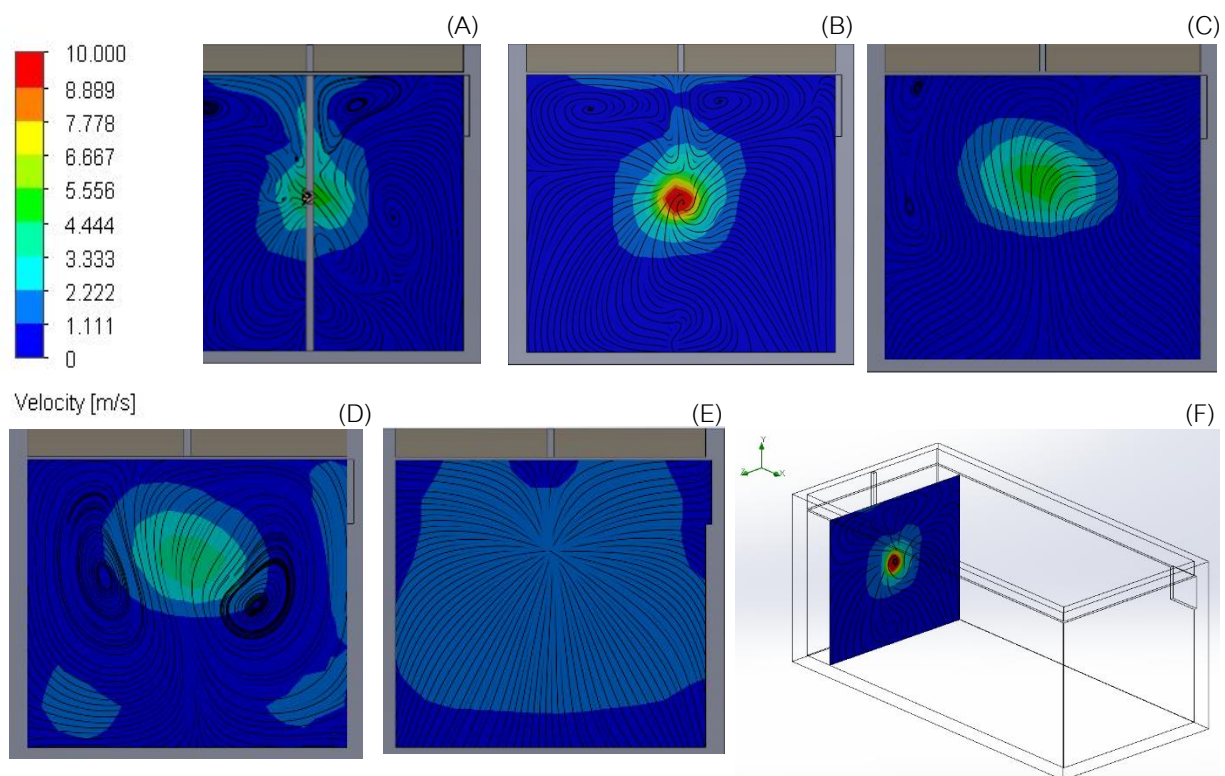


Fig. 6 Fluid velocity field X axis cut plot in trimetric perspective (A) Backside the propeller (B) The propeller (Submersible mixer position) (C) 3.6 m from the propeller (D) 7.2 m from the propeller (E) 11.0 m from the propeller and (F) X axis cut plot

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่า ค่าความเร็วสูงสุด คือ 8.951 เมตรต่อวินาที และความเร็วต่ำสุด คือ 0.001 เมตรต่อวินาที แสดงดัง Fig. 7

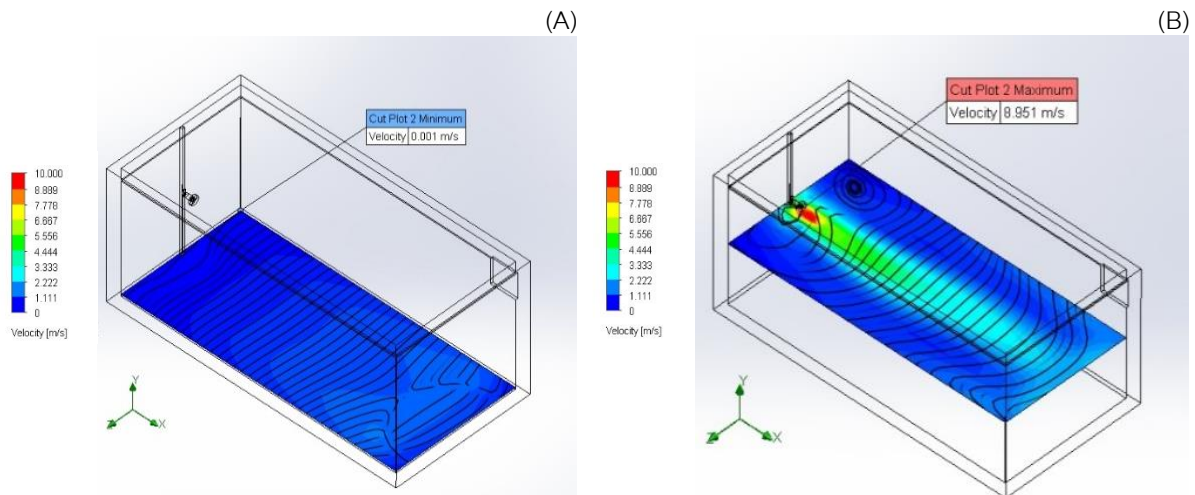


Fig. 7 (A) Minimum and (B) maximum velocity cut plot in trimetric perspective

จากการทดลองพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Papp and Karches (2018) ศึกษาประสิทธิภาพเครื่องกวนผสมเชิงกลในบ่อแวน็อกซิก พบว่าประสิทธิภาพการผสมขึ้นอยู่กับกำลังผสม ขนาดอุปกรณ์และความเร็วในการหมุน ทำให้รัศมีรอบใบพัดมีความเร็วสูง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Elshaw et al. (2018) ซึ่งวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อหาดำแหน่งและระยะเวลาการทำงานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกวนผสม พบค่าความเร็วที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดบริเวณแวน็อกซิก ควรน้อยกว่า 0.3 เมตรต่อวินาที

ผลการทดลองนี้ใช้ขนาดจริงของบ่อแวน็อกซิกในระบบบำบัด ใช้ความหนืดของน้ำในการกำหนดเงื่อนไขแบบจำลอง หากใช้ความหนืดของน้ำเสียจริง จะต้องเพิ่มความเร็วรอบ หรือกำลังของมอเตอร์ หรือขนาดของใบพัด เพื่อให้ได้ผลเช่นเดียวกับการทดลองนี้

การจำลองในการศึกษานี้ สามารถประยุกต์ใช้ในบ่อขนาดต่างๆ ที่ต้องใช้การกวนผสม เนื่องจากสามารถจำลองการไหลจริงที่มีความซับซ้อนได้ เช่น สามารถจำลองการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลที่มีความเร็ว และความดันสูง ทั้งนี้ต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการศึกษา รวมทั้งค่าคงที่อื่น เพื่อความแม่นยำ และครอบคลุมขอบเขตของการศึกษา

สรุป

ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการกวนผสมในบ่อแวน็อกซิกนั้นพบว่า ค่าความเร็วสูงสุด คือ 8.951 เมตรต่อวินาที และความเร็วต่ำสุด คือ 0.001 เมตรต่อวินาที โดยความเร็วที่มากกว่า 0.3 เมตรต่อวินาที จะอยู่รอบแนวรัศมีของใบพัด ทั้งแกน X และ Y ทำให้บริเวณนี้กระบวนการแวน็อกซิกเกิดได้ยากเนื่องจากความเร็วสูงทำให้เป็นการเติมออกซิเจนลงสู่น้ำเสีย นอกจากนี้บริเวณที่มีความเร็วต่ำสุด อาจเป็นบริเวณที่เกิดตะกอนสะสมได้

การศึกษานี้จะใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมและปรับปรุงการทำงานของเครื่องกวนผสม โดยจะมีการศึกษาแบบจำลองในขอบเขตที่ต่างกันไป เช่น การปรับลดความเร็วรอบ, การปรับขนาดของบ่อแวน็อกซิก, รวมทั้งตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกวนผสม เพื่อให้ได้ค่าความเร็วที่เหมาะสมในการเดินระบบแวน็อกซิกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนจากโครงการส่งเสริมจากการศึกษาระดับปริญญาโท แผนการเรียนแบบ ก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย และอำนวยความสะดวกในด้านโปรแกรม SolidWorks 2020 และขอบคุณ บริษัท อินโนเวชั่น ไอเดีย จำกัด ที่สนับสนุนข้อมูลด้านการออกแบบของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฆ่าแหละและแปรรูปสุกร ขนาด 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่งผลให้งานวิจัยนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2559. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และไฟไนต์วอลุ่ม, พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ, วิโรจน์ ลิ้มตระการ, เสฎฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล, ยศกร ประทุมวัลย์. 2552. การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย SolidWorks Simulation. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ.

สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2552. ระบบบำบัดน้ำเสีย: การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ไขปัญหา. ท็อป กรุงเทพฯ.

สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์. 2552. เทคโนโลยีน้ำเสีย, พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Eshaw, A., Hassan, N.M.S., Khan, M.M.K. 2018. Computational fluid dynamic modelling and optimization of wastewater treatment plant bioreactor mixer. *Energies* 11: 116–121. doi.org/10.3390/en11123530

James, B. 2014. Optimizing an anoxic mixer for denitrification. <https://dynamixinc.com/optimizing-an-anoxic-mixer-for-denitrification/>, 3 December 2021.

Papp, T., Karches, T. 2019. Analysis of a mechanical mixer performance in anoxic reactor. *Pollack Period.* 14: 161–166. doi:10.1088/1755-1315/15/5/052031

Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, D. 2003. *Wastewater engineering - treatment and reuse/Metcalf & Eddy Inc (3rd Ed.).* New York: McGraw-Hill.

Tian, F., Shi, W.D., Jiang, H., Lu, X.N., Chen, B. 2012. Study on velocity distribution in a pool by submersible mixers. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 15: 2031. doi:10.1088/1755-1315/15/5/052031

การเสื่อมสภาพของพลาสติก LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene) ภายใต้การจำลองสภาวะการทดสอบแบบแห้ง

Degradation of LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene) in Simulated Dry Environment

สุชีลา พลเรือง, อัญชิสมา สมประสงค์*, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์

Sucheela Polruang, Anchisa Somprasong*, Varinporn Asokbunyarat

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: anchisa.s@ku.th

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ถุงหูหิ้ว และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนหนึ่งได้กลายเป็นขยะพลาสติกตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถเสื่อมสภาพและแตกเป็นไมโครพลาสติก และอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของรังสี UV ต่อการเสื่อมสภาพของพลาสติกชนิด LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene) ในสภาวะแห้งเป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ SEM และ FTIR-ATR ตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่า แสงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้พลาสติกชนิด LLDPE เกิดการเสื่อมสภาพ โดยส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ความเงาของพื้นผิวพลาสติกลดลงเรื่อยๆ จนมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนสี (Discoloration) จากใสไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่น อีกทั้งพบรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้น นอกจากนี้มีการปรากฏหมู่ฟังก์ชันของ O-H stretching, C=O stretching และ C-O stretching ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยา photo-oxidation

คำสำคัญ: การเสื่อมสภาพ, ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน, พอลิเอทิลีน, ไมโครพลาสติก

Abstract

Plastic products are widely used, e.g., plastic bags and other plastic packaging. Plastic garbage remains in the environment can be degraded, break to small pieces, and become finally microplastics. This could be a potential risk to human and animal health. In this study, the degradation of LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene) plastic bag samples exposed to UV radiation in dry environment were observed for a period of 6 months. Changes in physical property and chemical structure were also examined using SEM and FTIR-ATR analysis, respectively. The experimental results showed that UV irradiation was responsible for the degradation, thus affected changes in physical and chemical properties of plastic samples. Sample surface turned from clear and glossy into murky and matt, discoloration can be observed. Small cracks can be seen on SEM images. Additionally, FTIR spectra showed a formation of new functional groups, which was a sign of photo-oxidation degradation, these were namely O-H stretching, C=O stretching, and C-O stretching.

Keywords: Degradation, Microplastics, Photo-oxidation, Polyethylene

คำนำ

ในปัจจุบันไมโครพลาสติก (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 mm) เป็นปัญหาใหญ่ที่ลุกลามไปทั่วโลก โดยไมโครพลาสติกถูกพบว่ามีการปะปนอยู่ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ (Andrady, 2011; Aslam et al., 2020; Bissen and Chawchai, 2020) เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ในธรรมชาติ อาทิ ความร้อน (Thermal degradation) แรงเชิงกล (Mechanical degradation) แสง (Photo-oxidation degradation) และ กระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradation) ส่งผลให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพจนมีขนาดเล็กปริมาณมาก (Fragmentation) (Singh and Sharma 2008) นอกจากนี้ไมโครพลาสติกยังถูกพบว่ามีสารสะสมอยู่ภายในร่างกายของมนุษย์ และสัตว์ (Talsness et al., 2009) โดยไมโครพลาสติกส่วนใหญ่ที่พบในธรรมชาติได้แก่ Polyethylene (PE) และ Polypropylene (PP) ตามลำดับ (Fotopoulou et al., 2012; Wang et al., 2020)

PE เป็นพลาสติกที่มีความหลากหลายทางโครงสร้าง สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ HDPE (High Density Polyethylene) LDPE (Low Density Polyethylene) และ LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene) โดยผลิตภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Single-use plastic) จำนวนมากผลิตจากพลาสติก PE เช่น บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและถุงหิ้วพลาสติก (Europe, 2019) สาเหตุหลักที่ PE ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับคุณสมบัติให้เหมาะสำหรับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ได้หลากหลาย ซึ่งคุณสมบัติทั่วไป PE ไม่สามารถดูดซับแสงได้ เนื่องจากภายในสายโซ่ (Polymer chain) ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว (Carbon-Carbon backbone) ซึ่งไม่มีโครงสร้างทางเคมีของพันธะคู่อิโอมิเตอร์ (Chromophore) แต่อย่างไรก็ตามระหว่างกระบวนการผลิตอาจมีสิ่งเจือปนภายนอก (External Impurity) จำนวนเล็กน้อยหรือความผิดปกติทางโครงสร้างส่งผลให้ PE สามารถดูดซับแสง UV ได้ (Gewert et al., 2015)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแสง UV ในสภาวะแบบแห้ง ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพลาสติกชนิด LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene) โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงหลังเกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติกตลอดระยะเวลา 6 เดือน

อุปกรณ์และวิธีการ

ตัวอย่างและการเตรียมสภาวะการทดสอบ

พลาสติกที่นำมาทดสอบนำมาจาก ถุงพลาสติกใสชนิด LLDPE ถูกนำมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 × 1 cm โดย แผ่นพลาสติกที่เตรียมเรียบร้อยแล้วถูกวางไว้ในจานแก้ว (Petri dish glass) จำนวน 40 ชิ้นต่อจาน โดยวางจานแก้วที่ถูกเตรียมสำเร็จแล้ว 1 จานต่อ 1 สภาวะ (สภาวะที่มีแสงและสภาวะที่ไม่มีแสง) ลักษณะเครื่องจำลองสภาวะแบบแห้งถูกสร้างขึ้นเองโดยใช้ต้นแบบจากงานวิจัยของ (Cai et al., 2018) ขนาด 60 × 30 × 10 cm (ย × ก × ส) ทำจากวัสดุชนิดสแตนเลส (Stainless) (Fig. 1) โดยในส่วนของสภาวะมีแสง (with UV condition) ทำการติดตั้งหลอดไฟชนิด UVA-340 จำนวน 2 หลอด เทอร์โมมิเตอร์ และพัดลมเพื่อระบายความร้อน ระยะเวลาในการทดลอง 6 เดือน ตลอดการทดลองภายใต้สภาวะมีแสง ทำการควบคุมให้มีความเข้มแสงอยู่ระหว่าง 94 - 134 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ทำการควบคุมอุณหภูมิภายในสภาวะมีแสงให้อยู่ในช่วงประมาณ 30 - 37 °C และอุณหภูมิภายในสภาวะไม่มีแสงให้อยู่ในช่วงประมาณ 30 - 35 °

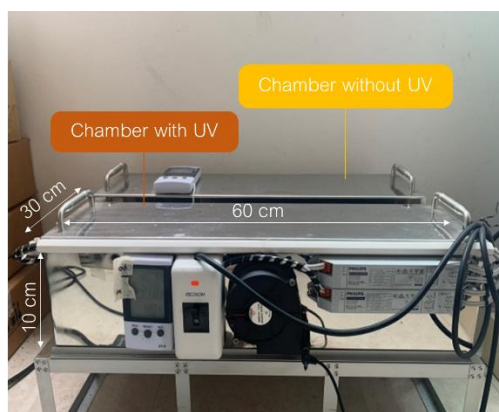


Fig. 1 Reactor

เทคนิคการวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์พลาสติก LLDPE ได้แก่ เทคนิค Scanning electron microscopy: SEM (รุ่น FEI จากบริษัท Quanta) โดยกำลังขยายที่ใช้ คือ 1000x และเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy โหมดการทดสอบ attenuated total reflectance: ATR รุ่น Alpha-E บริษัท Bruker

โดยขึ้นพลาสติก LLDPE ก่อนนำมาวิเคราะห์จะถูกเก็บตัวอย่าง 2 ชิ้นในแต่ละสภาวะ ทุกๆ 2 เดือน (เดือนที่ 0, 2, 4 และ 6) เพื่อนำมาทดสอบ 1 ชิ้นต่อ 1 เทคนิคการวิเคราะห์ ซึ่งขึ้นพลาสติกที่ถูกเก็บเพื่อรอนำไปวิเคราะห์จะบรรจุอยู่ในกระดาศพอลยล์เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับสภาวะภายนอก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะพื้นผิวของพลาสติกใส LLDPE เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าก่อนนำไปทดสอบ (pristine LLDPE) พบว่าลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบและมีความเงาสูง (Fig. 2A) หลังจากขึ้นพลาสติกผ่านการทดสอบภายใต้สภาวะมีแสง (With UV condition) ระยะเวลา 2 เดือน พบว่าพลาสติกไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเดือนที่ 0 และเมื่อระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นปรากฏว่าความเงาของพื้นผิวพลาสติกค่อยๆ ลดลงจนมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนสี (Discoloration) จากใสไม่มีสีเป็นสีขุ่นในเดือนที่ 4 และ 6 ตามลำดับ (Fig. 2B) ในทางตรงกันข้ามขึ้นพลาสติกภายใต้สภาวะไม่มีแสง (Without UV condition) เดือนที่ 2, 4 และ 6 (Fig. 2B) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า กล่าวคือขึ้นพลาสติกยังคงมีลักษณะใสไม่มีสี นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างยังคงมีลักษณะเช่นเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ (เดือน 0)

ทั้งนี้ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงไปหลังสัมผัสกับแสง ได้แก่ การเปลี่ยนไปของสี (Discoloration) และความเงา (Gloss) ของผิวพลาสติกลดลง ลักษณะเหล่านี้ล้วนเป็นสัญญาณที่แสดงถึงการเสื่อมสภาพ (Degradation) ของพลาสติก (Feldman, 2002; Sait et al., 2021) ซึ่งการเสื่อมสภาพของพลาสติกชนิด LLDPE จะเกิดขึ้นหลังสารเติมแต่ง (Additive) ที่ใส่เข้ามาระหว่างกระบวนการผลิตหมดลง (Gewert et al., 2015)

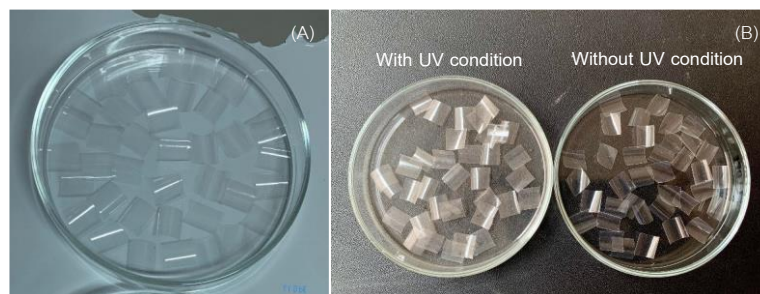


Fig. 2 Appearance of LLDPE plastic bag: a) pristine LLDPE b) weathered LLDPE after 6 months

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา

จาก Fig. 3 แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของพลาสติกชนิด LLDPE ก่อนนำมาผ่านการทดสอบ (Pristine LLDPE) พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเรียบ (Smooth) และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งค่อนข้างแตกต่างกับพื้นผิวของ LLDPE หลังผ่านการทดสอบภายใต้สภาวะมีแสง (Fig. 3) โดยพบว่าพื้นผิวของพลาสติกหลังสัมผัสแสงเป็นระยะเวลา 2 เดือน มีลักษณะขรุขระ (Rough) เพียงเล็กน้อยและเมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 4 และ 6 ปรากฏรอยแตกขนาดเล็ก (Early degradation site) ขึ้น โดยผลที่ได้ต่างกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Cai et al., 2018) ที่ทำศึกษาเม็ดพลาสติก LDPE (Low density polyethylene) ภายใต้สภาวะแบบแห้ง โดยพบว่าเมื่อ LDPE สัมผัสแสงครบ 1 เดือนจะเกิดการแตกออกเป็นเกล็ด (Flakes) ขึ้นและเมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 3 เดือน ตามลำดับ ปรากฏพื้นผิวที่แสดงถึงการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงหลังเกิดปฏิกิริยา Oxidation (Granular Oxidation) เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง LLDPE และ LDPE พบว่า LLDPE มีลักษณะที่ทนต่อการเสื่อมสภาพจากแสงมากกว่า เนื่องจากพลาสติกทั้ง 2 ชนิดมีความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้อัตราเร็วในการเสื่อมสภาพไม่เท่ากันแม้ว่าจะมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน โดยพลาสติกที่มีความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนต่ำ พื้นผิวของพลาสติกในการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพมีน้อยนำไปสู่การเสื่อมสภาพที่ค่อนข้างช้ากว่าพลาสติกที่ยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปในพื้นผิวได้โดยง่าย (Feldman, 2002) รอยแตกขนาดเล็กที่ปรากฏขึ้น (Fig. 3) แสดงถึงตำแหน่งของพื้นผิวที่อ่อนแอเนื่องจากการเติมสารเติมแต่ง (Additive) เข้าไปส่งผลให้พื้นผิวบริเวณนั้นค่อนข้างไวต่อการเสื่อมสภาพ (Degradation) (Cooper and Corcoran, 2010) นอกจากนี้ความขรุขระและรอยแตกที่ปรากฏบนพื้นผิวของพลาสติกหลังสัมผัสแสงถือเป็นลักษณะเด่นที่แสดงถึงการเสื่อมสภาพของพลาสติกที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิโตออกซิเดชัน (Photo-oxidation degradation) (Feldman, 2002)

ในทางกลับกันพื้นผิวของ LLDPE หลังผ่านการทดสอบภายใต้สภาวะไม่มีแสง (Without UV Condition) พบว่า ลักษณะพื้นผิวยังคงเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันไม่แตกต่างจาก LLDPE ก่อนนำมาทดสอบ (0 month) เนื่องจากในสภาวะไม่มีแสงปฏิกิริยาสำคัญที่เร่งให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพในสภาวะแห้งมีเพียงปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) (Wang et al., 2016) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่อัตราการดำเนินไปของปฏิกิริยา (Rate of Reaction) ค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิระดับปานกลาง (Rabek, 1975)

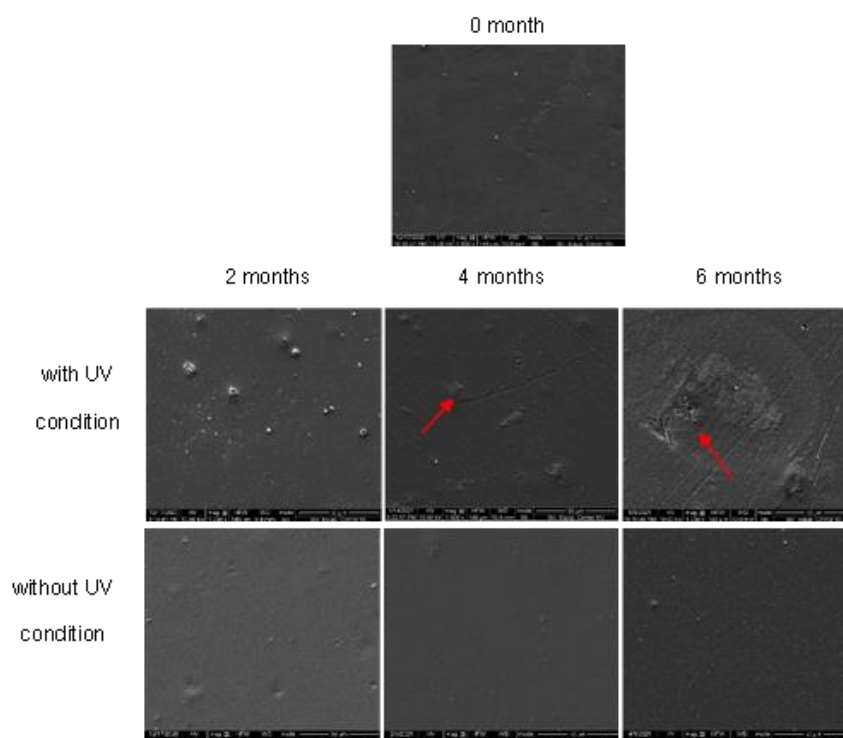


Fig. 3 SEM images of pristine and weathered LLDPE plastic bag in dry environment.

การวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติก

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกประเภท LLDPE พบว่าก่อนทดสอบ (Fig. 4A) ปรากฏหมู่ฟังก์ชันพื้นฐาน (Native peaks) ที่ตำแหน่ง 2914 , 1464 และ 721 cm^{-1} ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (Cai et al., 2018) นอกจากนี้ยังปรากฏหมู่ฟังก์ชันเพิ่มเติมที่ตำแหน่ง 3360 และ 1640 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงสารเติมแต่ง (Additive) ที่ใส่เข้ามาเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานสำหรับงานกลางแจ้ง (Outdoor Lifetime) (Feldman, 2002) โดยสารเติมแต่งที่ใช้คาดว่าเป็นสารเติมแต่งประเภทสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และ สารเพิ่มความคงตัวต่อแสง (UV stabilizer) (Song et al., 2017) จาก Fig. 4A แสดงลักษณะโครงสร้างเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของ LLDPE หลังสัมผัสแสงพบว่าเมื่อระยะเวลาการสัมผัสแสงครบ 2, 4 และ 6 เดือน ปรากฏหมู่ฟังก์ชันใหม่ขึ้นที่ตำแหน่ง 1711 cm^{-1} (C=O stretching) และ 1105 cm^{-1} (C-O stretching) อีกทั้งในเดือนที่ 6 จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันใหม่เพิ่มที่ตำแหน่ง 3399 cm^{-1} (O-H stretching) โดยหมู่ฟังก์ชันใหม่เหล่านี้ล้วนเป็นลักษณะเฉพาะที่แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (Photo-oxidation) (Zbyszewski and Corcoran, 2011) นอกจากนี้จาก Fig. 4A ยังพบว่าความเข้มพีกของหมู่ฟังก์ชันพื้นฐาน (Native peaks) จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาการสัมผัสแสงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบทางเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงไปหลังพลาสติกเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradе) (Da Costa et al., 2018)

ในทางกลับกันสำหรับสภาวะไม่มีแสง (Without Condition) ปฏิกิริยาที่ยังคงเกิดขึ้นมีเพียงปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) (Wang et al., 2016) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่อัตราการดำเนินไปของปฏิกิริยา (Rate of Reaction) ค่อนข้างต่ำในอุณหภูมิระดับปานกลาง (Rabek, 1975) ส่งผลให้ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันใหม่ในเดือนที่ 2, 4 และ 6 (Fig. 5B) สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Tang et al., 2019)

นอกจากนี้พลาสติกชนิด LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักประกอบด้วยคาร์บอนต่อกันเป็นสายโซ่ยาว (Carbon-Carbon backbone) ซึ่งส่งผลให้พลาสติกมีความไวต่อการเสื่อมสภาพด้วยแสง (UV irradiation) โดย

ปฏิกิริยา Photo-oxidation degradation เกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) เมื่อแสงสัมผัสกับพลาสติก พลังงานแสงทำให้เกิดการแตกของพันธะ C-H และ C-C ในสายโซ่ ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) (2) ภายในโครงสร้างซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxygen) ในบรรยากาศเนื่องจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น นำไปสู่การเกิด Autooxidation ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ (Chain scission) หรือการเชื่อมขวางขึ้น (Crosslinking) และสุดท้ายขั้น (3) หลัง Autooxidation สิ้นสุดลงผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายที่เกิดขึ้นเป็นหมู่ฟังก์ชันใหม่ ได้แก่ Olefins , Aldehydes และ Ketones ภายในสายโซ่ส่งผลให้พลาสติกอ่อนไหวต่อการเกิดปฏิกิริยา Photo – oxidation มากขึ้น (Gewert et al., 2015) ยิ่งไปกว่านั้นหลังการดำเนินไปของปฏิกิริยาเสร็จสิ้นส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกลดลงนำไปสู่การเกิดผิวของพลาสติกที่เปราะและเกิดการแตกหักเป็นชิ้นขนาดเล็ก (Fragmentation) (Song et al., 2017)

จากการศึกษาของ Jabarin and Lofgeren (1994) และ Cai et al. (2018) ที่ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติก PE ประเภท LDPE (Low Density Polyethylene) และ HDPE (High Density Polyethylene) โดยได้ทำการทดสอบเม็ดพลาสติก LDPE และแผ่นพลาสติก HDPE ภายใต้สภาวะแห้งและมีปัจจัยของแสง UV เป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพ พบว่า LDPE และ HDPE จะเริ่มปรากฏหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (Carbonyl group) เมื่อระยะเวลา 1 และ 4 เดือนหลังสัมผัสแสง UV ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการเสื่อมสภาพของ LLDPE ในงานวิจัยนี้จะพบว่าอัตราการเสื่อมสภาพของพลาสติกทั้ง 3 ชนิด คือ LDPE > LLDPE > HDPE โดยสาเหตุสำคัญคาดว่าเกิดจากปริมาณผลึก (Degree of crystallinity) ของพลาสติก (Polymer Science Learning Center, 2003) ซึ่งเป็นสิ่งที่ช่วยในการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ กล่าวคือ พลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน (PE) เป็นพลาสติกชนิดกึ่งผลึก (Semi-crystalline polymers) ซึ่งบริเวณผลึก (Crystalline region) เป็นส่วนสำคัญที่จะป้องกันการซึมผ่านของแสงและออกซิเจนซึ่งส่งผลต่อพื้นผิวในเนื้อพลาสติกสัมผัสแสงได้ลดลงนำไปสู่การเกิดการเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยา Photo-oxidation ได้ช้าลง (Feldman, 2002; BELL, 2015)

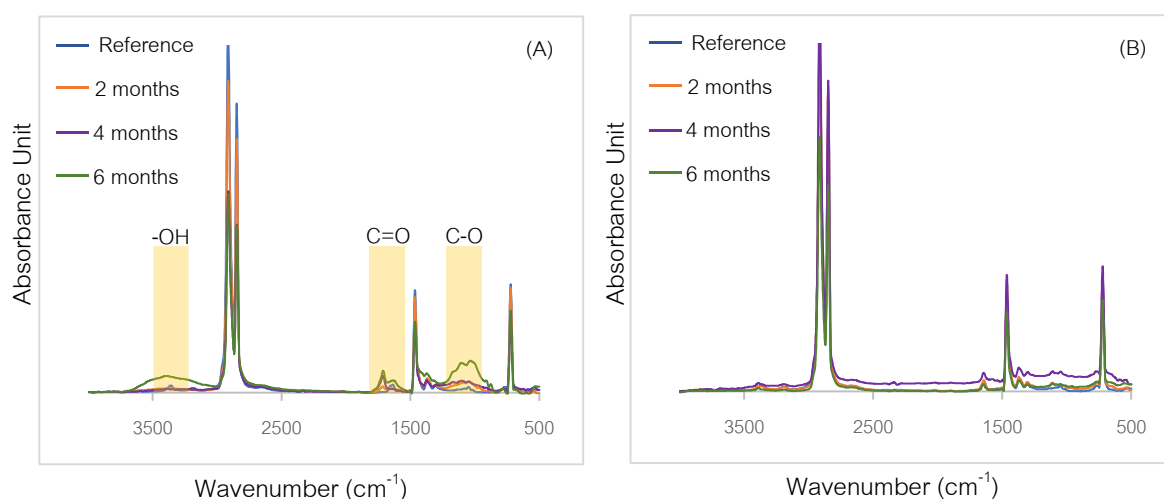


Fig. 4 FTIR spectra of LLDPE plastic bag in dry condition: (A) with UV condition and (B) without UV condition.

สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพลาสติกใสชนิด LLDPE ภายใต้สภาวะแบบแห้งพบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ LLDPE เกิดการเสื่อมสภาพ ได้แก่ แสง (UV irradiation) โดยหลังเกิดปฏิกิริยา Photo – oxidation พลาสติกเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพลง กล่าวคือ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าพื้นผิวของ LLDPE เกิดการเปลี่ยนสีจากใสเป็นขาวขุ่นและความเงาของพื้นผิวลดลง นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวเริ่มเกิดความขรุขระและรอยแตกขึ้น ขณะเดียวกันเมื่อทดสอบด้วย

เทคนิค FTIR ปรากฏหมู่ฟังก์ชันของ Olefins, Aldehydes และ Ketones ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เพิ่มความอ่อนไหวต่อการแตกออกของพลาสติกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ภายใต้สภาวะแบบแห้ง (Dry Condition)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสโครงการวิจัย 62/06/ENV

เอกสารอ้างอิง

- Andrady, A.L. 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62: 1596–1605. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
- Aslam, H., Ali, T., Mortula, M.M., Attaelmanan, A.G. 2020. Evaluation of microplastics in beach sediments along the coast of Dubai, UAE. *Mar. Pollut. Bull.* 150: 110739. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110739
- BELL, D.T. 2015. PET film artificial weathering: The action of deagradation agent on bulk and surface peoperties. D.Eng., thesis, School of Chemical Engineering College of Engineering and Physical Sciences, University of Birmingham, Birmingham,
- Bissen, R., Chawchai, S. 2020. Microplastics on beaches along the eastern Gulf of Thailand - A preliminary study. *Mar. Pollut. Bull.* 157: 111345. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111345
- 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
- Cooper, D.A., Corcoran, P.L. 2010. Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii. *Mar. Pollut. Bull.* 60: 650–654. doi:10.1016/j.marpolbul.2009.12.026
- Da Costa, J.P., Nunes, A.R., Santos, P.S.M., Giraio, A.V., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T. 2018. Degradation of polyethylene microplastics in seawater: Insights into the environmental degradation of polymers. *J. Environ. Sci. Health A Tox Hazard. Subst. Environ. Eng.* 53: 866–875. doi:10.1080/10934529.2018.1455381
- Europe, P. 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data, *Plastics – the Facts*. https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/final_web_version_plastics_the_facts2019_14102019, 11 พฤศจิกายน 2564.
- Feldman, D. 2002. Polymer weathering: Photo-Oxidation. *J. Polym. Environ.* 10: 163–173.
- Fotopoulou, K.N., Karapanagioti, H.K. 2012. Surface properties of beached plastic pellets. *Mar. Environ. Res.* 81: 70–77. doi:10.1016/j.marenvres.2012.08.010
- Gewert, B., Plassmann, M.M., MacLeod, M. 2015. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environ. Sci. Process Impacts* 17: 1513–1521. doi:10.1039/c5em00207a

- Jabarin, S.A., Iofgren, E.A. 1994. Photooxidative Effects on Properties and Structure of High-Density Polyethylene. *J. Appl. Polym. Sci.* 53: 411–423.
- Polymer Science Learning Center. 2003. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์เบื้องต้น.
https://www.pslc.ws/macrog/kidsmac/basics.htm?fbclid=IwAR2Acx5SxYBleKvFj1-5lpw79OfYyTyiT_Z4MsbYp1RBdQP5KFC4pPXkhxQ, 11 พฤศจิกายน 2564.
- Rabek, J.F. 1975. Chapter 4 Oxidative Degradation of Polymers. In: Bamford, C.H., Tipper, C.F.H. (Eds.), *Comprehensive Chemical Kinetics*, Vol. 14, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 425–538.
- Sait, S.T.L., Sorensen, L., Kubowicz, S., Vike-Jonas, K., Gonzalez, S.V., Asimakopoulos, A.G., Booth, A.M. 2021. Microplastic fibres from synthetic textiles: Environmental degradation and additive chemical content. *Environ. Pollut.* 268: 115745. doi:10.1016/j.envpol.2020.115745
- Singh, B., Sharma, N. 2008. Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym. Degrad. Stab.* 93: 561–584. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008
- Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., Han, G.M., Jung, S.W., Shim, W.J. 2017. Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type. *Environ. Sci. Technol.* 51: 4368–4376. doi:10.1021/acs.est.6b06155
- Talsness, C.E., Andrade, A.J., Kuriyama, S.N., Taylor, J.A., vom Saal, F.S. 2009. Components of plastic: experimental studies in animals and relevance for human health. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 364: 2079–2096. doi:10.1098/rstb.2008.0281
- 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. *Mar. Pollut. Bull.* 149: 110626. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110626
- 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
- Wang, Y., Zou, X., Peng, C., et al. 2020. Occurrence and distribution of microplastics in surface sediments from the Gulf of Thailand. *Mar. Pollut. Bull.* 152: 110916. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.110916
- Zbyszewski, M., Corcoran, P.L. 2011. Distribution and degradation of fresh water plastic particles along the beaches of lake huron, Canada. *Water Air Soil Pollut.* 220: 365–372. doi:10.1007/s11270-011-0760-6

การศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปขยะเศษอาหารเป็นก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ ศูนย์บริการและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรประจำตำบลบางม่วง จังหวัดนนทบุรี

The study of biogas production efficiency from food waste using organic waste processing machine, Bang Muang service center, Nonthaburi

สุขุมล เมฆิน*, ชชาติ เจียมไชยศรี

Sukhumarn Mekhin* Chart Chiemchaisri

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: sukhumarn.m@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการแปรรูปขยะเศษอาหารเป็นก๊าซชีวภาพของเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ที่ศูนย์บริการและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรประจำตำบลบางม่วง จังหวัดนนทบุรี ซึ่งเครื่องแปรรูปฯ ดังกล่าว ทำหน้าที่แปรรูปขยะเศษอาหารที่เก็บรวบรวมมาจากชุมชน ย่อยด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ โดยการศึกษาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพระหว่างกระบวนการแปรรูปมูลฝอยอินทรีย์ด้วยเครื่องแปรรูปฯ กับประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์และเศษอาหารที่เก็บรวบรวมจากชุมชน และทำการวัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า ศักยภาพการเกิดก๊าซสูงสุดของเศษอาหารมีค่าเท่ากับ 104.2 L/kg VS ในขณะที่ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบเครื่องแปรรูปฯ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.03 L/kg VS ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพของการเกิดก๊าซเท่ากับร้อยละ 26.9 ของศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพของขยะเศษอาหารสูงสุด

คำสำคัญ: การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน, ก๊าซชีวภาพ, ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน, เศษอาหาร

Abstract

This research evaluated biogas production from food waste using organic waste processing machine, Bang Muang service center, Nonthaburi. The processing machine received collected food waste from communities and converted it under anaerobic condition to biogas. This study compares the efficiency biogas production observed during the operation of processing machine and biochemical methane potential (BMP) of food waste determined in laboratory experiment. The BMP experiment was performed using seeded sludge and food waste collected from communities and biogas volume was measured. The experimental results reveal that biogas production potential of food waste was 104.2 L/kg VS while the biogas production from processing machine operation was 28.03L/kg VS on average. Therefore, the efficiency of biogas production of the processing machine is determined as 26.9 % of its maximum potential.

Keywords: Anaerobic digestion, Biochemical Methane Potential, Biogas, Food waste

คำนำ

จากการสำรวจสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชน ของเสียอันตราย และสารอันตราย พบว่า ในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทย มีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 27.93 ล้านตัน โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น ในปี พ.ศ. 2561 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การบริโภคที่เพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของชุมชนเมือง และการปรับเปลี่ยนวิถีชีวิตจากสังคมเกษตรสู่สังคมเมืองในหลายพื้นที่ และการส่งเสริมการท่องเที่ยวของประเทศไทย ที่ผ่านมา การจัดการขยะมูลฝอยในปี พ.ศ. 2561 มีแนวโน้มดีขึ้น ขยะมูลฝอยชุมชนได้ถูกคัดแยก ณ ต้นทาง และนำกลับไปใช้ประโยชน์ 9.76 ล้านตัน (ร้อยละ 35) กำจัดอย่างถูกต้อง จำนวน 10.85 ล้านตัน (ร้อยละ 39) และเป็นขยะมูลฝอยที่กำจัดอย่างไม่ถูกต้อง 7.32 ล้านตัน (ร้อยละ 26) เช่น การกำจัดแบบเทกองหรือเผากลางแจ้งในสถานที่กำจัดขยะมูลฝอย การกองทิ้งเอาไว้หรือลักลอบทิ้งในพื้นที่สาธารณะประโยชน์ หรือลักลอบทิ้งลงสู่แหล่งน้ำต่าง ๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) เมื่อสำรวจขยะมูลฝอยที่กำจัดอย่างไม่ถูกต้อง พบว่าประเภทของขยะมูลฝอยชุมชนที่พบมากที่สุด ได้แก่ ขยะย่อยสลายได้หรือขยะอินทรีย์ (Compostable waste) โดยพบมากถึงร้อยละ 64 ของปริมาณขยะทั้งหมดในกองขยะ เช่น เศษผัก เปลือกผลไม้ เศษอาหาร ใบไม้ และเศษเนื้อสัตว์ เป็นต้น ขยะประเภทนี้สามารถเน่าเสียและย่อยสลายได้เร็ว เป็นสาเหตุของแหล่งเพาะพันธุ์ของพาหะนำโรคต่างๆ เช่น หนู แมลงวัน ฯลฯ ทำให้เกิดน้ำเสียจากกองขยะ ซึ่งอาจปนเปื้อนลงแหล่งน้ำใกล้เคียงหรือน้ำใต้ดินได้ (สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย, 2555) อีกทั้งเมื่อถูกนำมารวบรวมไว้ในปริมาณมาก จะทำให้เกิดปัญหาข้อร้องเรียนต่างๆ สร้างความเดือดร้อนรำคาญแก่ประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่โดยรอบสถานที่ทิ้งขยะ เช่น กลิ่นเหม็นจากกองขยะ น้ำชะขยะรั่วไหลออกนอกพื้นที่ เป็นต้น

ปัจจุบัน การลดและคัดแยกขยะมูลฝอยประเภทขยะย่อยสลาย (Compostable waste) จากครัวเรือน ได้แก่ เศษอาหาร มีการบริหารจัดการที่ยังขาดประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อย จึงกลายเป็นที่มาของแหล่งมลพิษ (Shrestha, 2017) เพื่อเป็นการจัดการขยะมูลฝอยอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องเก็บขนไปกำจัด และลดปริมาณขยะมูลฝอยที่ตกค้างสะสมให้ได้ปริมาณมาก จึงต้องมีการคัดแยกขยะมูลฝอยและกำจัดตั้งแต่ต้นทาง โดยเน้นการกำจัดขยะมูลฝอยประเภทขยะย่อยสลาย ได้แก่ เศษอาหารจากครัวเรือน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของขยะมูลฝอยชุมชนที่มีปริมาณร้อยละ 64 ของปริมาณขยะทั้งหมดในกองขยะ (สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย, 2555)

จังหวัดนนทบุรี จึงได้มีการพัฒนาและต่อยอดรูปแบบเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ ที่สามารถรองรับขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหาร ขนาด 1,000 กิโลกรัม/วัน เพื่อแปรรูปขยะอินทรีย์กลายเป็นก๊าซชีวภาพ (พิมผกา, 2563) และกากตะกอนที่ได้จากระบบ สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินได้ ณ บริเวณศูนย์บริการและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรประจำตำบลบางม่วง อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี ซึ่งระบบการแปรรูปฯ ดังกล่าว สอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการขยะมูลฝอยในอนาคตของประเทศไทย ที่เน้นนโยบายส่งเสริมและปรับปรุงมาตรการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะในกลุ่มขยะของเสียเพื่อผลิตพลังงาน (ศูนย์ข้อมูลและข่าวสืบสวนเพื่อสิทธิพลเมือง, 2559)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแปรรูปขยะเศษอาหารเป็นก๊าซชีวภาพของเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ที่ศูนย์บริการและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรประจำตำบลบางม่วง จังหวัดนนทบุรี โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพระหว่างกระบวนการแปรรูปมูลฝอยอินทรีย์ด้วยเครื่องแปรรูปฯ กับประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์

เครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ ตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณศูนย์บริการและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตร ประจำตำบลบางม่วง อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี เป็นระบบการหมักแบบปิดโดยไม่ใช้ออกซิเจน มีถังแปรรูปขยะอินทรีย์ จำนวน 2 ถัง สามารถรองรับวัตถุดิบแต่ละถังได้ไม่น้อยกว่า 520 กิโลกรัมต่อวัน ที่ความชื้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 65 มีขนาดความจุของถังแปรรูปขยะอินทรีย์ 43.27 ลูกบาศก์เมตร ต่อ 1 ถัง ความจุรวม 2 ถัง ได้ 86.54 ลูกบาศก์เมตร มีระบบควบคุมโดยสามารถควบคุมการทำงานได้ 2 ระบบ คือ ระบบการสั่งด้วยคน (manual) และระบบตั้งเวลา (Timer) มีท่อระบายตะกอนควบคุมการเปิด/ปิดด้วยมือ จำนวน 1 ชุด และท่อหมุนเวียนตะกอน จำนวน 1 ชุด การเดินระบบเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง หลังจากสูบน้ำขยะอินทรีย์ไปยังถังหมักหมดแล้ว จะทำการหมุนเวียนตะกอนในถังเป็นเวลา 5 นาที โดยหมุนเวียนตะกอน 3 ครั้งต่อวัน ภายในถังหมักมีระบบท่อหมุนเวียนตะกอน ระบบท่อจ่ายน้ำเสีย ท่อก๊าซชีวภาพ และท่อระบายตะกอนออกจากระบบ



Fig. 1 Organic waste Processing Machine

อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเศษอาหาร (Food waste) และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

1. เครื่องปั่นมูลฝอย
2. ภาชนะตวงมูลฝอย
3. ปากคืบ
4. Porcelain Crucible
5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด
6. ตู้อบ (Hot Air Oven)
7. เตาเผา (Muffle Furnace)
8. Desiccator พร้อมสารดูดความชื้น
9. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
10. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC)

อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential)

1. ขวดแก้ว (Duran) ขนาด 2,000 มิลลิลิตร
2. ก๊าซไนโตรเจน
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. สายยางสำหรับไล่อากาศ
5. หัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum)
6. เข็มและกระบอกฉีดยาแบบแก้ว (Syringe Glass) ขนาด 50 มิลลิลิตร
7. เข็มสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (Gas Type Syringe) ขนาด 0.5 มิลลิลิตร
8. หลอดเลือดสุญญากาศสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ

การศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของขยะเศษอาหาร

ขยะเศษอาหารที่ใช้ในการศึกษามาจากแหล่งผลิตขยะเศษอาหารในเขตพื้นที่รับผิดชอบของเทศบาลบ้านบางม่วง ที่จัดเก็บได้ เป็นเศษอาหารที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหารและการบริโภคจากชุมชนในพื้นที่ เช่น โรงแรม ร้านอาหาร โรงเรียน วัด ตลาดสด และหมู่บ้านจัดสรร โดยทำการสุ่มตัวอย่างเศษอาหารที่เก็บรวบรวมได้ส่วนหนึ่งมาทำการศึกษา BMP

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของขยะเศษอาหาร ก่อนเข้าเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ โดยทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณของแข็งรวม (Total Solids, TS) ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (Volatile Solids, VS) เถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon)

Table 1 Parameters and methods of chemical characterization of food waste

Sample	Parameters	Methods	Frequency
Food waste	Moisture content	Oven Drying Method at 105 °C	Analysis of food waste before entering Processing Machines
	Total solids	Calculated from Moisture content	
	Volatile solids	Muffle furnace at 550 °C	
	Ash	Calculated from Volatile solids	
	Total carbon	Total Organic Carbon Analyzer	

การศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum)

วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) ที่ได้จากกากตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก ก่อนนำไปใช้ในการหาค่าศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ของขยะเศษอาหาร โดยทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณของแข็งรวม (Total Solids, TS) ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (Volatile Solids, VS) เถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon) ทั้งนี้ หัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) เป็นจุลินทรีย์คนละชนิดกับจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบแปรรูปฯ ซึ่งเป็นจุลินทรีย์แห่งสำเร็จรูปที่ทางบริษัทผู้ผลิตใช้ตั้งแต่ขั้นตอนการเดินระบบครั้งแรก

Table 2 Parameters and methods of chemical characterization of Inoculum

Sample	Parameters	Methods
Inoculum	pH	pH meter
	Moisture content	Oven Drying Method at 105 °C
	Total solids	Calculated from Moisture content
	Volatile solids	Muffle furnace at 550 °C
	Ash	Calculated from Volatile solids
Total carbon	Total Organic Carbon Analyzer	

การหาค่าศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนของขยะเศษอาหาร (Biochemical Methane Potential, BMP)

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ BMP คือ การหาค่าศักยภาพการเกิดก๊าซของขยะอินทรีย์สูงสุด (ในสภาวะการย่อยสลายไร้อากาศแบบสมบูรณ์) มิได้เป็นการจำลองกระบวนการหมักตามระบบเครื่องแปรรูปฯ โดยเราจะนำปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบเครื่องแปรรูปฯ ไปเปรียบเทียบกับศักยภาพการเกิดก๊าซ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบเครื่องแปรรูปฯ ให้ทราบถึงสัดส่วนโดยนำมาเปรียบเทียบกับศักยภาพสูงสุด วิธีการหาค่าศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพในการศึกษานี้ จะทำการทดลองหาค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากขยะเศษอาหาร โดยการนำเศษอาหารที่มีสารอินทรีย์ระเหยได้ (volatile solids) 10 กรัม ใส่ลงในภาชนะกักจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก 400 มิลลิลิตร และนำไปวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 50 วัน (Hansen et al., 2004) โดยมีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ตามขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมชุดการทดลอง

1) เตรียมขวดแก้ว (ขวด Duran) สำหรับหมัก ขนาด 2,000 มิลลิลิตร พร้อมฝาปิด โดยฝาขวดจะเจาะรูทั้งหมด 3 รู ได้แก่ รูสำหรับใส่อากาศ และรูสำหรับติดตั้ง septum ตัวต่อลม และตัวต่อทองเหลือง ซึ่งภายในบรรจุจุกยางซิลิโคน สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซ (เสาวลักษณ์, 2552)



Fig. 2 Equipment for Biochemical Methane Potential Test (BMP)

2) เตรียมภาชนะกักจุลินทรีย์ จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก ได้แก่ ระบบหมักแบบ Expanded Granular Sludge Blanket (EGSB) ของบริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) หรือโรงงานผลิตขนมปังฟาร์มเฮ้าส์ (Farm House) ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร บรรจุในแกลลอน ขนาด 20 ลิตร สีดำ จำนวน 2 ใบ ล้างทำความสะอาด ก่อนนำไปใช้สำหรับเก็บหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) จำนวน 10 ลิตรต่อถัง ปิดฝาให้สนิทเพื่อให้มีสภาพเป็นแอนแอโรบิก และเขย่าแกลลอนก่อนทุกครั้งที่น่ากักตะกอนไปใช้ทดลอง

3) การเตรียมตัวอย่างเศษอาหาร โดยการสุ่มตัวอย่างเศษอาหารจากถังพลาสติคที่รองรับเฉพาะเศษอาหารที่เก็บรวบรวมได้จากแต่ละแหล่งผลิตขยะในชุมชน และนำมาผสมกัน จากนั้นนำมูลฝอยที่ผสมเข้ากันแล้วมาปั่นให้ละเอียด

2. วิธีการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ชุด ดังนี้

1) ชุดทดลอง นำตัวอย่างเศษอาหารที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดทดลองที่มีภาชนะกักจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก 400 มิลลิลิตร โดยมีปริมาณเศษอาหารที่มีสารอินทรีย์ระเหยได้ (volatile solids) 20 กรัม ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองเบื้องต้น จากนั้นปิดฝาขวดให้สนิท เขย่าตัวอย่างให้เข้ากัน และใส่อากาศภายในขวดทดลอง โดยการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงไปเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ภายในขวดทดลองมีสภาพเป็นแอนแอโรบิก วางชุดการทดลองไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 50 วัน (ในการทดลอง BMP สัดส่วนของจุลินทรีย์ที่ใช้จะไม่เท่ากับการเดินระบบจริง โดยเลือกใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ในการทดลอง BMP มากกว่า เพราะต้องการให้เกิดการย่อยสลายของขยะเศษอาหารอย่างสมบูรณ์)

2) ชุดควบคุม ใส่เฉพาะภาชนะกักจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก 400 มิลลิลิตร ลงในขวดทดลอง โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของชุดควบคุมมาจากกระบวนการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์เท่านั้น ซึ่งจะนำไปหักออกจากรวมก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากชุดทดลอง จึงจะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายเศษอาหาร

3. การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพจากการทดลอง BMP

การวัดปริมาณก๊าซ ทำได้โดยการใช้เข็มและกระบอกฉีดยาแบบแก้ว ขนาด 50 มิลลิลิตร ดูดก๊าซที่เกิดขึ้นจากขวดทดลอง และเก็บก๊าซที่ได้ใส่หลอดเลือดสุญญากาศ จุดบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นแต่ละขวดทดลอง ในช่วงวันแรกของการทดลองจะทำการวัดก๊าซทุกวัน และเพิ่มระยะห่างในการวัดเป็น 2 วัน 5 วัน 7 วัน ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นภายในขวดทดลอง จนครบระยะเวลา 50 วัน

การศึกษาการเกิดก๊าซชีวภาพจากการแปรรูปขยะด้วยเครื่องแปรรูปฯ

ทำการจดบันทึกข้อมูล ได้แก่ ปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าเครื่องแปรรูปฯ และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยเก็บข้อมูลเป็นประจำทุกวันตามรอบการป้อนมูลฝอยอินทรีย์เข้าเครื่อง (ในสถานการณ์ปกติ จะมีการป้อนมูลฝอยเข้าเครื่องในวันจันทร์ วันพุธ และวันศุกร์ ของแต่ละสัปดาห์) เป็นระยะเวลา 2 เดือน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะสมบัติของเศษอาหารและหัวเชื้อจุลินทรีย์

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของขยะเศษอาหาร พบว่า ขยะเศษอาหารที่เก็บรวบรวมจากชุมชน มีความชื้นคิดเป็นร้อยละ 75.88 ของน้ำหนักมูลฝอยเปียก มีปริมาณของแข็งรวม ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ และปริมาณถ่านเท่ากับ ร้อยละ 24.12, 94.38 และ 5.62 ตามลำดับ มีร้อยละองค์ประกอบของคาร์บอน เท่ากับ 63.62 ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Characteristics of Food waste

Parameters				
Moisture content	Total Solids (TS)	Volatile Solids (TVS)	Ash	Total C
% by wet weight	% by wet weight	% by weight	% by weight	% dry weight
75.88	24.12	94.38	5.62	63.62

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) พบว่า หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.68 มีปริมาณความชื้นคิดเป็นร้อยละ 87.42 ของน้ำหนักเปียก มีปริมาณของแข็งรวม ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ และปริมาณถ่าน เท่ากับ ร้อยละ 12.58, 86.26 และ 13.74 ตามลำดับ และมีร้อยละองค์ประกอบของคาร์บอน เท่ากับ 49.89 ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Characteristics of Inoculum

Parameters					
pH	Moisture content	Total Solids (TS)	Volatile Solids (TVS)	Ash	Total C
	% by wet weight	% by wet weight	% by weight	% by weight	% dry weight
6.68	87.42	12.58	86.26	13.74	49.89

ศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพของขยะเศษอาหาร

ผลการศึกษาศักยภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพของขยะเศษอาหาร เมื่อกำหนดให้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอรโรบิกมีปริมาณ 400 มิลลิลิตร ผสมกับปริมาณเศษอาหารที่มีสารอินทรีย์ระเหยได้ (volatile solids) 20 กรัม ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพ (Biogas yield) ที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 104.2 ml/g VS หรือ 104.2 L/kg VS ดังแสดงใน Fig. 3

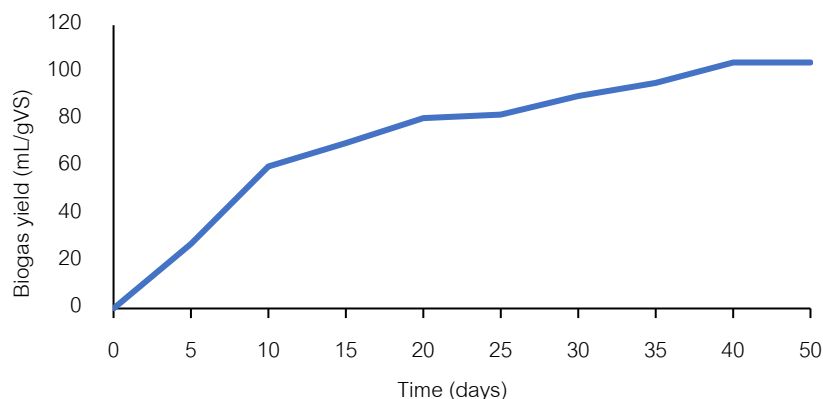


Fig. 3 Accumulated biogas yield of the digested food waste (mL/g VS)

การเกิดก๊าซชีวภาพจากการแปรรูปขยะด้วยเครื่องแปรรูปฯ

จากการบันทึกข้อมูลปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการกำจัดขยะเศษอาหาร ด้วยเครื่องแปรรูปฯ จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 6.38 L/kg food waste เมื่อนำมาคำนวณ จากปริมาณขยะเศษอาหาร 1 กิโลกรัม มีปริมาณปริมาณของแข็งรวม (TS) เท่ากับ 0.2412 kg (TS = 24.12%) และปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (VS) เท่ากับ $0.2412 \times 0.9438 = 0.2276$ kg (VS = 94.38%) ดังนั้น การกำจัดขยะเศษอาหารด้วยเครื่องแปรรูปฯ จึงมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (Biogas) $6.38/0.2276$ เท่ากับ 28.03 L/kg VS ที่ป้อนเข้าระบบ

Table 5 The biogas production from processing machine operation

Day	Amount of food waste fed into the machine (Kg)	The amount of biogas produced (m ³)	The amount of biogas produced (L/kg food waste)
1	480	3	6.25
2	400	2	5
3	450	3	6.67
4	200	2	10
5	410	2	4.88
6	300	2	6.67
7	450	3	6.67
8	400	3	7.5
9	500	3	6
10	480	2	4.17
Average	407	2.5	6.38

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ และศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลอง BMP ในห้องปฏิบัติการพบว่า การเกิดก๊าซชีวภาพจากเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์มีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 26.9 ของศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพของขยะเศษอาหาร แสดงให้เห็นว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าต่ำกว่า BMP ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการพัฒนาของจุลินทรีย์ในระบบยังไม่เต็มที่ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Richter et al. (2020) ซึ่งประเมินการเกิดก๊าซชีวภาพ

จากเศษอาหาร พบว่ามีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 634 L/kg VS ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการศึกษา (104.2 L/kg VS) ทั้งนี้ ความแตกต่างของการเกิดก๊าซชีวภาพยังมีปัจจัยอื่นเกี่ยวกับการเดินระบบหรือสภาพแวดล้อมของระบบจริงที่แตกต่างไปจากการย่อยสลายแบบสมบูรณ์ของ BMP เช่น การกวนผสมระหว่างจุลินทรีย์กับสารอาหาร (ขยะอินทรีย์) อาจเกิดไม่ทั่วถึงในถังหมัก หรืออาจมีโอกาสดูดซับออกซิเจนรั่วไหลเข้าสู่ระบบ ในขณะที่เติมขยะเศษอาหารเข้าสู่ถังหมักซึ่งก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic microorganisms) เป็นต้น

สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบเครื่องแปรรูปและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 28.03 L/kg VS ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับร้อยละ 26.9 ของศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลอง BMP ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 104.2 L/kg VS โดยปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากเครื่องแปรรูปมีค่าน้อยกว่าการทดลอง BMP ในห้องปฏิบัติการ อาจมีสาเหตุจากกระบวนการย่อยสลายขยะเศษอาหารในระบบไม่สมบูรณ์หรือสภาวะการทำงานของถังหมักที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรีย เช่น การควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งการศึกษานี้ ไม่ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เนื่องจากต้องการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องแปรรูป ในสภาพการใช้จริง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ เช่น การกวนผสมระหว่างจุลินทรีย์และสารอาหาร (ขยะอินทรีย์) ในถังหมัก และการรั่วไหลของออกซิเจนเข้าสู่ถังหมักระหว่างการเติมขยะเศษอาหาร เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานเทศบาลตำบลบ้านบางม่วง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย ทำให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2562. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2561. บริษัท สโตร์ครีเอทีฟเฮ้าส์ จำกัด. กรุงเทพฯ. พิมพ์กา. โพลีลังกา. 2563. ศักยภาพและอัตราการบำบัดเศษอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอน ร่วมกับการหมักเย็นน้ำหมัก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 21: 180–193.
- เสาวลักษณ์ นิลรัตน์พงษ์ศรี. 2552. การประเมินการปล่อยก๊าซมีเทนจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบเทกองกลางแจ้ง. การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Hansen, T.L., Schmidt, J.E., Angelidaki, I. et al. 2004. Method for determination of methane potentials of solid organic waste. Waste Manage. 24: 393–400
- Richter, M., Thiel, C., Kleinheinz, G. 2020. Standardized laboratory testing for biomethane potential. Chem. Eng. Process Tech. 5: 1058.
- Shrestha, S., Chaulagain, N.P., Shrestha, K.R. 2017. Biogas production for organic waste management: A case study of canteen's organic waste in Solid Waste Management Technical Support Center, Lalitpur, Nepal. Environ. Sci. Technol. 5: 41–47. doi.org/10.3126/njes.v5i0.22714

การพัฒนาโปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร ด้วยโปรแกรมแอปชีท

Development of the program to calculate dimensions of the food industrial packaging from
machine manufacturing by appsheet for export cost estimation

อัญชสา ประมวลเจริญกิจ, ณัฐพร ณ เชียงใหม่*

Anchasa Pramuanjaroenkij, Nuttaporn Na Chiangmai*

คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร 47000

Faculty of, Science and Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus 47000

*Corresponding author. E-mail address: nuttaporn.nac@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร
ด้วยโปรแกรมแอปชีท การพัฒนาโปรแกรมเริ่มต้นจากการสร้างฐานข้อมูลตู้คอนเทนเนอร์ในไมโครซอฟท์ เอ็กเซล ใส่ข้อมูล
ดังกล่าวลงในโปรแกรมแอปชีทแล้วสร้างหน้าโปรแกรมสำหรับผู้ใช้งาน โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้ทดสอบก่อนนำไปให้
บุคลากรที่มีประสบการณ์และไม่มีประสบการณ์ประมาณการต้นทุน ประเมินความพึงพอใจการใช้งานโปรแกรม หลังจาก
นั้นกลุ่มตัวอย่างทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับกรณีศึกษา โดยประเมินเวลาที่กลุ่มตัวอย่างใช้ประมาณการต้นทุนด้วย
วิธีการดั้งเดิมและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น พบว่าโปรแกรมช่วยลดเวลาในการประมาณการต้นทุนเฉลี่ย 63.70 นาที คิดเป็น
ร้อยละ 70 และสามารถช่วยลดต้นทุนจากการเลือกประเภทตู้คอนเทนเนอร์เฉลี่ย 962.50 USD

คำสำคัญ: โปรแกรมแอปชีท, การพัฒนาโปรแกรม, การส่งออกเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร, โปรแกรมคำนวณต้นทุน

Abstract

This research utilized AppSheet to develop a program to select container types and estimate machine-
export. The program development began with creating a container database using Microsoft Excel, followed
by inputting the data into the AppSheet, and created the final program. The program was tested by participants
with and without any experiences to assess their satisfaction levels. Then, the participants investigated a case
study to find periods of the cost estimation using the old tradition method and using the developed program.
The results showed that the program helped the participants to save time in calculating the export cost by 63.70
minutes on average or 70 percent. The periods were calculated to be expenses according to the container
selections of the participant and the expensed could be reduced by USD 962.50 on average.

Keyword: AppSheet program, Program development, Machine-export cost in food-industry,
Cost calculation program

คำนำ

ผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต้องใช้บริการบริษัทขนส่งสินค้าในการส่งออกผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าขนส่งถือเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดราคาต้นทุนผลิตภัณฑ์ที่ส่งออก บริษัทที่ให้บริการด้านการขนส่งทางทะเลต้องบริหารจัดการผู้ขนส่งสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือต้องพยายามให้มีการใช้พื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดภายในตู้สินค้าแต่ละขนาดให้เต็มประสิทธิภาพ ผ่านการจัดเรียงบรรจุภัณฑ์เข้าไปในตู้สินค้าอย่างเหมาะสม ภูพงษ์ พงษ์เจริญ (2556) ทำการวิจัยพบว่ารูปแบบการจัดเรียงสินค้าด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์สามารถจัดเรียงสินค้าได้ถูกต้องแม่นยำ ประมวลผลเร็วกว่าการจัดเรียงโดยใช้ความชำนาญของพนักงาน ธัญญธรณ์ ทองวีร์ (2561) โดยสามารถลดช่องว่างในตู้คอนเทนเนอร์ที่ใช้ขนส่งสินค้า เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและใช้ตู้คอนเทนเนอร์ได้อย่างเหมาะสม ธวัชชัย บุญทัน (2563) จากความสำคัญของการประมาณการต้นทุนค่าขนส่งในการส่งเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการพัฒนาโปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุภัณฑ์จากผู้ผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารด้วยโปรแกรมแอปชีท เพื่อให้ผู้ส่งออกเครื่องจักรอาหารสามารถเลือกประเภทตู้คอนเทนเนอร์และประมาณการต้นทุนการส่งออกได้

อุปกรณ์และวิธีการ

โปรแกรมแอปชีท (AppSheet) เป็นแพลตฟอร์มสำหรับใช้สร้างแอปพลิเคชันโดยไม่ต้องเขียนคำสั่ง สามารถสร้างบนเว็บ ซึ่งง่ายต่อการใช้งานและประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และสามารถเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันหรือไมโครซอฟท์ เอ็กเซล (Microsoft Excel) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้เป็นไปตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้

งานวิจัยนี้เก็บรวบรวมข้อมูลขนาดตู้คอนเทนเนอร์แต่ละประเภทที่ใช้ในการส่งออก ประกอบไปด้วย ตู้คอนเทนเนอร์ขนาด 20, 40 ฟุต ธรรมดา และ แบบพิเศษโดยนำข้อมูลขนาดของประเภทตู้คอนเทนเนอร์แต่ละประเภทลงในโปรแกรม ไมโครซอฟท์ เอ็กเซล เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการตรวจสอบและคำนวณขนาดบรรจุภัณฑ์อุตสาหกรรมในการเลือกใช้ประเภทตู้คอนเทนเนอร์ แล้วติดตั้งข้อมูลประเภทตู้คอนเทนเนอร์บนโปรแกรมแอปชีท เพื่อสร้างฟังก์ชันการตรวจสอบผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ หรือ สมาร์ทโฟน และทดลองการใช้งานโดยกลุ่มตัวอย่างเพื่อวัดระดับความพึงพอใจต่อโปรแกรม อธิบายขั้นตอนการทำโปรแกรมตาม Fig. 2

งานวิจัยนี้ได้เตรียมแบบทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยเป็นคำถามแบบปลายเปิด (Open-ended Question) ประกอบด้วย เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดระยะเวลาในการประมาณการต้นทุนการส่งออก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดต้นทุนในการเลือกใช้ประเภทตู้คอนเทนเนอร์ โดยได้ทำการทดสอบกรณีศึกษาในกลุ่มตัวอย่างได้แก่ บุคลากรที่มีประสบการณ์ และไม่มีประสบการณ์ในการประมาณการต้นทุนการส่งออก กรณีศึกษาที่ใช้เพื่อให้นักวิจัยทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น คือบริษัท เอ ฟู้ด แมชชีน จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตและส่งออกเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร มีความต้องการส่งเครื่องจักรอุตสาหกรรมอาหารและอุปกรณ์ประกอบใน Fig. 3 ไปยังประเทศญี่ปุ่น โดยมีขนาดและน้ำหนักหลังการประกอบเครื่องจักรเบื้องต้นและอุปกรณ์เสริมดังนี้คือ

1. Main Body กิโลกรัม	ขนาด 225 x 380 x 250 เซนติเมตร	น้ำหนัก 11,500
2. Control Panel กิโลกรัม	ขนาด 70 x 85 x 225 เซนติเมตร	น้ำหนัก 160
3. Parts กิโลกรัม	ขนาด 120 x 140 x 85 เซนติเมตร	น้ำหนัก 85
4. Material Charging Machine กิโลกรัม	ขนาด 125 x 500 x 110 เซนติเมตร	น้ำหนัก 1,300
5. Tower กิโลกรัม	ขนาด 150 x 300 x 150 เซนติเมตร	น้ำหนัก 1,000

กลุ่มตัวอย่างทำการประมาณการต้นทุนการส่งออก โดยเลือกใช้ประเภทตู้คอนเทนเนอร์ กำหนดท่าเรือต้นทางคือท่าเรือแหลมฉบัง ประเทศไทย และท่าเรือปลายทางคือท่าเรือเมืองนาโกยา ประเทศญี่ปุ่น รวมทั้งกำหนดให้การประมาณการต้นทุนการส่งออกค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นภายในประเทศไทยเท่านั้น กลุ่มตัวอย่างได้เริ่มต้นการทดสอบโดยการประมาณการต้นทุนการส่งออกเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร ด้วยวิธีดั้งเดิมคือการเลือกใช้ตู้คอนเทนเนอร์จากแคตตาล็อก แล้วคำนวณหาต้นทุนโดยใช้ไมโครซอฟท์ เอ็กเซล ร่วมกับการคำนวณมือ และด้วยการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น (Fig. 4) ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ทำการจับเวลาในการประมาณการต้นทุนที่กลุ่มตัวอย่างใช้ในทั้ง 2 วิธี คณะผู้วิจัยได้นำระยะเวลาที่กลุ่มตัวอย่างใช้มาคำนวณหาชั่วโมงการทำงานโดยคนหนึ่งคน (man-hour) ซึ่งเป็นหน่วยเวลาการทำงานในอุตสาหกรรม จากสมการตาม Equation 1

$$\text{man-hour} = \text{จำนวนคน} \times \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} \quad (1)$$

หลังจากนั้นคณะผู้วิจัยได้นำผลจากการเลือกใช้ประเภทตู้คอนเทนเนอร์ของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดไปคำนวณหาต้นทุนส่งออกเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารโดยใช้ข้อมูลราคาค่าระวาง (Freight) เพื่อใช้ผลจากการคำนวณเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการช่วยลดต้นทุนจากการเลือกใช้ประเภทตู้คอนเทนเนอร์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยตู้คอนเทนเนอร์ขนาด 20 ฟุต มีความยาวและความสูงประมาณ 6 และ 2.3 เมตร ตู้คอนเทนเนอร์ขนาด 40 ฟุต มีความยาวและความสูงประมาณ 12 และ 2.3 เมตร และ ตู้คอนเทนเนอร์ขนาด 40 ฟุตแบบพิเศษ (ไฮคิว) จะมีความสูงอยู่ที่ 2.6 เมตร ตาม Fig.1

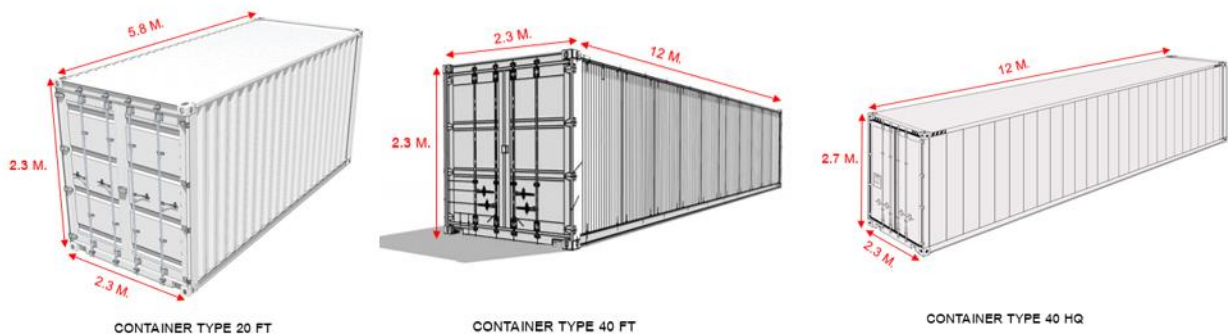


Fig. 1 Container types; 20FT, 40FT and 40HQ.

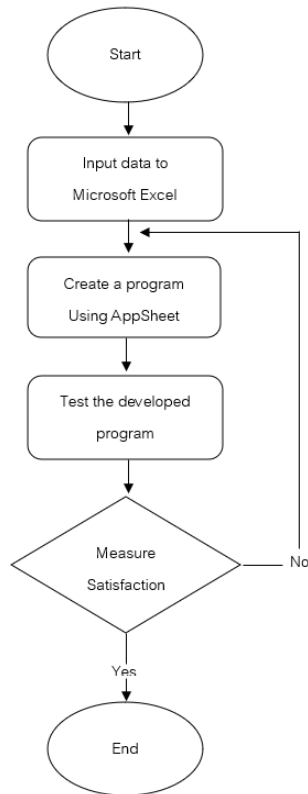


Fig. 2 Workflow for programming process.

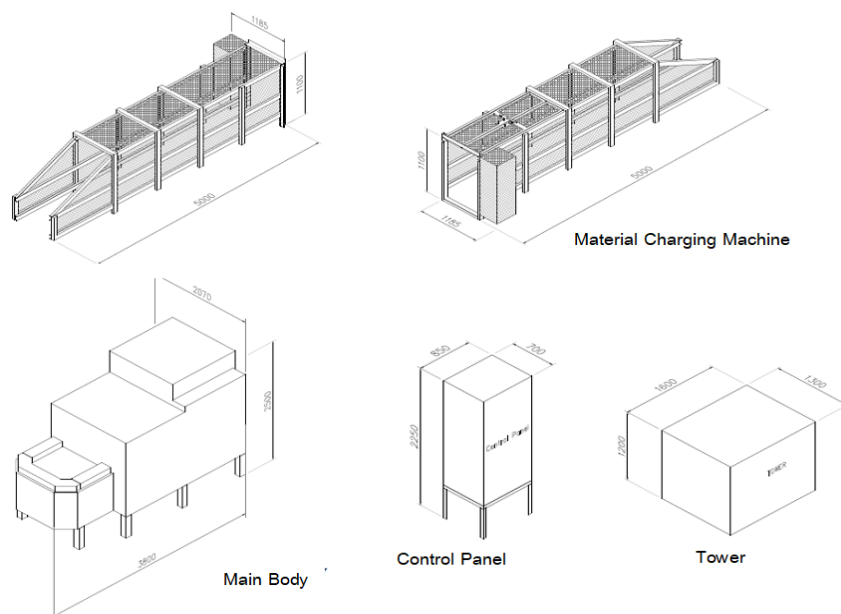


Fig. 3 The test case consisting of Main Body, Charging Machine, Tower, Parts and Control Panel.

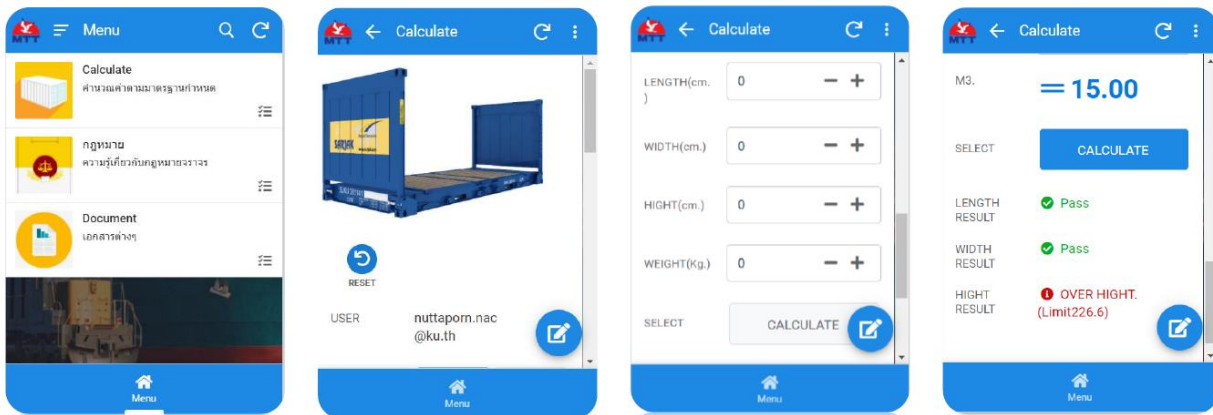


Fig. 4 Results obtained from the developed program on AppSheet.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากขั้นตอนการดำเนินงานใน Fig. 2 คณะผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารจากโปรแกรมแอปชีท ดังแสดงใน Fig. 4 คณะผู้วิจัยได้นำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นไปให้กลุ่มตัวอย่างที่ประกอบด้วย บุคลากรที่มีประสบการณ์ และไม่มีประสบการณ์ในการประมาณการต้นทุนการส่งออกเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานโปรแกรมใน 4 ด้านได้แก่ด้านกระบวนการการใช้งาน/ขั้นตอนการใช้งานระบบ ด้านประสิทธิภาพการใช้งานของโปรแกรม ด้านการแสดงผลในการใช้งาน และด้านความสะดวกสวยงาม ในการใช้งาน จากผลการประเมินพบว่ากลุ่มตัวอย่างที่เป็นบุคลากรที่มีประสบการณ์ มีความพึงพอใจต่อโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเฉลี่ยในระดับ มากที่สุด ส่วนบุคลากรที่ไม่มีประสบการณ์ มีความพึงพอใจต่อโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเฉลี่ยในระดับ มากที่สุด ระดับความพึงพอใจในการใช้งานโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ย 4.71 ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Satisfaction assessment data

Assessment topic	Satisfaction level					Average \bar{x}	S.D.
	Very satisfied	Satisfied (%)	Neutral (%)	Dis-satisfied (%)	Very Dis-satisfied (%)		
	(%)						
The process of using the system	70.00%	30.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.70	0.35
The performance of the program	76.25%	23.75%	0.00%	0.00%	0.00%	4.76	0.36
The display aspect in use	72.50%	25.00%	2.50%	0.00%	0.00%	4.72	0.36
Convenience and beauty of the program	71.25%	22.50%	6.25%	0.00%	0.00%	4.65	0.48
Total						4.71	0.27

ต่อมาคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างกรณีศึกษาดังแสดงใน Fig. 3 ขึ้นมาเพื่อให้กลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มได้ทดสอบการประมาณการราคาต้นทุนการส่งออกทั้ง 2 วิธีได้แก่ ใช้วิธีการดั้งเดิมและใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อวัดระยะเวลาที่ใช้

ในการประมาณการต้นทุนการส่งออก ผลการทดลองระยะเวลาที่ใช้ในการประมาณการต้นทุนการส่งออก พบว่าบุคลากรที่มีประสบการณ์ และบุคลากรที่ไม่มีประสบการณ์สามารถใช้วิธีการดั้งเดิมในการประมาณการต้นทุนในระยะเวลาเฉลี่ย 191.90 นาที แต่เมื่อบุคลากรทั้ง 2 กลุ่มได้ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการประมาณการต้นทุนในระยะเวลาเฉลี่ย 63.70 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยบุคลากรที่มีประสบการณ์ลดระยะเวลาในการประมาณการต้นทุนเฉลี่ยได้ร้อยละ 10.00 เมื่อบุคลากรที่ไม่มีประสบการณ์ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ทำให้บุคลากรกลุ่มนี้สามารถลดระยะเวลาในการประมาณการต้นทุน ได้เฉลี่ยร้อยละ 10.00 ระยะเวลาที่ใช้ในการประมาณการต้นทุนด้วยวิธีดั้งเดิมและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในภาพรวมของกลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม แสดงไว้ใน Table 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระยะเวลาในการประมาณการต้นทุนเฉลี่ยได้ร้อยละ 10.00 คณะผู้วิจัยได้คำนวณหาชั่วโมงการทำงานโดยคนหนึ่งคน (man-hour) ที่กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดใช้ในการประมาณการต้นทุนส่งออกทั้ง 2 วิธี ได้ข้อมูลดังแสดงใน Table 3 ซึ่งเห็นได้ว่าโปรแกรมสามารถช่วยลดระยะเวลาในการทำงานของบุคลากรที่มีประสบการณ์และไม่มีประสบการณ์ คิดเป็นชั่วโมงการทำงานเฉลี่ย 193.33 man-hour และ 234 man-hour ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาการทำงานที่สามารถลดลงได้ ถือเป็นต้นทุนที่บริษัทสามารถลดลงได้โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

Table 2 Comparison of the cost estimating periods before and after using the program.

(n = 20)

Cost Estimating Periods	(Average minute) \bar{x}	S.D.	t	Sig.
Using Manual	191.90	89.16	7.77	0.001
Using Program	63.70	30.59		

หลังจากนั้นคณะผู้วิจัยได้นำผลการจัดคำนวณหาต้นทุนในการเลือกใช้ประเภทตู้คอนเทนเนอร์จากการเลือกของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด พบว่าเมื่อกลุ่มตัวอย่างใช้วิธีการดั้งเดิมในการเลือกประเภทตู้คอนเทนเนอร์ ต้นทุนในการส่งออกเฉลี่ยมีค่า 1,640 ดอลลาร์สหรัฐฯ (USD) แต่เมื่อกลุ่มตัวอย่างใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการเลือกประเภทตู้คอนเทนเนอร์ ทำให้ต้นทุนในการส่งออกเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ 962.50 ดอลลาร์สหรัฐฯ (USD) ดังข้อมูลใน Table 4 ซึ่งทำให้คณะผู้วิจัยเห็นว่าการเลือกตู้คอนเทนเนอร์ที่แตกต่างกันทำให้ต้นทุนการส่งออกแตกต่างกันด้วย จากข้อมูลดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้คำนวณหาประสิทธิภาพในการลดต้นทุนจากการเลือกตู้คอนเทนเนอร์โดยการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคิดเป็นร้อยละ 10.00 หลังจากการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด คณะผู้วิจัยได้นำเสนอการบรรจุสินค้าในกรณีตัวอย่างในตู้คอนเทนเนอร์ที่เหมาะสม ตาม Fig. 5 ให้กลุ่มตัวอย่างได้ทราบว่า หากผู้ประมาณการต้นทุนการส่งออกทำการบรรจุสินค้าในตู้คอนเทนเนอร์แตกต่างจากรูปแบบใน Fig. 5 สามารถส่งผลให้เกิดการเลือกใช้ตู้คอนเทนเนอร์ผิดประเภทและเกิดการคำนวณประมาณการต้นทุนผิด ทำให้ประมาณการต้นทุนค่าระวางเพิ่มสูงขึ้น

Table 3 Labor costs calculated from the cost estimating periods in man-hour.

Representative sample	Average working time		Man-hour difference
	using Manual	using Program	
	(man-hour)	(man-hour)	
Experienced group (10 person)	$10 \times 31.33 = 313.33$	$10 \times 12 = 120$	193.33
Non-Experienced group (10 person)	$10 \times 32.63 = 326.33$	$10 \times 9.23 = 92.33$	234

Table 4 Comparison of the export costs from choosing a container type before and after using the program.

Export costs from choosing a container type	Average (USD)	S.D.	t	Sig.
	\bar{x}			
Using Manual	1,640.00	376.13	8.41	0.001
Using Program	962.50	107.45		

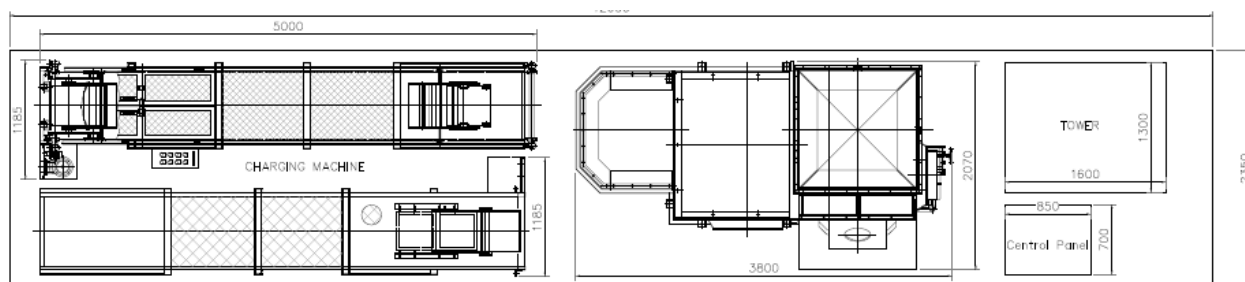


Fig. 5 The suitable load plan of the case study using the 40 HQ container type.

สรุป

เนื่องจากค่าขนส่งเครื่องจักรถือเป็นต้นทุนการส่งออกที่สำคัญสำหรับธุรกิจผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร การประมาณการต้นทุนการส่งออกเครื่องจักรได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จึงเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญที่สามารถช่วยให้ธุรกิจการผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมใช้เพื่อคำนวณราคาต้นทุนและให้ข้อมูลดังกล่าวแก่ลูกค้าได้ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาโปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารด้วยโปรแกรมแอปพลิเคชัน โดยเริ่มจากการเลือกผู้คอนเทนเนอร์แล้วคำนวณประมาณการต้นทุนการส่งออกเครื่องจักร โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานโดยกลุ่มตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยบุคลากรที่มีประสบการณ์และบุคลากรที่ไม่มีประสบการณ์ จากผลการประเมินความพึงพอใจทั้ง 4 ด้านได้แก่ ด้านกระบวนการการใช้งานและขั้นตอนการทำงาน ด้านประสิทธิภาพการใช้งานของโปรแกรม ด้านการแสดงผลในการใช้งานและ ด้านความสะดวกสวยงาม ในการใช้งาน พบว่ากลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจในการใช้งานโปรแกรมในระดับดีมาก เมื่อนำกรณีศึกษาไปให้กลุ่มตัวอย่างทำประมาณการต้นทุนการส่งออกด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ในระยะเวลาที่กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 63.96 ชั่วโมง แต่เมื่อกลุ่มตัวอย่างกลุ่มตัวอย่างใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการประมาณการต้นทุน พบว่าระยะเวลาที่กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 21.23 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละของระยะเวลาที่ใช้ในการประมาณการต้นทุนที่ลดลงจากการใช้โปรแกรมอยู่ที่ 1000 เมื่อนำ

ระยะเวลาที่กลุ่มตัวอย่างใช้ไปคำนวณหาชั่วโมงการทำงานโดยคนหนึ่งคน (man-hour) พบว่ากลุ่มตัวอย่างทั้งหมดใช้เวลาทำงานด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมเฉลี่ยอยู่ที่ 639.66 man-hour แต่ใช้เวลาทำงานด้วยโปรแกรมเฉลี่ยอยู่ที่ 212.33 man-hour จากการนำผลการเลือกผู้คอนเทนเนอร์ของกลุ่มตัวอย่างไปประมาณการต้นทุนค่าขนส่ง พบว่าการเลือกผู้คอนเทนเนอร์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อต้นทุนที่แตกต่างกัน การใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยให้กลุ่มตัวอย่างสามารถลดต้นทุนในการส่งออกเครื่องจักรคิดเป็นร้อยละ 10.00 ดังนั้นการใช้โปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถช่วยให้ผู้ส่งออกประมาณการได้อย่างมีนัยสำคัญ และผู้ที่สนใจประมาณการต้นทุนการส่งออกเครื่องจักรอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆสามารถปรับใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอ ฟู้ด แมชชีน จำกัด เจ้าของกรณีศึกษา และกลุ่มตัวอย่างที่เสียสละเวลาในการร่วมประเมินโปรแกรมคำนวณขนาดบรรจุผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหาร และกรณีศึกษาดังกล่าว

เอกสารอ้างอิง

ภุพงษ์ พงษ์เจริญ. 2556. การพัฒนาโปรแกรมช่วยแก้ปัญหาการจัดเรียงกล่องผลิตภัณฑ์ลงในตู้สินค้าด้วยวิธีการระบบ

ภูมิคุ้มกันเสมือน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยนเรศวร

ธัญธรณ์ ทองวีร์. 2561. วิธีการทางฮิวริสติกสำหรับปัญหาการจัดเรียงสินค้าลงในตู้สินค้า วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ธวัชชัย บุญทัน, เพ็ญภาค ศิริมาก, สัตยชัย ยอดมณี, อัครพงศ์ วงศ์พัฒน์, ไกรศักดิ์ จันทร์โกเมท. 2563. ระเบียบวิธีฮิวริสติกส์

สำหรับปัญหาการจัดเรียงกล่องบรรจุอาหารในตู้คอนเทนเนอร์. ปีที่ 1 ฉบับที่ 3 2563: วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี

การศึกษาและปรับปรุงระบบระบายอากาศในห้องพ่นทราย

Study and Improvement of ventilation systems in sand blasting room

ศิริสิทธิ์ แก้วม่วง^๑, ชรินทร์ ตรงจิตภักดี^๒

Sirasit Kaewmuang^๑, Chanin Tongchitpakdee^๒

^๑ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^๒ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^๑Safety engineering Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^๒Department of Aerospace Engineering Faculty of Engineering Bangkok Campus, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและปรับปรุงระบบระบายอากาศในห้องพ่นทราย เพื่อลดปริมาณความเข้มข้นฝุ่น Silicon carbide ขนาดไม่เกิน 10, 125 ไมครอน ให้มีค่าตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด โดยการศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม SOLIDWORKS ในการสร้างแบบจำลองการระบายอากาศ โดยได้สร้างแบบจำลองย้ายตำแหน่งพัดลมดูดอากาศไปยังบริเวณอื่นภายในห้องและเพิ่มช่องเติมอากาศเข้าห้องเนื่องจากปัจจุบันไม่มีช่องอากาศเข้า ผลการวิเคราะห์พบว่า พัดลมดูดอากาศสามารถดูดมีประสิทธิผลการดูดเพิ่มขึ้นจากเดิม 33-43% ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น Silicon Carbide ที่ฟุ้งกระจายอยู่ในห้องพ่นทรายลดน้อยตามไปด้วย จากนั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นเพื่อทำการวิเคราะห์โดยผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นมีค่าดังนี้ ฝุ่นทั่วไปขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน Total Dust มีค่าเท่ากับ 6 mg/m^3 และค่าการสัมผัสฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน Respirable Dust มีค่าเท่ากับ 2.6 mg/m^3 ผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนด

คำสำคัญ: ฝุ่น Silicon Carbide, ระบบระบายอากาศ, ห้องพ่นทราย

Abstract

The objective of this study was to evaluate and improve the efficacy of the ventilation system in a sandblasting room to ensure that the concentration level of 10 micrometers or less and 125 micrometers or less of Silicon Carbide particles in compliance with the standard. We used the SOLIDWORKS software program to evaluate the efficacy operation of the existing ventilation system, NIOSH method 0500 and 0600 to analyze the concentration level of general dust and respirable dust. In the simulation model, we moved the exhaust ventilator to the defined point and added one air inlet into the sandblasting room (the existing room has no air inlet). The efficacy of the exhaust ventilator increased 33 – 43% resulted in a decrease in the concentration level of Silicon Carbide particles in a sandblasting room. The result of general dust analysis was 6 mg/m^3 and respirable dust analysis was 2.6 mg/m^3 which compliance with the standard.

Keywords: Silicon Carbide dust, ventilation system, sandblasting room

คำนำ

อุตสาหกรรมกระจกและอลูมิเนียมเป็นอีกธุรกิจหนึ่งที่เติบโตเป็นอย่างมากในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมาขั้นตอนกระบวนการผลิตและติดตั้งจึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ธุรกิจเจริญเติบโตได้อย่างเข้มแข็งและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้กระบวนการผลิตกระจกนั้นมีขั้นตอนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทกระจกและวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานทั้งนี้ยังมีกระจกอีกหนึ่งประเภทที่ได้รับความนิยมนำมาตกแต่งที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงานหรือแม้แต่สถานประกอบการพีธีกรรมทางศาสนาต่างๆ ในปัจจุบันกระจกประเภทนั้นคือกระจกแก๊สหลายพันทราเย ซึ่งกระบวนการผลิตกระจกประเภทนี้จะนำทราเย Silicon Carbide มาพันไปยังผิวกระจกด้วยการพันทราเยต่างระดับไปยังผิวกระจก จึงทำให้เกิดมิติของลวดลายตามที่ถูกออกแบบได้ กำหนดกระบวนการนี้จะมีการเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาพันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเทคนิคการพันและลักษณะของชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ทางผู้วิจัยเลือกใช้ Silicon carbide ขนาด 125 ไมครอน ในการทดลอง เนื่องจากเป็นขนาดที่ผู้ปฏิบัติงานใช้ อยู่ในปัจจุบัน ขั้นตอนการพันผู้ปฏิบัติงานจะปฏิบัติงานในห้องปิดมิดชิดเพื่อป้องกันฝุ่นฟุ้งกระจายออกสู่ภายนอก ด้วยลักษณะการทำงานดังกล่าวจึงทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องสัมผัสฝุ่นทราเยที่เกิดจากกระบวนการผลิตตลอดระยะเวลาที่ปฏิบัติงานอันนำไปสู่ความเสี่ยงในการเกิดโรคปอดฝุ่นหินหรือโรคซิลิโคสิส (Silicosis) ในอนาคต ซึ่งปัจจุบันผลของค่าปริมาณฝุ่นที่ตกค้างในห้องพันทราเยเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญจึงได้ทำการศึกษาและปรับปรุงระบบการระบายอากาศในห้องพันทราเย โดยนำโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation เข้ามาช่วยในการจำลองการฟุ้งกระจายของฝุ่นพร้อมทั้งช่วยวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ฝุ่นตกค้างอยู่ในห้องปฏิบัติงานและช่วยในการออกแบบปรับปรุงห้องปฏิบัติงานให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ทั้งหมดนี้เพื่อเป็นการลดความเสี่ยงในการสัมผัสฝุ่นทราเยที่อาจนำไปสู่การเกิดโรคจากการทำงานต่อผู้ปฏิบัติงานในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยฉบับนี้มีการนำโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของไหลที่ไหลผ่านโมเดล 3 ในการวิเคราะห์ ความสามารถของ Flow Simulation สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของของไหล เช่น ความเร็ว ทิศทางการไหลความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล เป็นต้น เข้ามาช่วยในการจำลองสภาพเสมือนจริงและวิเคราะห์ผล

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้เครื่องมือช่วย 2 ลักษณะ ดังนี้

1) เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) Benetech รุ่น GM816A เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความเร็วลมโดยจะบอกค่าความเร็วลมตามตำแหน่งที่ทำกรอ่านค่า เครื่องมือวัดความเร็วลมสามารถเลือกหน่วยวัดได้ 5 หน่วยได้แก่ mph, Km/h, m/s, ft/min และ Knots (มีย่านการวัด 0 – 30m/s, 0 – 90km/h, 0 – 5860ft/min 0 – 65mph, 0 – 55Knots) ด้วยค่าความแม่นยำ (Accuracy) : +/- 5% เครื่องวัดความเร็วลมรุ่นนี้เหมาะสำหรับการตรวจสอบความเร็วลมของท่อลม พัดลม มอเตอร์ เครื่องเป่าลม ตรวจสอบความเร็วลมของระบบปรับอากาศ 2) เครื่องมือวิเคราะห์แบบจำลอง SOLIDWORKS Flow Simulation เป็นโปรแกรมที่ช่วยในการจำลองของไหลของเหลว , การถ่ายโอนความร้อนและกำลังของของเหลวซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญสำหรับการออกแบบด้านวิศวกรรม โปรแกรม SOLIDWORKS ช่วยในการจำลองถ่ายเทความร้อนและก๊าซในสภาวะจำลองที่มีเงื่อนไขเหมือนโลกจริง, หรือในสถานการณ์ที่เป็นเงื่อนไขเฉพาะเจาะจง

ทางผู้วิจัยจึงทำการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การระบายอากาศในห้องพ่นทรายโดยขนาดของห้องและสภาพแวดล้อมในการทำงานอ้างอิงจากสภาพการทำงานจริง ซึ่งสภาพปัจจุบันห้องพ่นทรายมีขนาดพื้นที่ความกว้าง ความยาว ความสูงเท่ากับ $4.1 \times 4.8 \times 5$ เมตร ตามลำดับและมีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศจำนวน 1 เครื่อง ฝังอยู่บนผนัง กำแพงตรงข้ามกับประตูทางเข้า-ออก ประตูทางเข้า-ออกมีขนาด 1×3 เมตร และมีช่องใต้ประตูขนาด 1×0.03 เมตร ซึ่งทั้งหมดแสดงตามรูปภาพ (Fig. 1)

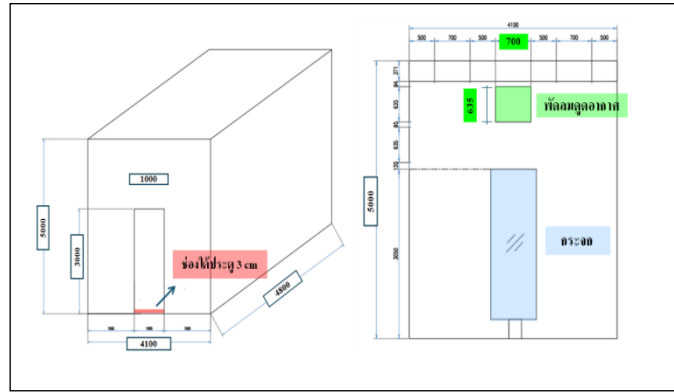


Fig. 1 Sandblasting Room

จากข้อมูลการสำรวจสภาพการทำงานในปัจจุบันพบว่าสาเหตุที่อาจทำให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพอาจเกิดจาก 2 สาเหตุ ดังนี้

สาเหตุที่ 1 ในห้องพ่นทรายไม่มีจุดสำหรับเติมอากาศเข้า จึงทำให้ภายในห้องมีสภาพคล้ายสุญญากาศ(มีลมออกแต่ไม่มีลมเข้า) ส่งผลให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาเหตุที่ 2 ห้องพ่นทรายมีช่องใต้ประตูขนาดความกว้าง 1 เมตร \times 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่องที่ลมสามารถไหลเข้ามาได้แต่เนื่องจากช่องดังกล่าวมีก่องฝุ่นกอนปิดช่องอยู่จำนวนมากอีกทั้งช่องใต้ประตูนี้ไม่ใช่ช่องที่ใช้สำหรับเติมอากาศเข้าห้องพ่นทราย จึงคาดว่าเป็นอีกปัจจัยในการทำให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการกำหนดค่าที่ตรวจวัดได้ลงในโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลและทำการจำลองย้ายตำแหน่งพัดลมดูดอากาศไปยังบริเวณอื่นภายในห้องและเพิ่มช่องเติมอากาศเข้าห้องเนื่องจากปัจจุบันไม่มีช่องอากาศเข้า มีแต่ส่วนช่องใต้ประตูจากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งกำหนดเกณฑ์การวิเคราะห์ไว้ 3 ปัจจัยดังนี้

ปัจจัยที่ 1 เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการระบายอากาศของพัดลมดูดอากาศตำแหน่งต่างๆ ก่อนและหลังทำการปรับปรุง (กำหนดตำแหน่งย้ายพัดลมดูดอากาศออกเป็น 6 ตำแหน่ง) ทางผู้วิจัยจะดำเนินการสร้างแบบจำลองห้องพ่นทรายด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS ตามขนาดห้องจริงทั้งตำแหน่งลมเข้าและตำแหน่งพัดลมดูดอากาศ โดยจะจำลองย้ายตำแหน่งพัดลมดูดอากาศไปบนผนังจุดต่างๆ ซึ่งกำหนดไว้ 6 จุด โดยแต่ละจุดพิจารณาจากความเป็นไปได้ถ้าต้องเจาะผนังเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งพัดลมดูดอากาศซึ่งขนาดความกว้างของช่องพัดลมนั้นอ้างอิงจากขนาดที่ใช้จริง ในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยต้องการหาตำแหน่งที่พัดลมดูดอากาศสามารถดูดฝุ่นทรายได้ดีที่สุด ตามรูปภาพ (Fig. 2)

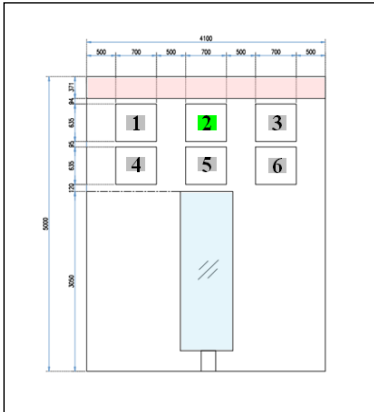


Fig. 2 Sandblasting Room

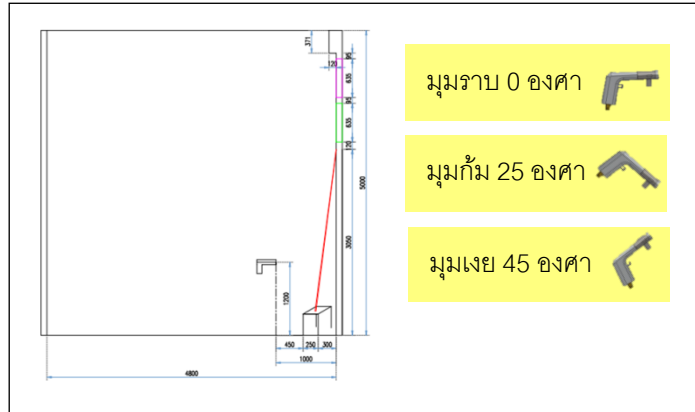


Fig. 3 Sandblasting angle

ปัจจัยที่ 2 เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการระบายอากาศกับองศาปืนพ่นทราย ก่อนและหลังทำการปรับปรุง (กำหนดองศามุมปืนพ่นทรายแบ่งเป็น 3 มุมองศาคือ มุมแนวราบ 0 องศา, มุมก้ม 25 องศา และมุมเงย 45 องศา) การกำหนดองศาปืนพ่นทรายทางผู้วิจัยจะจำลองค่าในโปรแกรม SOLIDWORKS พิจารณาจากการปฏิบัติงานจริงโดยได้แบ่งมุมปืนพ่นทรายออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ 1) มุมแนวราบ 0 องศา ใช้พ่นทรายในพื้นที่ส่วนกลางของกระจก 2) มุมก้ม 25 องศา ใช้พ่นทรายในพื้นที่ส่วนล่างของกระจก 3) มุมเงย 45 องศา ใช้พ่นทรายในพื้นที่ส่วนบนของกระจกโดยความสูงที่วัดจากพื้นห้องถึงขอบกระจกอยู่ที่ 3.05 เมตร ซึ่งเป็นความสูงที่ผู้ปฏิบัติงานพบเจอบ่อย ในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการระบายอากาศกับองศาปืนพ่นทราย ตามรูปภาพ (Fig. 3)

ปัจจัยที่ 3 เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการระบายอากาศของห้องพ่นทรายก่อนและหลังทำการปรับปรุงในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยจะดำเนินการแปรผลค่าการวิเคราะห์ของโปรแกรม SOLIDWORKS จากนั้นจะทำประเมินความเหมาะสมในการปรับปรุงห้องพ่นทราย

การตั้งค่าการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation ทางผู้วิจัยได้กำหนดค่าดังนี้

1) การกำหนดค่า Mesh ของแบบจำลองนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การกำหนดค่า Mesh ภายในห้องทั้งหมด ซึ่งลักษณะโดยรวมของห้องจะเป็นห้องโล่ง ซึ่งจะมีกระจกที่เป็นชิ้นงานโต๊ะสำหรับวางชิ้นงานและตัวปืนพ่นทรายที่เป็นอุปกรณ์พ่นทรายเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงตั้งค่าโดยเริ่มจากการเลือกคำสั่ง Global Mesh โปรแกรมจะกำหนดค่าความละเอียดที่เหมาะสมอยู่ที่ Level 3 จากนั้นให้เลือกคำสั่ง Show basic mesh เพื่อดูขนาดของ Mesh ภายในห้อง จากนั้นให้เข้าไปที่คำสั่ง Manual เลือกหัวข้อ Advanced Refinement เพื่อปรับค่า Mesh เมื่อพบชิ้นงาน ซึ่งตัวโปรแกรมจะวิเคราะห์ค่าในส่วนของด้ามปืน โต๊ะ และกระจก ซึ่งเป็นแค่องค์ประกอบของห้องพ่นทรายเท่านั้น ให้ปรับระดับความละเอียดอยู่ที่ Level 3 ตามภาพรูปภาพ (Fig. 4)

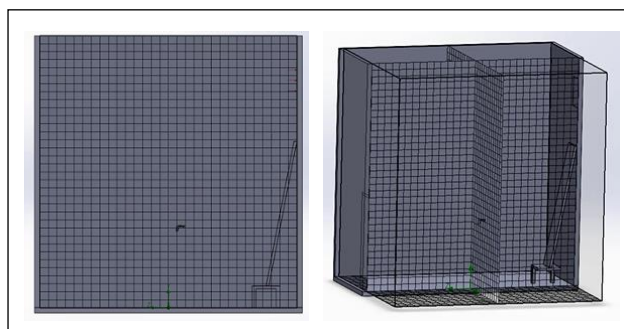


Fig. 4 Global Mesh Settings

ส่วนที่ 2 การกำหนดค่า Mesh เฉพาะจุด ซึ่งขั้นตอนนี้จะปรับ Mesh ในส่วนของจุดที่เป็นลมออกซึ่งอยู่ในลำกล้องปืนพ่นทรายและจุดที่มีลมเข้าคือส่วนของใต้ประตู โดยเริ่มจากการตั้งค่า Mesh จุดที่เป็นลมออก การตั้งค่าเริ่มจากการเลือกคำสั่ง Insert Local Mesh เลือกพื้นที่ในลำกล้องปืนพ่นทราย จากนั้นเลือกคำสั่ง Display Refinement Level เพื่อดูขนาดของ Mesh ที่เหมาะสม จากนั้นเลือกหัวข้อ Channels ปรับค่าความละเอียดไปที่ Level 8 สำหรับการตั้งค่า Mesh จุดที่มีลมเข้าคือส่วนของใต้ประตู ให้ทำขั้นตอนเดียวกันแต่เลือกปรับระดับความละเอียดอยู่ที่ Level 5 ตามรูปภาพ (Fig. 5)

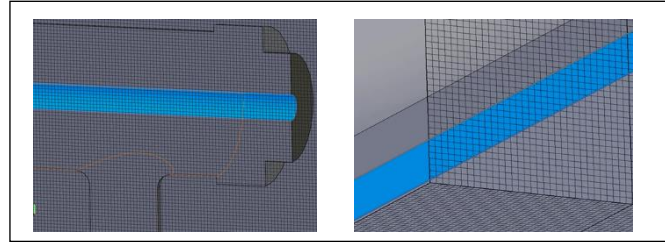


Fig. 5 Local Mesh Settings

2) การกำหนดค่าเงื่อนไขและขอบเขต (Boundary conditions) กำหนดทางเข้าลม

ก่อนทำการปรับปรุงกำหนดค่า 3 จุด ดังนี้ จุดที่ 1 ช่องลมออก Outlet Velocity กำหนดค่าความเร็วลมอยู่ที่ 2.0 m/s (วัดค่าน้ำงานจริง), จุดที่ 2 ช่องปืนพ่นทราย Static Pressure กำหนดค่าความดันที่ 5 bar (ความดันที่ใช้ในการพ่นทราย), จุดที่ 3 ช่องลมใต้ประตูตั้งค่าเป็น Environment Pressure ตามภาพรูปภาพ (Fig. 6)

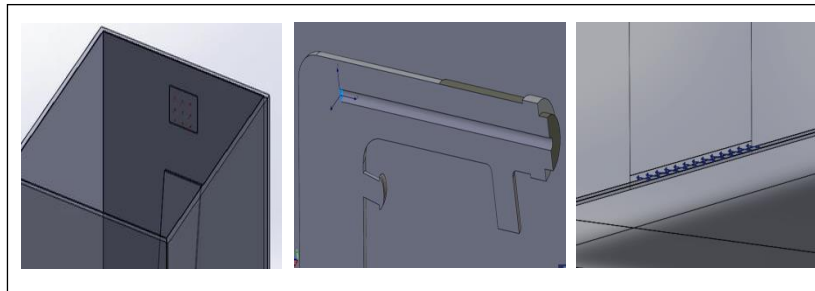


Fig. 6 Boundary Conditions Settings

การตั้งค่าดังกล่าวทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมแสดงผลที่ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จากการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมพบว่า ควรตั้งค่าการประมวลผลห้องพ่นทรายดังนี้ ค่า Iteration ไม่ควรต่ำกว่า 700 รอบ , จำนวน Cell ในการวิเคราะห์ที่ไม่ต่ำกว่า 90,000 cell และปริมาณฝุ่นในการจำลองไม่ควรต่ำกว่า 1,500 particles

การทดสอบความน่าเชื่อถือ (Calibration) ในการวัดค่าความเร็วลมจากสถานที่จริงเทียบกับการวัดค่าด้วยโปรแกรมจำลองสภาพเสมือนจริง ทางผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าความเร็วลมภายในห้องพ่นทรายจำนวน 18 จุด กระจายเพื่อให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ภายในห้องโดยแบ่งเป็นตำแหน่งบนและตำแหน่งล่าง ตามรูปภาพ (Fig. 7)

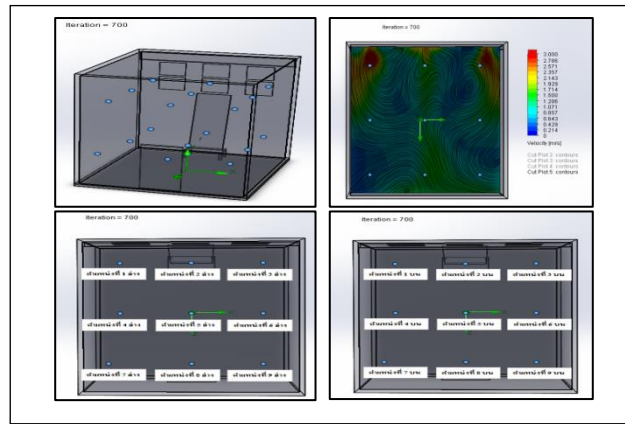


Fig. 7 Velocity measurement position

จากการนำค่าความเร็วลมภายในห้องพ่นทรายด้วยการวัดค่าจากสถานที่จริงและการวัดค่าด้วยโปรแกรมจำลองสภาพเสมือนจริงเพื่อทดสอบความถูกต้อง (Calibration) พบว่า ความเร็วลมเฉลี่ยจากการวัดค่าจากสถานที่จริงมีค่ามากกว่าการวัดค่าด้วยโปรแกรมจำลอง ทั้งนี้ผลที่ได้ยังอาจมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่แตกต่างกัน สาเหตุอาจเกิดจากการถือเครื่องมือวัดความเร็วลมที่วัดจริงอาจมีการสั่นทำให้ค่าที่ได้ยังมีความนิ่งไม่มากพอและด้วยตำแหน่งการวัดความเร็วลมจากสถานที่จริงอาจมีคลาดเคลื่อนจากการใช้โปรแกรมเนื่องจากจุดที่วัดค่ามีความสูงค่อนข้างมากอาจส่งผลทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนของข้อมูล ผลการวัดค่าแสดงตามภาพรูปภาพ (Fig. 8)

ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วลมจากเครื่องมือวัดและโปรแกรมจำลองบน กึ่งกลางทางขึ้นรถ						ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วลมจากเครื่องมือวัดและโปรแกรมจำลองบน กึ่งกลางทางขึ้นรถ					
ส่วนหน้า		ส่วนหน้า		ส่วนหน้า		ส่วนหน้า		ส่วนหน้า		ส่วนหน้า	
ส่วนหน้าที่ 1 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 2 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 3 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 4 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 5 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 6 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 1 บน	ส่วนหน้าที่ 2 บน	ส่วนหน้าที่ 3 บน	ส่วนหน้าที่ 4 บน	ส่วนหน้าที่ 5 บน	ส่วนหน้าที่ 6 บน
0.265	0.270	1.281	1.290	0.397	0.400	2.479	2.510	1.031	1.120	2.928	3.100
ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง
0.005	0.005	0.009	0.009	0.003	0.003	0.031	0.031	0.089	0.089	0.172	0.172
ส่วนหน้าที่ 4 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 5 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 6 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 7 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 8 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 9 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 4 บน	ส่วนหน้าที่ 5 บน	ส่วนหน้าที่ 6 บน	ส่วนหน้าที่ 7 บน	ส่วนหน้าที่ 8 บน	ส่วนหน้าที่ 9 บน
0.469	0.470	0.931	0.94	0.729	0.730	0.630	0.630	1.188	1.200	0.909	0.910
ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง
0.001	0.001	0.009	0.009	0.001	0.001	0.000	0.000	0.012	0.012	0.001	0.001
ส่วนหน้าที่ 7 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 8 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 9 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 10 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 11 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 12 ล่าง	ส่วนหน้าที่ 7 บน	ส่วนหน้าที่ 8 บน	ส่วนหน้าที่ 9 บน	ส่วนหน้าที่ 10 บน	ส่วนหน้าที่ 11 บน	ส่วนหน้าที่ 12 บน
0.720	0.72	0.854	0.86	1.247	1.25	0.428	0.430	1.542	1.550	0.923	0.93
ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง	ส่วนล่าง
0.000	0.000	0.006	0.006	0.003	0.003	0.002	0.002	0.008	0.008	0.007	0.007

ความเร็วลมเฉลี่ยที่วัด
 ในระดับหัวรถจักร 1.05 m/s
 ในระดับที่นั่ง 1.06 m/s

Fig. 8 The result of velocity comparison between the measurement from the workplace and the measurement with Solidwork.

ค่าความเชื่อมั่นค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวิจัยพิจารณาอ้างอิงโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สูตรของเพียร์สัน (Equation1) พบว่าค่าที่ได้คือ 1 แปลว่าค่ามีความเชื่อมั่นสูง แสดงตามรายละเอียดดังนี้

จากสูตรของเพียร์สัน (Pearson Product Moment Correlation)

$$r_{xy} = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (1)$$

เมื่อค่า	r_{xy}	=	ความเชื่อมั่นของเครื่องมือ
	N	=	จำนวนตำแหน่งที่เก็บข้อมูล
	X	=	ค่าความเร็วลมจากแบบทดสอบชุดที่ 1
	Y	=	ค่าความเร็วลมจากแบบทดสอบชุดที่ 2

ผลการวัดค่าความเร็วลมจากสถานที่จริงและการวัดผลด้วยโปรแกรม Solidworks แสดงตามตาราง (Table 1)

Table 1 The result of velocity measurement from the workplace and the measurement with Solidwork.
(Positions 1–9 represent the 1–9 bottom and positions 10–18 represent the 1–9 top)

Position	Velocity result				
	Measurement from the workplace (X)	Measurement with Solidwork (Y)	X ²	Y ²	XY
1	0.27	0.27	0.07	0.07	0.07
2	1.29	1.28	1.66	1.64	1.65
3	0.40	0.40	0.16	0.16	0.16
4	0.47	0.47	0.22	0.22	0.22
5	0.94	0.93	0.88	0.87	0.88
6	0.73	0.73	0.53	0.53	0.53
7	0.72	0.72	0.52	0.52	0.52
8	0.86	0.85	0.74	0.73	0.73
9	1.25	1.25	1.56	1.56	1.56
10	2.51	2.48	6.30	6.15	6.22
11	1.12	1.03	1.25	1.06	1.15
12	3.10	2.93	9.61	8.57	9.08
13	0.63	0.63	0.40	0.40	0.40
14	1.20	1.19	1.44	1.41	1.43
15	0.91	0.91	0.83	0.83	0.83
16	0.43	0.43	0.18	0.18	0.18
17	1.55	1.54	2.40	2.38	2.39
18	0.93	0.92	0.86	0.85	0.86
Total	19.31	18.95	29.64	28.12	28.86

$$r_{xy} = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

$$r_{xy} = \frac{18(28.86) - (19.31)(18.95)}{\sqrt{[(18)(29.64) - (19.31)^2][(18)(28.12) - (18.95)^2]}}$$

$$r_{xy} = 1.0$$

ค่าความเชื่อมั่นของเครื่องมืออยู่ระหว่าง 0.00 – 1.00 ยิ่งใกล้ 1.00 ยิ่งมีความเชื่อมั่นสูงแปลผลเกณฑ์ผลความเชื่อมั่นมีดังนี้ (อ้างอิงใน เกียรติสุดา ศรีสุข. (2552). ระเบียบวิธีวิจัย. (พิมพ์ครั้งที่ 3). เชียงใหม่: ครองช่างพริ้นติ้ง)

0.0 – 0.20 = ความเชื่อมั่นต่ำมากไม่มีเลย

0.21 – 0.40 = ความเชื่อมั่นต่ำ

0.41 – 0.70 = ความเชื่อมั่นปานกลาง

0.71 – 1.00 = ความเชื่อมั่นสูง

ผลเปรียบเทียบความเร็วลมภายในห้องมีค่าใกล้เคียงกันโดยก่อนปรับปรุงวัดค่าความเร็วลมจากพื้นที่จริงเฉลี่ยอยู่ที่ 1.06 m/s โปรแกรมวิเคราะห์ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 1.05 m/s และหลังปรับปรุงวัดค่าความเร็วลมจากพื้นที่จริงเฉลี่ยอยู่ที่ 0.95 m/s โปรแกรมวิเคราะห์ค่าความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92 m/s จากการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยภายในห้องพ่นทรายก่อนปรับปรุงสูงกว่าหลังปรับปรุงนั้นมาจากการผันผวนของอากาศภายในห้อง เนื่องจากอัตราการระบายอากาศก่อนปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าจึงทำให้เกิดการไหลวนของอากาศที่มากกว่า ส่งผลทำให้เกิดความลมเร็วเฉลี่ยภายในห้องที่สูงกว่าตามมา

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การคำนวณหาอัตราการระบายอากาศที่เพียงพอกับห้องพ่นทราย โครงการศึกษาและปรับปรุงระบบระบายอากาศในห้องพ่นทรายมีขนาดห้องเท่ากับ $4.1 \times 4.8 \times 5$ เมตร โดยคิดพื้นที่ได้ 98.4 ลูกบาศก์เมตร และติดตั้งพัดลมดูดอากาศเพื่อดูดฝุ่นทรายที่ฟุ้งกระจายขณะปฏิบัติงานเป็นระบบ Backward Single Fan (Belt Driven) จำนวน 1 ตัว ฝังอยู่ในผนังกำแพงและต่อท่อออกไปยังห้องกับฝุ่นด้านหลัง

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการระบายอากาศของห้องพ่นทราย (Equation 2):

$$\text{ความกว้างของห้อง (หน่วย ft)} \times \text{ความสูงของห้อง (หน่วย ft)} \times \text{Cross Sectional Air-Speed (fpm)} = \text{cfm} \quad (2)$$

อัตราการระบายอากาศที่ต้องการของห้องพ่นทรายเทียบจากตารางโดยเลือกชนิดของวัสดุขัดผิวที่มีส่วนประกอบมากกว่า 5% free silica เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้เป็นทราย Silicon Carbide จึงเลือกค่า Cross Sectional Air-Speed (fpm) เท่ากับ 100 cfm/ft² และสามารถคำนวณได้ดังนี้ (Equation 3):

$$Q = 13.5 \text{ ft} \times 16.5 \text{ ft} \times 100 \text{ cfm/ft}^2 \quad (3)$$

$$= 22,275 \text{ cfm}$$

จากการคำนวณหาอัตราการระบายอากาศ พบว่าอัตราการระบายอากาศเพียงพอต่ออัตราการระบายอากาศของห้องพ่นทรายดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ส่งผลให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ผลการ

วิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดฝุ่นขนาดไม่เกิน 10, 125 ไมครอน พบว่าสาเหตุที่ทำให้พัดลมดูดอากาศทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพมี 2 สาเหตุ ดังนี้

สาเหตุที่ 1 ในห้องพ่นทรายไม่มีจุดสำหรับเติมอากาศเข้า จึงทำให้ภายในห้องมีสภาพคล้ายสุญญากาศ (มีลมออกแต่ไม่มีลมเข้า) ส่งผลให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาเหตุที่ 2 ห้องพ่นทรายมีช่องใต้ประตูขนาดความกว้าง 1 เมตร \times 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่องที่ลมสามารถไหลเข้ามาได้แต่เนื่องจากช่องดังกล่าวมีกองฝุ่นกองปิดช่องอยู่จำนวนมากอีกทั้งช่องใต้ประตูนี้ไม่ใช่ช่องที่ใช้สำหรับเติมอากาศเข้าห้องพ่นทราย จึงคาดว่าเป็นอีกปัจจัยในการทำให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพอีกทั้งยังพบว่ามุมป็นพ่นทรายขณะปฏิบัติงานและตำแหน่งของพัดลมดูดอากาศยังส่งผลต่อปริมาณฝุ่นทรายที่ถูกออกอีกด้วย ดังนั้นจึงได้กำหนดค่ามุมป็นพ่นทรายและตำแหน่งพัดลมดูดอากาศในห้องพ่นทรายเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณฝุ่นทรายที่พัดลมสามารถดูดออกไปได้

วิเคราะห์การกระจายตัวของฝุ่นและปริมาณฝุ่นที่พัดลมสามารถดูดออกได้ (ก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง) โดยหลังปรับปรุงทางผู้วิจัยได้ดำเนินการเพิ่มช่องเปิดขนาด 0.65×0.46 เมตร เพื่อเป็นช่องเติมอากาศเข้าระบบ

ก่อนปรับปรุง กำหนดขนาดของห้องพ่นที่ $4.1 \times 4.8 \times 5$ เมตร (อ้างอิงตามพื้นที่จริง), ความเร็วลมทางเข้าท่อดูดที่ 2.0 เมตรวินาที จำนวน 1 เครื่อง, หัวพ่นทราย 1 หัว มีขนาดความดันของหัว Nozzle 5 bar, ตำแหน่งทางเข้าลมช่องใต้ประตูขนาด 1×0.3 เมตร

หลังปรับปรุง กำหนดขนาดของห้องพ่นที่ $4.1 \times 4.8 \times 5$ เมตร (อ้างอิงตามพื้นที่จริง), ความเร็วลมทางเข้าท่อดูดที่ 3.1 เมตรวินาที จำนวน 1 เครื่อง, หัวพ่นทราย 1 หัว มีขนาดความดันของหัว Nozzle 5 bar, ตำแหน่งทางเข้าลมช่องใต้ประตูขนาด 1×0.3 เมตร, ตำแหน่งช่องเปิดกลางประตูขนาด 0.65×0.46 เมตร ผลการวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นที่พัดลมสามารถดูดออกได้

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Solidworks เปรียบเทียบตำแหน่งพัดลมดูดอากาศ, มุมป็นพ่นทราย และปริมาณฝุ่นที่พัดลมสามารถดูดออกได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าหลังปรับปรุงพัดลมระบายอากาศสามารถดูดฝุ่นได้เพิ่มขึ้น แสดงผลตาม Table 2

เมื่อพิจารณาจากปริมาณฝุ่นที่พัดลมดูดอากาศสามารถดูดได้แต่ละตำแหน่งพบว่า ตำแหน่งพัดลมดูดอากาศปัจจุบันมีผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าพอใจทางผู้วิจัยจึงดำเนินการเพิ่มเฉพาะช่องเปิดกลางประตูไม่ได้มีการย้ายตำแหน่งพัดลมดูดอากาศ โดยปริมาณฝุ่นที่พัดลมดูดอากาศตำแหน่งที่ 2 (ตำแหน่งปัจจุบัน) สามารถดูดได้เทียบและลักษณะการฟุ้งกระจายของฝุ่นขนาดไม่เกิน 10, 125 ไมครอน ตาม Table 3 และ 4 และรูปภาพ (Fig. 9) ตามลำดับ

Table 2 The result is analyzed and compared with the amount of dust that the exhaust fan can absorb. Before and after improving the ventilation system

Exhaust fan position	1			2			3			4			5			6																				
Sandblasting angle	0	25	45	0	25	45	0	25	45	0	25	45	0	25	45	0	25	45																		
Silicon carbide dust size (microns)	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125	10	125												
Before improvement, the amount of dust that can be absorbed (%)	51	0	35	0	75	0	29	0	30	0	99	0	73	0	55	0	69	0	36	0	51	0	50	0	72	0	99	0	100	22	41	0	46	0	70	0
After improvement, the amount of dust that can be absorbed (%)	95	0	100	0	100	0	92	0	97	0	99	99	100	0	97	0	100	0	90	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	99	100	0	100	0	100	0

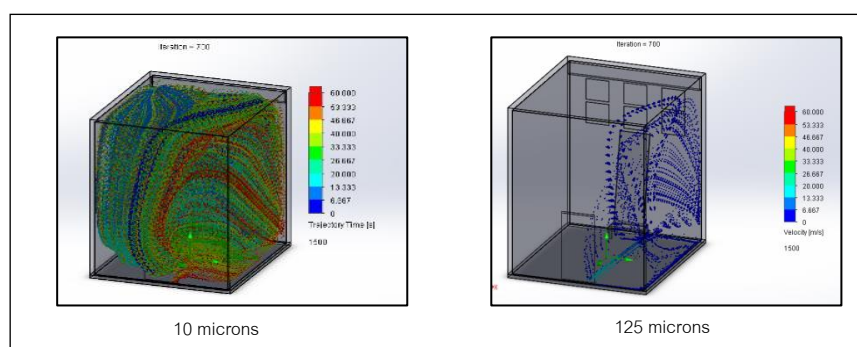
Table 3 Dust size is not more than 10 microns, analysis results after 60 seconds, exhaust fan position 2

Sand Blasting Room	Sandblasting angle compared to the amount of dust that the fan can absorb (unit %)			Average amount of dust extracted by the fan (unit %)
	0	25	45	
Before improvement	29	30	99	53
After improvement	92	97	99	96

Table 4 Dust size is not more than 125 microns, analysis results after 60 seconds, exhaust fan position 2

Sand Blasting Room	Sandblasting angle compared to the amount of dust that the fan can absorb (unit %)			Average amount of dust extracted by the fan (unit %)
	0	25	45	
Before improvement	0	0	0	0
After improvement	0	0	99	33

* The 60-second interval was the time when the dust was scattered throughout the sandblasting room, the 2nd position of the exhaust fan is the current position.

**Fig. 9** Dust size no more than 10 and 125 microns, Analysis results after 60 seconds

สรุป

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SOLIDWORK ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองการระบายพบว่า ภายในห้องพ่นทราย ก่อนทำการปรับปรุงนั้นมีการฟุ้งกระจายของฝุ่นจำนวนมาก อีกทั้งยังพบว่าภายในห้องพ่นทรายไม่มีจุดเติมอากาศเข้าด้วย สาเหตุนี้จึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้พัดลมดูดอากาศไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SOLIDWORK โดยการวัดปริมาณฝุ่นที่พัดลมดูดอากาศสามารถดูดได้เพิ่มขึ้น 43% สำหรับฝุ่นขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนและเพิ่มขึ้น 33% สำหรับฝุ่นขนาดไม่เกิน 125 ไมครอน

ทั้งนี้ที่พัดลมดูดอากาศไม่สามารถดูดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 125 ไมครอนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพนั้น เนื่องจากฝุ่นขนาดไม่เกิน 125 ไมครอน มีน้ำหนักที่มากโดยเมื่อเม็ดทรายถูกยิงออกจากปืนพ่นไปกระทบกับชิ้นงานจะเกิดการฟุ้งกระจายจากนั้นจะแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศระยะเวลาสั้นๆและร่วงหล่นลงมากองที่พื้น อีกทั้งมุมมองสาของปืนพ่นทราย ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณฝุ่นที่พัดลมสามารถดูดออกไปได้เพราะในมุมราบที่ 0 องศาและมุมก้มที่ 25 องศา

ทิศทางของฝุ่นทรายเมื่อกระทบกับชิ้นงานจะร่วงลงไปกองที่พื้นแทบในทันที ซึ่งต่างจากฝุ่นขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ที่มีน้ำหนักเบาที่จะม้วนตัวขึ้นไปแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศและถูกดูดออกไปในเวลาต่อมา ส่วนมุมเงยที่ 45 องศา ด้วยทิศทางดังกล่าวเมื่อฝุ่นทรายกระทบกับชิ้นงานแล้วนั้นจะกระจายตัวไปบริเวณด้านบนซึ่งเป็นตำแหน่งของพัดลมดูดอากาศ ปริมาณฝุ่นที่ดูดได้มูมนี้นี้จึงมีมากกว่ามูมนอื่นและทั้งหมดนี้คือสาเหตุที่ส่งผลต่อปริมาณฝุ่นที่พัดลมดูดอากาศสามารถดูดได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะผู้บริหารบริษัทกลุ่มเกษมการค้า จำกัด ที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่ห้องปฏิบัติการและอำนวยความสะดวกในการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

คณะทำงานแนวทางการป้องกันควบคุมโรคปอดฝุ่นหิน. 2560. แนวทางการเฝ้าระวัง ป้องกัน ควบคุมโรคปอดฝุ่นหิน (Silicosis). สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9 นครราชสีมา. กรมควบคุมโรค, กระทรวงสาธารณสุข

จิรายุ บุญตัน. 2554. การควบคุมการแพร่กระจายเชื้อโรคทางอากาศด้วยระบบระบายอากาศในห้องตรวจรักษาโรค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาวิตรี ติตตานนท์. 2558. การศึกษาผลกระทบด้านความปลอดภัยของกระบวนการพ่นทราย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุนทรี พักเย็น. 2558. การออกแบบระบบระบายอากาศเพื่อกำจัดฝุ่น: กรณีศึกษาการระบายอากาศสำหรับขั้นตอนการเตรียมผ้าของโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนุชา ฉิดเชิด. การปรับปรุงวิธีควบคุมอนุภาคในโรงพ่นทรายแบบเคลื่อนย้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

American Conference of Governmental Industrial Hygienist (ACGIH) TLV-TWA

Safe Work Australia is an Australian Government. 2012. Abrasive blasting.

https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/abrasive_blasting2.pdf, 1 January 2021

The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 1994. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) Particulates Not Otherwise Regulated, Total (Method: 0500)

The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 1994. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) Particulates Not Otherwise Regulated, Total (Method: 0600)

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความหนาบางของบรรจุภัณฑ์แก้วในกระบวนการขึ้นรูป

Design of experiment to study the factors affecting glass container thinness in forming process

สราวุฒิ กุลบุตร*, ประไพศรี สุทัศน์ ณ ออยุธยา, สุวิษภรณ์ วิชกุล

Sarawut Kullaboot*, Prapaisri Sudasna-Na-Ayudhya, Suwitchaporn Witchakul

สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Graduate Program in Engineering Management, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Sarawut.kull@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้เป็นการศึกษาปัญหาด้านคุณภาพของบริษัทผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วพบว่าผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเกลือแร่ขนาด 250 มิลลิลิตร มีข้อบกพร่องประเภทความหนาบางสูงที่สุดถึง 0.45% ของจำนวนขวดทั้งหมดที่ผลิตได้จึงทำการออกแบบการทดลองแบบ Box Behnken Design เพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องและกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ซึ่งปัจจัยประกอบไปด้วย อุณหภูมิแบบลงซีโมลด์ ความเร็วก้อนแก้ว อุณหภูมิก้อนแก้ว จากนั้นใช้วิธี Response Surface Methodology ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิแบบลงซีโมลด์ที่ 1 °C ความเร็วก้อนแก้วที่ 7.33 m/s และอุณหภูมิก้อนแก้วที่ 1,190 °C จากการผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการทดลอง พบว่าสามารถลดข้อบกพร่องประเภทความหนาบางเหลือเพียง 0.21% ของจำนวนขวดทั้งหมดที่ผลิตได้

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง, ความหนาบาง, บรรจุภัณฑ์แก้ว

Abstract

This Independent Study aims to examine the problem of glass product quality. The study result found that the thickness of glass bottles represents the highest defect of 250 ml. The percentage of bottles produced with defects accounts for 0.45% of total produced bottles. Therefore, Box Behnken Design was utilized to investigate the predicted factors affecting the thickness occurrence and determine the optimal value. The temperature of a blank mold, the speed of gobs, and the temperature of gobs. Another process of this study was Response Surface Methodology to analyze the study results. The results reveal that the appropriate level of these factors is 1 °C of the blank mold temperature, 7.33 m/s of the gob speed, and 1,190 °C of the gob temperature the actual production was processed, and it showed that the thickness of the glass bottle reduced to 0.21% of the total produced bottles.

Keywords: Design of experiments, Glass container, Thinness

คำนำ

ในปัจจุบันสภาวะการแข่งขันในเชิงธุรกิจบรรจุกภัณฑ์แก้วค่อนข้างสูง จะเห็นได้จากการเพิ่มกำลังการผลิตไม่ว่าจะเป็นการลงทุนเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตภายในโรงงานของบริษัทคู่แข่งหรือการขยายโรงงานหรือการก่อตั้งของบริษัทใหม่ ๆ ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ทำให้กลุ่มลูกค้ามีทางเลือกที่หลากหลายนอกจากนั้นบรรจุกภัณฑ์แก้วยังสามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งจากสาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดการแข่งขันทางด้านราคา และโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านคุณภาพองค์กรจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในด้านนี้นอกจากนั้นเพื่อความอยู่รอดในธุรกิจบรรจุกภัณฑ์แก้ว องค์กรจะต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงในการเพิ่มประสิทธิภาพลูกค้า นั่นคือ การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดจำนวนข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเพื่อให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า (ศูนย์ฝึกอบรมเทคนิคการผลิตขวดแก้ว, 2554)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบมิลลิเมตรแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ GRT – Groupe Rondot Thailand รุ่น Handy V
2. เครื่องมือวัดความเร็วก้อนแก้วแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ GRT – Groupe Rondot Thailand รุ่น Speed Gob +
3. ก้อนแก้ว (Gob), แบบพิมพ์ขวด, เครื่องจักร (IS Machine) ยี่ห้อ Emhart
4. เตาอบขวด
5. เครื่องตรวจสอบความหนาบางของขวด Online Thinness
6. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
7. โปรแกรมมินิแทป เวอร์ชัน 2019

วิธีการดำเนินการ (ภัสราภรณ์, 2563)

1. ศึกษากระบวนการผลิตและเลือกปัญหาที่ทำให้เกิดความสูญเสียมากที่สุดมาทำการศึกษา จากการศึกษากระบวนการผลิตบรรจุกภัณฑ์แก้วแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอนคือ ผสมวัตถุดิบ หลอม ขึ้นรูป อบขวด ตรวจสอบคุณภาพ บรรจุก ซึ่งส่วนที่ทำการศึกษาและทำการทดลองในครั้งนี้อยู่ในขั้นตอนของการขึ้นรูป
2. กำหนดตัวแปรตอบสนอง โดยกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง โดยเลือกใช้เครื่องมือ Why-Why Analysis ในการวิเคราะห์ปัญหา
4. เลือกระดับของแต่ละปัจจัย โดยปัจจัยที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคืออุณหภูมิแบบมิลลิเมตรที่ 15 °C ความเร็วก้อนแก้วที่ 7.49m/s และอุณหภูมิก้อนแก้วที่ 1,210.5 °C
5. ตั้งสมมติฐานการทดลองสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทความหนาบางของบรรจุกภัณฑ์
6. ออกแบบการทดลองและทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล โดยเลือกใช้วิธี Box-Behnken Design (BBD)
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง
8. ยืนยันผลการทดลอง
9. สรุปผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. จากการศึกษากระบวนการผลิตและเลือกปัญหาที่ทำให้เกิดความสูญเสียมากที่สุดมาทำการศึกษาโดยโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว มี 1 เตาลอม 2 สายการผลิตและกำลังการผลิตอยู่ที่ 180 ตัน/วัน ผลิตขวดเครื่องดื่มเกลือแร่ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งจากการตรวจสอบข้อมูลพบว่าเกิดข้อบกพร่องประเภทความหนาบางที่ขั้นตอนการขึ้นรูปมากที่สุด

2. กำหนดตัวแปรตอบสนอง ตัวแปรตอบสนองที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เปอร์เซ็นต์ของขวดเสียประเภทความหนาบางของบรรจุภัณฑ์แก้วชนิดเครื่องดื่มเกลือแร่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยมาตรฐานของความหนาบางของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ไม่สามารถยอมรับได้คือ ≤ 1.2 มิลลิเมตร

3. คัดเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง จากการระดมความคิดเห็นร่วมกันกับหน่วยงานผลิตและหน่วยงานอื่นๆที่เกี่ยวข้องในโรงงาน ซึ่งเป็นผู้ที่มีประสบการณ์และผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการผลิตรวมถึงอ้างอิงหลักการเกิดข้อบกพร่องประเภทความหนาบางที่ทางบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักรได้แนะนำไว้โดยใช้เครื่องมือ Why-Why Analysis ในการช่วยวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ว่าข้อบกพร่องประเภทความหนาบาง (Thinness) เกิดจาก 3 ปัจจัยหลัก คือ ผลต่างอุณหภูมิแบบลงคโมลด์, อุณหภูมิก้อนแก้ว, ความเร็วของก้อนแก้ว

4. เลือกระดับของแต่ละปัจจัย โดยพิจารณาจากข้อมูลบันทึกพารามิเตอร์การขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ (Job Card) เครื่องดื่มเกลือแร่ขนาด 250 มิลลิลิตร ย้อนหลัง 12 เดือน (มกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2563) ร่วมกับผู้มีประสบการณ์และผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการขึ้นรูป รวมถึงอ้างอิงตามคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ซึ่งได้มีข้อตกลงร่วมกันให้ทำการศึกษาระดับของแต่ละปัจจัยดัง Table 1

Table 1 Factors and levels of each factor used in the experimental design.

Factor	Average (\bar{x}) of the current factor level	Level	
		low (-)	high (+)
A: Blank Mold Temperature Difference ($^{\circ}$ C)	15	1	29
B: Speed Gob (m/s)	7.49	7.13	7.85
C: Temperature Gob ($^{\circ}$ C)	1210.5	1188	1233

5. ตั้งสมมติฐานการทดลองสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของบรรจุภัณฑ์ประเภทความหนาบาง สมมติฐานหลัก (H_0) คือ ปัจจัยที่ระดับต่างๆไม่มีผลต่อจำนวนข้อบกพร่องประเภทความหนาบางของบรรจุภัณฑ์แก้วชนิดเครื่องดื่มเกลือแร่ขนาด 250ml, สมมติฐานรอง (H_1) คือ ปัจจัยที่ระดับต่างๆมีผลต่อจำนวนข้อบกพร่องประเภทความหนาบางของบรรจุภัณฑ์แก้วชนิดเครื่องดื่มเกลือแร่ขนาด 250ml โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดลองสมมติฐานที่ 0.05

6. การออกแบบการทดลองและทดลองเพื่อเก็บข้อมูล โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Box-Behnken Design (BBD) ในการออกแบบการทดลองเนื่องจากสามารถลดรูปการทดลองได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการ Central Composite Design (CCD) โดยพิจารณาจากจำนวนตัวแปร 3 ปัจจัยๆละ 3 ระดับจึงเหมาะสมที่สุดที่จะเลือกใช้วิธีนี้มาทำการทดลองโดยจากการรันโปรแกรม Minitab 19 มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง โดยจะผลิตขวดประมาณ 400 ขวดต่อการทดลองซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ดังแสดงดัง Fig.1 และ Table 2 และแสดงผลการทดลองดัง Table 3

Box-Behnken Design

Design Summary

Factors:	3	Replicates:	1
Base runs:	15	Total runs:	15
Base blocks:	1	Total blocks:	1
Center points:	3		

Fig. 1 Details of the trial plan from the program Minitab Version 19

Table 2 Box-Behnken Design (BBD) experimental plan for the determination of the number of bottles of Glass packaging

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	A (°C)	B (m/s)	C (°C)
1	1	2	1	1	7.13	1210.5
2	8	2	1	29	7.13	1210.5
3	5	2	1	1	7.85	1210.5
4	9	2	1	29	7.85	1210.5
5	15	2	1	1	7.49	1188.0
6	3	2	1	29	7.49	1188.0
7	6	2	1	1	7.49	1233.0
8	13	2	1	29	7.49	1233.0
9	7	2	1	15	7.13	1188.0
10	4	2	1	15	7.85	1188.0
11	11	2	1	15	7.13	1233.0
12	2	2	1	15	7.85	1233.0
13	14	0	1	15	7.49	1210.5
14	10	0	1	15	7.49	1210.5
15	12	0	1	15	7.49	1210.5

Table 3 Results show the number of bottles of glass containers.

StdOrder	A (°C)	B (m/s)	C (°C)	Result (percent of broken bottles)
1	1	7.13	1210.5	0.00
2	29	7.13	1210.5	0.25
3	1	7.85	1210.5	0.25
4	29	7.85	1210.5	0.25
5	1	7.49	1188.0	0.00
6	29	7.49	1188.0	0.25
7	1	7.49	1233.0	1.48
8	29	7.49	1233.0	1.97
9	15	7.13	1188.0	0.00
10	15	7.85	1188.0	0.25
11	15	7.13	1233.0	1.23
12	15	7.85	1233.0	1.48
13	15	7.49	1210.5	0.74
14	15	7.49	1210.5	0.99
15	15	7.49	1210.5	1.23

7. การวิเคราะห์ผลการทดลองจาก Table 3 สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมมินิแทปมาช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังนี้

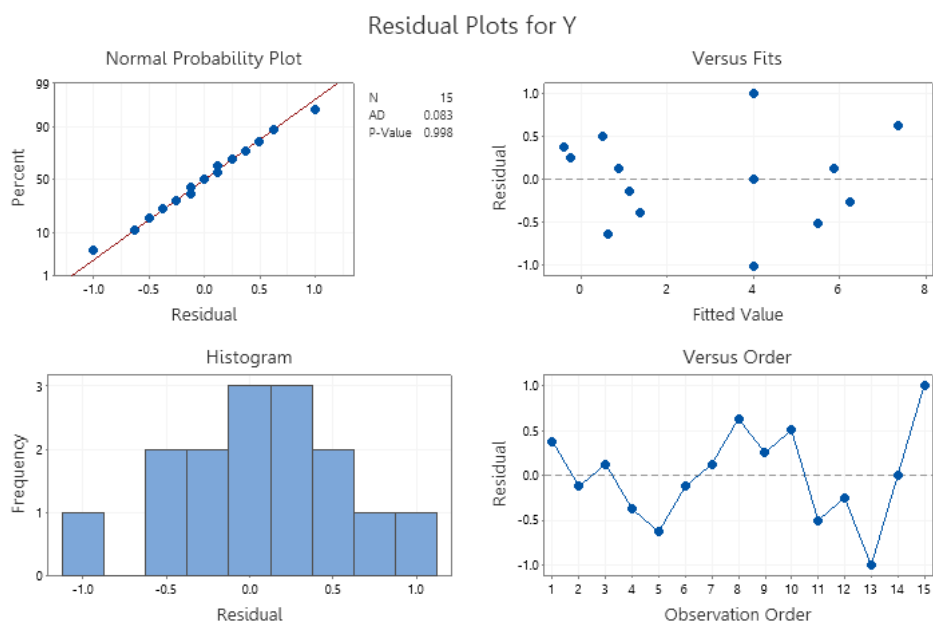


Fig. 2 Probability with normal distribution and showing the relationship of error and predictive values of response variables.

จาก Fig. 2 แสดงกราฟ Normal Probability Plot พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงและมีค่า $p = 0.998$ ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ Histogram ที่เป็น Normal หรือมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ และจากกราฟ Residual Versus Fitted Value พบว่าความแปรปรวนของค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างค่าศูนย์และกราฟ Residual Versus Observation Order พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใด ๆ จึงสรุปได้ว่าค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ และทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 89.33% ซึ่งมีค่าสูง (ค่ายิ่งมากสมการยิ่งมีความเหมาะสมมาก) จึงอธิบายได้ว่าแต่ละปัจจัยในการทดลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ถึง 89.33% และการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-fit) มีค่าเท่ากับ 0.681 ซึ่งมากกว่าค่านัยสำคัญแสดงดัง Fig. 3 แสดงว่าสมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 เพียงพอแล้วแสดงตาม Equation 1

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	S-Value	P-Value
Model	9	94.46500	10.5167	14.02	0.005
Linear	3	69.2500	23.0833	30.78	0.001
A	1	2.0000	2.0000	2.67	0.163
B	1	1.1250	1.1250	1.50	0.275
C	1	66.1250	66.1250	88.17	0.000
Square	3	24.9000	8.3000	11.07	0.012
A*A	1	5.7692	5.7692	7.69	0.039
B*B	1	14.7692	14.7692	19.69	0.007
C*C	1	3.6923	3.6923	4.92	0.077
2-Way Interaction	3	0.5000	0.1667	0.22	0.877
A*B	1	0.2500	0.2500	0.33	0.589
A*C	1	0.2500	0.2500	0.33	0.589
B*C	1	0.0000	0.0000	0.00	1.000
Error	5	3.7500	0.7500		
Lack-of-Fit	3	1.7500	0.5833	0.58	0.681
Pure Error	2	2.0000	1.0000		
Total	14	98.4000			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.866025	96.19%	89.33%	66.97%

Fig. 3 Model summary and analysis of variance

Regression Equation in Uncorded Units

$$Y = 1877 - 0.36 A + 233.0 B - 4.67 C - 0.00638 A*A - 15.43 B*B + 0.001975 C*C - 0.0496 A*B + 0.00079 A*C + 0.0000 B*C \quad (1)$$

จากนั้นทำการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองซึ่งเลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยที่ทำการทดลองดังแสดงดัง Fig. 4

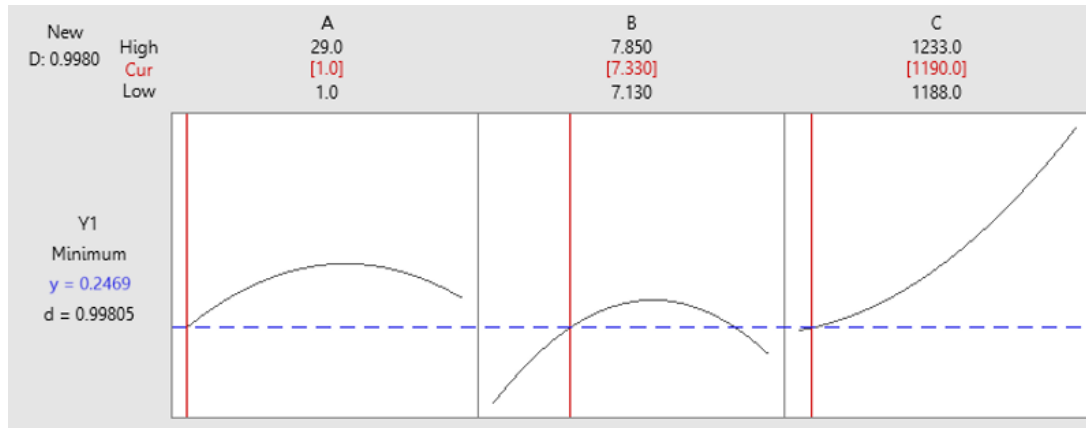


Fig. 4 Response Optimizer

จาก Fig. 4 พบว่าระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดที่ทำให้จำนวนขวดที่เกิดข้อบกพร่องประเภทความหนาบางน้อยที่สุดคือ ผลต่างของอุณหภูมิแบบลงคโมลด์เท่ากับ 1 °C ความเร็วของก้อนแก้วเท่ากับ 7.33 m/s และอุณหภูมิก้อนแก้วเท่ากับ 1190 °C ส่งผลให้ค่าความพึงพอใจของค่าตอบสนอง (Composite Desirability) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.99805 (99.805%) เกิดข้อบกพร่องประเภทความหนาบางเพียง 0.2469%

8. ยืนยันผลการทดลอง จากการวิเคราะห์ Response Optimizer ไปใช้ในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วจริง เพื่อยืนยันว่าข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปเป็นข้อมูลมาตรฐานอ้างอิงในการปฏิบัติงานและเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตขวดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ โดยทำการปรับพารามิเตอร์ตามระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดคือ ผลต่างของอุณหภูมิแบบลงคโมลด์เท่ากับ 1 °C ความเร็วของก้อนแก้วเท่ากับ 7.33m/s และอุณหภูมิก้อนแก้วเท่ากับ 1190 °C โดยทำการผลิตขวดประมาณ 400 ขวดต่อการทดลอง และทำการทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 31 วันพบว่าข้อบกพร่องลดลงเฉลี่ยเหลือเพียง 0.21% จากการเปรียบเทียบจำนวนข้อบกพร่องและมูลค่าความเสียหายก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยต่อเดือน พบว่าสัดส่วนของข้อบกพร่องประเภทความหนาบางก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 0.45% และหลังการปรับปรุงเท่ากับ 0.21% เท่านั้น ซึ่งสามารถลดข้อบกพร่องลงได้ถึง 53.33% และในด้านความเสียหายก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 155,228 บาท/เดือน หลังการปรับปรุงลดลงเหลือเพียง 74,903 บาท/เดือน ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ประมาณ 80,325 บาท/เดือน คิดเป็นสัดส่วนมูลค่าความเสียหายลดลงถึง 51.75% ดังแสดง Table 4

Table 4 Average number of defects and damage value before and after improvements per month

Details	Before	After	Difference
Total number of bottles produced (bottles/month)	17,580,320	18,085,920	-
<u>Thinness type defect</u>			
Number of quality bottles (bottles/month)	78,398	37,830	51.75
Proportion of defect bottles (%)	0.45	0.21	53.33
Cost (Baht/Month)	155,228	74,903	51.75
<u>Other type defect</u>			
Number of quality bottles (bottles/month)	1,140,963	971,610	14.84
Proportion of defect bottles (%)	6.49	5.37	17.26
Cost (Baht/Month)	2,259,106	1,923,788	14.84

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทความหนาบาง และหา ระดับปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดทางคุณภาพ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) ในการออกแบบการทดลองในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อข้อบกพร่องประเภทความหนาบาง และใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการทดลอง และผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยกำหนดปัจจัย คือ ผลต่างของอุณหภูมิแบบลงคโมลด์ที่ระดับต่ำ (-) = 1 และระดับสูง (+) = 29 °C และ ความเร็วก้อนแก้วระดับต่ำ (-) = 7.13 และระดับสูง (+) = 7.85m/s และ อุณหภูมิก้อนแก้วระดับต่ำ (-) = 1210 และระดับสูง (+) = 1233 °C โดยทำการผลิตขวดประมาณ 400 ขวดต่อการทดลอง ซึ่งหลังจากได้ทำการทดลองสรุปได้ว่า ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือ ผลต่างของอุณหภูมิแบบลงคโมลด์เท่ากับ 1 °C ความเร็วของก้อนแก้วเท่ากับ 7.33m/s อุณหภูมิก้อนแก้วเท่ากับ 1190 °C จะทำให้เกิดข้อบกพร่องประเภทความหนาบางน้อยที่สุดเมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์การทดลองไปใช้มาตรการควบคุมการผลิตจริงพบว่าสัดส่วนข้อบกพร่องประเภทความหนาบางก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 0.45% และหลังการปรับปรุงลดลงเหลือเพียง 0.21% เท่านั้น ซึ่งสามารถลดสัดส่วนของข้อบกพร่องประเภทความหนาบางลงได้ถึง 53.33% ซึ่งสามารถลดสัดส่วนข้อบกพร่องลงได้จริง

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้ สำเร็จลงได้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิภรณ์ วิษณุ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่อบรมให้ความรู้ให้คำแนะนำและ คำปรึกษาแนวทางในการพัฒนางานวิจัยตลอดจนตรวจทานการเขียนรายงานฉบับนี้จนสำเร็จลงได้ด้วยดี รวมทั้ง ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ไอลดา ตริรัตน์ตระกูล ประธานโครงการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาคพิเศษ ที่กรุณาให้ความดูแลช่วยเหลือในโครงการทุกคน และให้ความกรุณาตรวจสอบการแก้ไขรายงานการศึกษาค้นคว้าอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ภัศราภรณ์ ลำเจียกทอง. 2563: การออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของบรรจุภัณฑ์แก้ว กรณีศึกษาโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว. การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์ฝึกอบรมเทคนิคการผลิตขวดแก้ว. 2554. กระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว.

http://www.thaiglass.co.th/en/technical_training_center.php, 1 เมษายน พ.ศ. 2563

ผลของสารไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์และสารยืดต่อสายโซ่โพลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเลต
Effect of dicumyl peroxide and chain extender on mechanical properties and molecular weight of Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate terephthalate) blends

สาริษฐ์ สุวัฒน์จรรยา*, ธีระศักดิ์ หมากพิน, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

Sarit Sukwattanajaron*, Teerasak Markpin, Ekachai Wimolmala, Narongrit Sombatsompop

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) หลักสูตรเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, Materials Technology Program, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thungkru, Bangkok 10140, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: view_280438@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมสารไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์และสารยืดต่อสายโซ่โพลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเลตในอัตราส่วน 100/0, 80/20 และ 60/40 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเลตเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าการยืดตัว ความเหนียวดึง และการรับแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น การเติมสารไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลทั้งการรับแรงดึงและการรับแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การเติมสารยืดต่อสายโซ่โพลิเมอร์ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าการยืดตัว ความเหนียวดึง และการรับแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์, พอลิแลคติกแอซิด, พอลิเมอร์ผสม, สารยืดต่อสายโซ่โพลิเมอร์

Abstract

This study aimed to investigate the effects of dicumyl peroxide (DCP) and chain extender on mechanical properties and molecular weight of poly(lactic acid) (PLA)/poly(butylene adipate terephthalate) (PBAT) blends. The PLA/PBAT blends ratio were varied at 100/0, 80/20 and 60/40 by weight percent. The results showed that the addition of PBAT in PLA was found to decrease the tensile modulus and tensile strength of PLA/PBAT blends, but increase the elongation at break, tensile toughness and impact property of PLA/PBAT blends. The addition of DCP on PLA/PBAT blends was found to increase the molecular weight of PLA/PBAT blends, but decrease the tensile and impact properties. The addition of chain extender on PLA/PBAT blends was found to increase the molecular weight, elongation at break, tensile toughness and impact property of PLA/PBAT blends, but decrease the tensile modulus and tensile strength of PLA/PBAT blends.

Keywords: Chain extender, Dicumyl peroxide, Poly(lactic acid), Polymer blends

คำนำ

ในปัจจุบันการนำวัสดุประเภทพลาสติกมาใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพลาสติกสามารถขึ้นรูปให้มีรูปร่างได้ตามที่ต้องการ ด้วยกระบวนการผลิตได้หลากหลายวิธี และสามารถผลิตได้ต่อเนื่องในปริมาณมาก มีน้ำหนักเบาสามารถขนย้ายได้สะดวก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทโลหะ หรือเซรามิก ทำให้มีการนำพลาสติกใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ต่างๆ โดยพลาสติกส่วนใหญ่ที่ใช้ในชีวิตประจำวันเป็นประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Single-use Plastic) จึงมีอายุการใช้งานสั้นแต่ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายในธรรมชาติเป็นระยะเวลา นานมาก จึงส่งผลทำให้ทั่วโลกประสบปัญหามลพิษจากขยะพลาสติก พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ มีสมบัติทางด้านความแข็งแรงสูงจึงมีการนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น การใช้งาน PLA ในงานที่ต้องการสมบัติความยืดตัวสูงมีข้อจำกัด เนื่องจาก PLA มีความเปราะ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงความสามารถในการยืดตัว โดยการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเลต (Polybutylene adipate terephthalate; PBAT) (Teamsinsungvon et al., 2012) แต่พบว่าในการผสมพอลิเมอร์ต่างชนิดกันทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง จึงมีการพัฒนาเพื่อทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยใช้สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ร่วมด้วย เช่น สารไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (Ma et al., 2014) หรือสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล (Xin et al., 2018) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาสมบัติเชิงกลและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเลต ด้วยสารไดควิมิวเปอร์ออกไซด์กับสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล โดยปรับเปลี่ยนปริมาณและศึกษากลไกการทำงานของสารเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรง และความยืดตัวสำหรับการใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

พอลิแลคติกแอซิด (PLA, NatureWorks LLC / Ingeo™ Biopolymer 2003D), พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเลต (PBAT, ecoflex / ecoflex F Blend C1200), สารไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP, Kij Paiboon Chemical Ltd. Thailand) สารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล (ADR, BASF / Joncryl ADR 4468)

การผสม ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม และการเติมสารเติมแต่ง

การผสมพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเลต อัตราผสม 100/0, 80/20 และ 60/40 ของ PLA/PBAT โดยน้ำหนัก การเติมสารไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 0.1, 0.2 และ 0.3 pph ส่วนการเติมสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล ใช้ที่ปริมาณ 1, 2 และ 3 pph ทำการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น CTW 1000 C บริษัท Haake Rheomax จำกัด ประเทศเยอรมนี อุณหภูมิในการผสม เริ่มจากบริเวณ Feed zone ถึง Die zone ที่ 160, 165, 170 และ 175 °C ตามลำดับ ความเร็วรอบการผสมที่ 40 รอบต่อนาที ทำการตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ได้ขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ (Injection molding, TR80EH2 type 80; Sodick Plustech Co., Ltd, Japan) อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปจากบริเวณ Feed zone ถึง Metering zone อยู่ที่ 150, 170, 195 และ 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การทดสอบสมบัติเชิงกล และน้ำหนักโมเลกุล

การทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านมอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง และความเหนียวจากการดึง ด้วยเครื่อง Universal testing machine (Autograph AG-I; Shimadzu, Japan) ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ตามมาตรฐาน ASTM D638-2014 นำชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10(2018) โดยเตรียมชิ้นงานให้มีรอยบากตรงกลางความยาว 2 มิลลิเมตร ทำมุม 45 องศา และทดสอบชิ้นงาน จำนวน 5 ชิ้น เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย และทำการทดสอบวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล และค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Gel Permeation Chromatography, GPC) การละลายพอลิเมอร์ใช้สาร Tetrahydrofuran ก่อนฉีดเข้าสู่คอลัมน์ในอัตรา 1mL/min ที่ 40 °C และใช้ในการเปรียบเทียบมาตรฐานเป็นพอลิสไตรีน

ผลและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทอเรพทาเลตในพอลิแลคติกแอซิด อัตราส่วนผสม 100/0, 80/20 และ 60/40 ของ PLA/PBAT พบว่าการผสม PBAT ในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) และความเหนียวดึง (Tensile toughness) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และมีสมบัติการยืดตัวสูงที่สุดส่วน 60/40 เนื่องจาก PBAT มีสมบัติทางด้านการยืดตัวสูง มีสมบัติคล้ายยาง เมื่อผสม PBAT ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง แต่สมบัติการยืดตัว และความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง Fig. 1

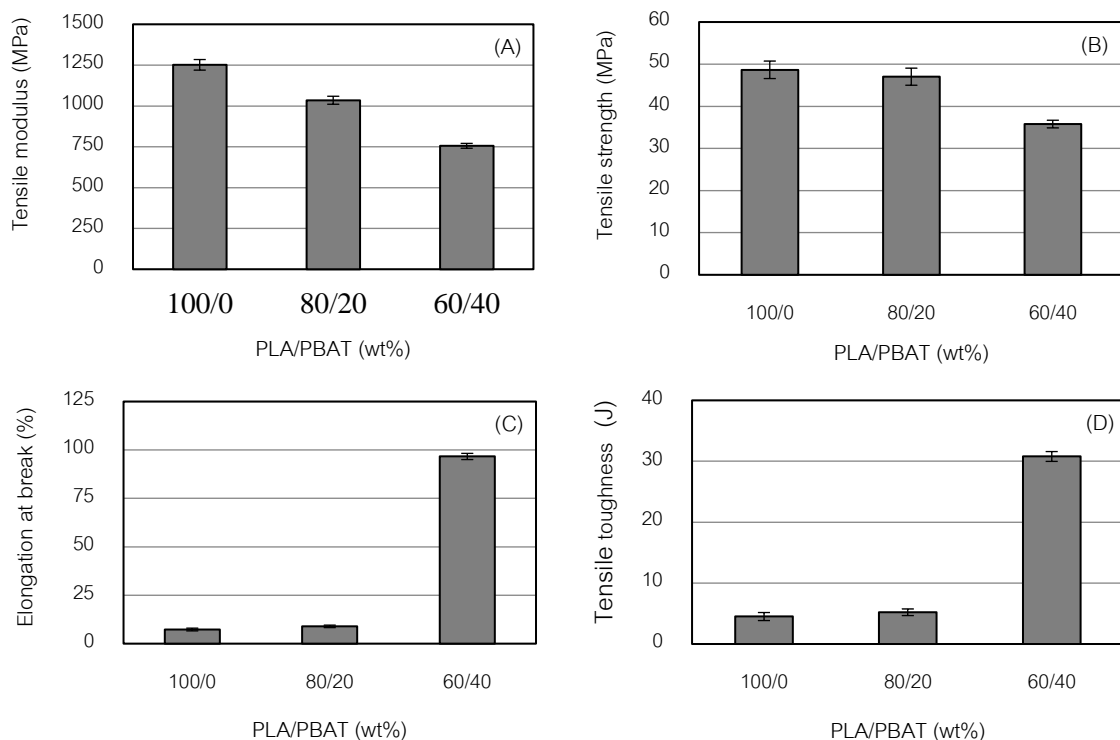


Fig. 1 Tensile properties of PLA/PBAT blends: (A) Tensile modulus (B) Tensile strength (C) Elongation at break (D) Tensile toughness

สำหรับการเติมสารไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม แสดงดัง Fig. 2 ผลการทดสอบพบว่า การเติม DCP ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ส่งผลทำให้ค่า Tensile modulus, Tensile strength, Elongation at break และ Tensile toughness มีค่าลดลงตามปริมาณการเติมของสารเติมแต่ง DCP ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการทำงานของสารเติมแต่ง DCP มีความสามารถในการแตกตัวเป็นสารอนุมูลอิสระ (Free radicals) โดยที่สารอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (Chain scission) แสดงดัง Fig. 3A-3B จึงทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีค่าลดลง จากสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สั้นลง ในอัตราส่วน 60/40 ของ PLA/PBAT มีสมบัติเชิงกลลดลงมากกว่าอัตราส่วน 80/20 ของ PLA/PBAT เนื่องจาก PBAT มีจุดหลอมเหลวต่ำ ส่งผลทำให้สารอนุมูลอิสระจับกับสายโซ่โมเลกุลของ PBAT ได้ง่ายและเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุล ทำให้สมบัติเชิงกลและความยืดหยุ่นของ PBAT ลดลง ตามปริมาณการเติม PBAT ที่เพิ่มขึ้น

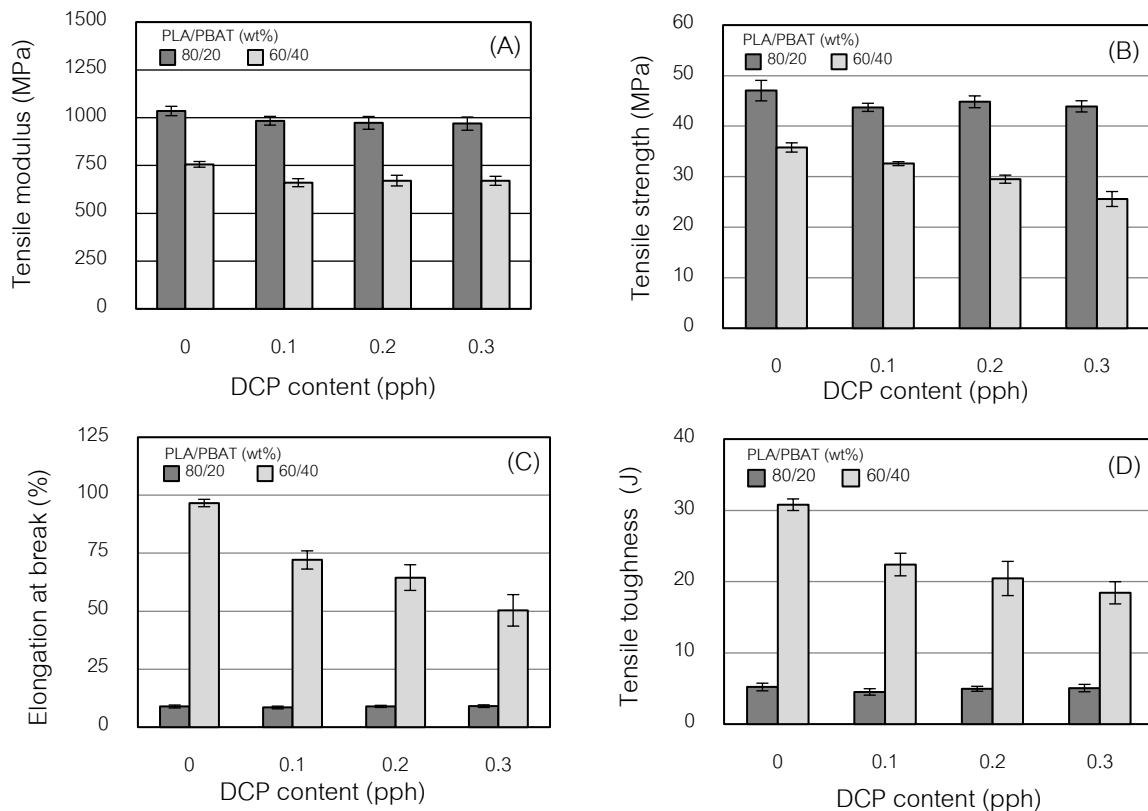


Fig. 2 Tensile properties of PLA/PBAT blends with DCP additive: (A) Tensile modulus (B) Tensile strength (C) Elongation at break (D) Tensile toughness

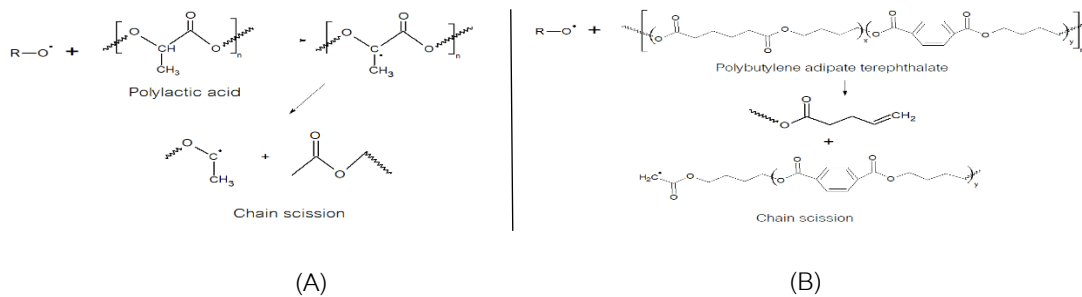


Fig. 3 Mechanism of DCP on polymer: (A) PLA and (B) PBAT

ในขณะที่การเติมสารเติมแต่ง ADR แสดงดัง Fig. 4 พบว่า สมบัติ Tensile modulus และ Tensile strength มีค่าลดลง แต่พบว่าสมบัติทางด้าน Elongation at break และ Tensile toughness มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมสารเติมแต่ง ADR ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเติมแต่ง ADR มีหมู่ epoxy ในโครงสร้างโมเลกุล ที่สามารถจับกับหมู่คาร์บอกซิลิก ทำให้เกิดความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT โดยกลไกของสารเติมแต่ง ADR เป็นตัวกลางในการจับตรึงสายโซ่โมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทอแรพทาเลต แสดงดัง Fig. 5 ทำให้พอลิเมอร์ผสมแสดงสมบัติความยืดหยุ่นของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น ในอัตราส่วน 60/40 ของ PBAT พบว่าค่า Elongation at break และ Tensile toughness เพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วน 80/20 ของ PBAT เนื่องจาก PBAT มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า PLA ทำให้สามารถจับกับสารเติมแต่ง ADR ได้เร็วกว่า ทำให้ Elongation at break และ Tensile toughness เพิ่มขึ้นสูง ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณของ ADR (3 pph) ในอัตราส่วน 60/40 ของ PLA/PBAT พบว่าค่า Elongation at break และ Tensile toughness มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ถูกต้องถี่กันมากขึ้น (Xin et al., 2018)

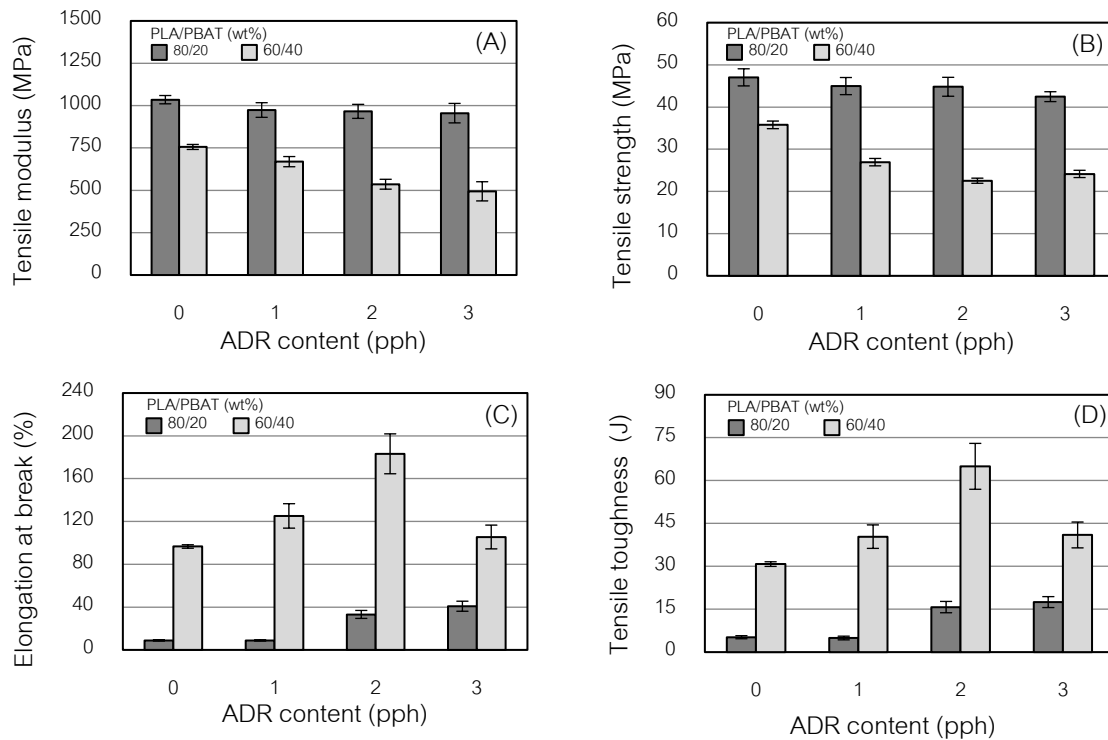


Fig. 4 Tensile properties of PLA/PBAT blends with ADR additive: (A) Tensile modulus (B) Tensile strength (C) Elongation at break (D) Tensile toughness

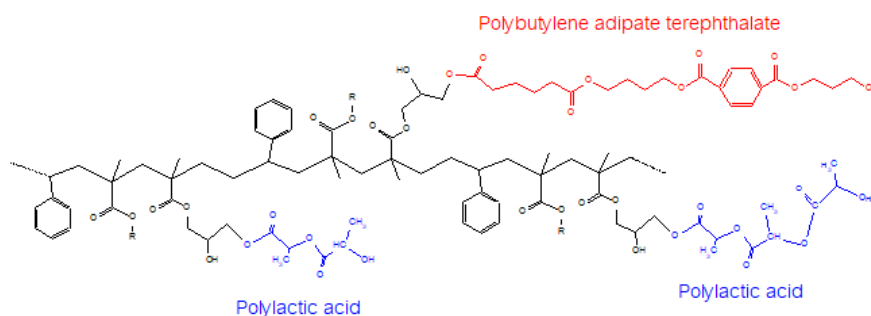
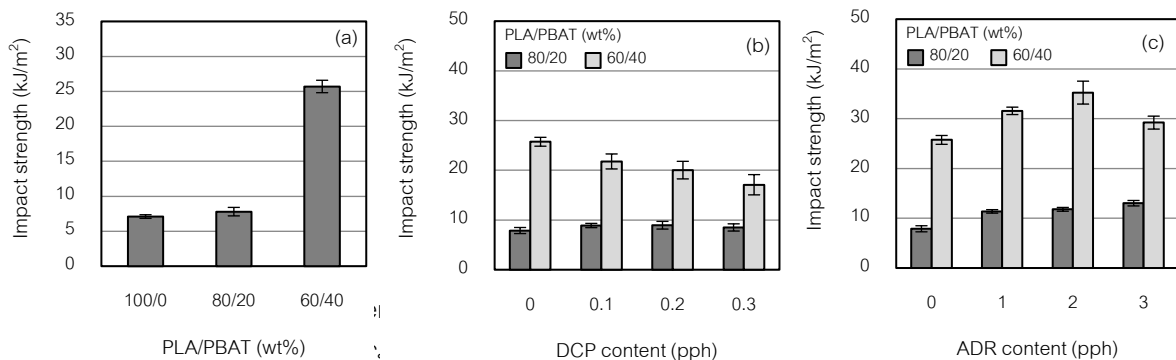


Fig. 5 Mechanism of PLA/PBAT blends

สำหรับการทดสอบสมบัติด้านการรับแรงกระแทก (Impact strength) พบว่าค่า Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น (สัดส่วนพอลิเมอร์ผสม 60/40) แสดงดัง Fig. 6A ทั้งนี้เนื่องจากการเติม PBAT ในปริมาณมาก ทำให้มีสมบัติยืดหยุ่นสูง จึงสามารถดูดซับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น ส่วนใน Fig. 6B เป็นการเติมสารเติมแต่ง DCP ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าความสามารถทนต่อแรงกระแทกในอัตราส่วน 60/40 ของ PLA/PBAT มีค่าลดลง เนื่องจาก PBAT มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้สารอนุมูลอิสระสามารถเข้าจับสายโซ่พอลิเมอร์ได้รวดเร็ว ทำให้เมื่อมีปริมาณ PBAT มากขึ้น เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลมากขึ้น ในขณะที่อัตราส่วน 80/20 ของ PLA/PBAT มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเฟสหลักยังมีสมบัติแข็งเปราะของ PLA จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ใน Fig. 6C การเติมสารเติมแต่ง ADR ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าสามารถทนต่อแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม ADR ที่มากขึ้น เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิกของ PLA และ PBAT สามารถจับกับหมู่ epoxy ของ ADR ทำให้เกิดความเข้ากันได้มากขึ้น ทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น ในขณะที่อัตราส่วน 60/40 ของ PLA/PBAT พบว่ามีค่าการทนต่อแรงกระแทกลดลง เนื่องจากการเชื่อมขวางที่มากเกินไป จึงส่งผลต่อความยืดหยุ่น และความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกลดลง



โมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (\bar{M}_w) และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (\bar{M}_n) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีค่าลดลง และมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (PDI) เพิ่มขึ้นเมื่อผสม PBAT ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในกระบวนการผสมพอลิเมอร์มีแรงเฉือนเกิดขึ้น ทำให้อุณหภูมิจนกระบวนการผสมทำให้ PBAT ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความยืดหยุ่นสูง เกิดกระบวนการ Degradation ทำให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (Srimalanon et al., 2018)

Table 1 Gel Permeation Chromatography (GPC) Testing of PLA/PBAT blends

Sample	\bar{M}_w (KDa)	\bar{M}_n (KDa)	PDI
PLA	155	100	1.54
PLA/PBAT (80/20, wt%)	110	62	1.77
PLA/PBAT (60/40, wt%)	110	51	2.15

ส่วน Table 2 พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT อัตราส่วน 80/20 และ 60/40 ที่ผ่านการเติม DCP และ ADR มีค่า \bar{M}_w เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม โดยกลไกการทำงานของ DCP เป็นการแตกตัวของสารอนุมูลอิสระจับบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ในขณะที่ผสม สารอนุมูลอิสระบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถจับตัวกันใหม่อีกครั้ง ดังแสดงใน Fig. 7 ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีน้ำหนักมากขึ้น \bar{M}_w มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่กลไกของ ADR เป็นตัวกลางในการจับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์โดยสามารถจับหมู่คาร์บอกซิลิกของ PLA และ PBAT ที่อยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีน้ำหนักมากขึ้น ค่า \bar{M}_w เพิ่มขึ้น ในส่วนของค่า \bar{M}_n สังเกตจากการ

เติมของ DCP ทั้งใน PLA/PBAT อัตราส่วน 80/20 และ 60/40 มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติม เนื่องจากกลไกการทำงานของ DCP ที่สามารถตัดสายโซ่โมเลกุล ส่งผลทำให้มีจำนวนของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีจำนวนมากขึ้น ทำให้ \bar{M}_n มีค่าลดลง ในขณะที่การเติม ADR สังเกตว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการทำงานของ ADR เป็นตัวกลางในการจับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ของ PLA และ PBAT ทำให้จำนวนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีจำนวนน้อยลง จึงส่งผลทำให้ค่า \bar{M}_n เพิ่มขึ้น และในส่วนของ PDI พบว่าในการเติม DCP ทั้งใน PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 และ 60/40 มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ และสารอนุมูลอิสระบนสายโซ่พอลิเมอร์กลับมารวมตัวได้ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีน้ำหนักหลากหลายมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่า PDI เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมของ DCP ในขณะที่การเติม ADR มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสารเติมแต่ง ADR เป็นตัวกลางในการยึดพอลิเมอร์ ทำให้ \bar{M}_w เพิ่มขึ้น และ \bar{M}_n ลดลงพร้อมกัน

Table 2 Gel Permeation Chromatography (GPC) Testing of PLA/PBAT blends added with additives

Sample / Ratio (wt%)	Additive (pph)	\bar{M}_w (KDa)	\bar{M}_n (KDa)	PDI
	-	110	62	1.77
	DCP 0.1	121	64	1.89
	DCP 0.2	127	60	2.11
	DCP 0.3	149	59	2.51
	ADR 1	162	78	2.07
	ADR 2	179	81	2.18
PLA/PBAT (80/20)	ADR 3	195	92	2.11
	-	110	51	2.15
	DCP 0.1	97	46	2.07
	DCP 0.2	98	43	2.25
	DCP 0.3	118	46	2.55
	ADR 1	138	57	2.41
	ADR 2	144	63	2.28
PLA/PBAT (60/40)	ADR 3	159	66	2.39

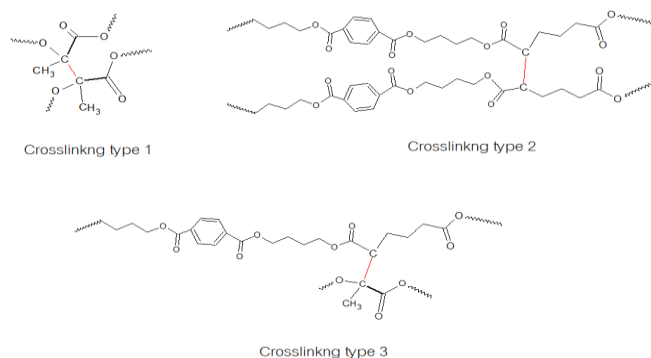


Fig. 7 Possibility of crosslinking on PLA/PBAT blends

สรุปผล

1. การเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทอเรพทาเลตในพอลิแลคติกแอซิด ทำให้สมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าการยืดตัว ความเหนียวดึง และสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทอเรพทาเลตที่เพิ่มขึ้น
2. การเติมสารไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ ในพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทอเรพทาเลต ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น สมบัติด้านมอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ความเหนียวดึง และการรับแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง
3. การเติมสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่มอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง ในขณะที่การยืดตัว ความเหนียวดึง และการรับแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กลุ่มวิจัย P-PROF ที่ช่วยสนับสนุนทุนงานวิจัย อาจารย์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอในงานวิจัยและชีวิตจริง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนอุปกรณ์วิจัย สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ช่วยเหลือด้านทุนการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- Ma, P., Cai, X., Zhang, Y., Wang, S., Dong, W., Chen, M., Lemstra, P.J. 2014. In-Situ Compatibilization of Poly(Lactic Acid) and Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) Blends by Using Dicumyl Peroxide as a Free-Radical Initiator. *Polym. Degrad. Stabil.* 102: 145–151. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.025
- Srimalanon, P., Prapagdee, B., Markpina, T., Sombatsompop, N. 2018. Effects of DCP as a Free Radical Producer and HPQM as a Biocide on the Mechanical Properties and Antibacterial Performance of in Situ Compatibilized PBS/PLA Blends. *Polym. Testing.* 67: 331–341. doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.017
- Teamsinsungvon, A., Ruksakulpiwat, Y., Jarukumjorn, K. 2012. Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blend and its Composite: Effect of Maleic Anhydride Grafted Poly(lactic acid) as a Compatibilizer. *Adv. Mater. Res.* 410: 51–54. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.410.51
- Xin, L., Xiangyu, Y., Jia, Y., Hongwei, P., Guanghui, G., Huiliang, Z., Lisong, D. 2018. Improvement of Compatibility and Mechanical Properties of the Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) Blends and Films by Reactive Extrusion with Chain Extender. *Inter. J. Molecular Sciences* 58: 1868–1878. doi.org/10.1002/pen.24795

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
(Subject: Agro-Industry)

ภาคบรรยาย
(Oral Presentation)

รูปแบบการบริโภคหวานและความตระหนักในสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวาน

Sweet consumption patterns and awareness of media campaign on reducing sugar intake

พัطنนท์ คมเดช, อภิษฐา ลีลาวณิชกุล*

Pattanon Komdet, Apichaya Lilavanichakul*

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: apichaya.l@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาถึงรูปแบบการบริโภคหวานและความตระหนักในสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวาน โดยเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามจากผู้บริโภค 204 คน และวิเคราะห์ผลโดยวิธี Paired-Samples t-Test ผลการวิจัยพบว่า 44.6% ของกลุ่มตัวอย่างมีคนในครอบครัวเป็นโรคไม่ติดต่อเรื้อรังและส่วนใหญ่มีของหวานหรือเครื่องดื่มติดตู้เย็นและชอบบริโภคอาหารหรือเครื่องดื่มน้ำตาลสูงในระดับปานกลาง ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรูปแบบการบริโภคหวานของผู้บริโภคระหว่างก่อนและหลังการดูสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวาน พบว่ารูปแบบการบริโภคหวานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$ โดยผู้บริโภคมีแนวโน้มในการบริโภคหวานน้อยลงและมีความตระหนักถึงความเสี่ยงในการบริโภคหวานเพิ่มขึ้น กลุ่มผู้บริโภคที่ในครอบครัวไม่มีคนเป็นโรคไม่ติดต่อเรื้อรังและกลุ่มไม่ติดรสหวานจะมีความตระหนักในสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานมากกว่ากลุ่มที่ในครอบครัวมีคนเป็นโรคไม่ติดต่อเรื้อรังและกลุ่มติดรสหวาน ดังนั้นควรส่งเสริมการใช้สื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เข้าถึงผู้บริโภคได้มากขึ้น

คำสำคัญ: การบริโภคหวาน, โรคไม่ติดต่อเรื้อรัง, สื่อรณรงค์

Abstract

This research aims to study sweet consumption patterns and awareness of media on reducing sweet consumption. Data of 204 respondents were conducted and analyzed by Paired-Samples t-Test. Results showed that 44.6% of the respondents found that their families had non-communicable diseases (NCDs). Most respondents moderately have dessert/drinks in the fridge and are likely to consume foods or drinks with high sugar. Findings on mean difference test on consumption patterns before and after viewing the media indicated that the difference between means found in the sample is significantly different ($p < 0.01$). Respondents tend to consume less sweet and increase in awareness of health risks. Non-NCDs family and non-sweet addiction group aware of health risks more than the others. Thus, the use of media on reducing sweet consumption campaign with different information and content forms should be continuously promoted to increase access to different consumer segments.

Keywords: Media campaign, Non-communicable diseases (NCDs), Sweet consumption

บทนำ

จากรายงานข้อมูลขององค์การอนามัยโลก (WHO) พบว่า ประชากรทั่วโลกเสียชีวิตจากโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non-communicable diseases: NCDs) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ในปี 2562 สถิติการเสียชีวิตด้วยโรค NCDs ทั่วโลกปีละ 41 ล้านคนคิดเป็น 71% ของการเสียชีวิตทั้งหมด (World Health Organization, 2020) โดยโรค NCDs เป็นกลุ่มโรคที่ไม่สามารถแพร่กระจายจากคนสู่คนได้ แต่เป็นโรคที่เกิดจากนิสัยหรือพฤติกรรมกรรมการดำเนินชีวิต โดยการเจริญเติบโตของโรคจะค่อยๆสะสมอาการอย่างต่อเนื่อง โรคในกลุ่มนี้ได้แก่ โรคเบาหวาน โรคระบบหัวใจและหลอดเลือด โรคมะเร็ง โรคอ้วนลงพุง และโรคระบบทางเดินหายใจเรื้อรัง (กรมควบคุมโรค, 2563) ซึ่งปัจจัยเสี่ยงทางด้านอาหารที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นจากองค์การอนามัยโลก (WHO) คือ การบริโภคเครื่องดื่มรสหวานที่มีน้ำตาล (Sugar-sweetened beverages: SSB) ให้ความหมายคือ เครื่องดื่มที่มีการเติมน้ำตาลอิสระ (Free sugar) ซึ่งเป็นน้ำตาลทั้งชนิดโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่ที่เติมระหว่างกระบวนการผลิตและน้ำตาลที่มีอยู่ตามธรรมชาติในน้ำผึ้ง น้ำผลไม้คั้น และน้ำผลไม้เข้มข้น ซึ่งผลกระทบจากการบริโภค SSB พบว่า การบริโภคเครื่องดื่มรสหวานที่มีน้ำตาลส่งผลถึงโรคอ้วนลงพุงทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ (วิลาลีนี, 2563)

ในประเทศไทย มีผู้เสียชีวิตจากโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เกือบ 4 แสนคนต่อปี คิดเป็น 76% ของการเสียชีวิตทั้งหมด และ 50% เสียชีวิตก่อนวัยอันควร คิดเป็นความสูญเสียถึง 2.2% ของ GDP ต่อปี โดยสถิติในช่วงปี 2559–2562 จำนวนผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคหลอดเลือดสมอง และโรคหลอดเลือดหัวใจ มีแนวโน้มสูงขึ้นในทุกปี (กรมควบคุมโรค, 2563) จึงเกิดการพัฒนาแผนการป้องกันควบคุมโรคไม่ติดต่อ 5 ปี (2560–2564) ของประเทศไทยเพื่อให้ตอบสนองตามการป้องกันและควบคุมโรค 9 เป้าหมายระดับโลก ซึ่งเป้าหมายที่ 7 คือความชุกของโรคเบาหวานและภาวะอ้วน ซึ่งภายในแผนเน้นให้เกิดการมีส่วนร่วมของประชาชนในการดูแลสุขภาพและเร่งขับเคลื่อนสังคมผ่านการสื่อสารความเสี่ยงอย่างต่อเนื่องไปสู่การปรับพฤติกรรมกรรมการบริโภคและเกิดความตระหนักต่อความเสี่ยงของการเกิดโรค NCDs (กรมควบคุมโรค, 2561)

หนึ่งในปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญของการเกิดโรค NCDs คือ ผู้บริโภคมีพฤติกรรมในการดำเนินชีวิตเปลี่ยนแปลงไปทั้งด้านรูปแบบการบริโภค การเลือกทานอาหารรสจัด การพักผ่อนที่ลดลง การทำงานที่เร่งรีบ ความสะดวกสบายที่เพิ่มขึ้น เกิดความเครียดสะสม ซึ่งปัจจัยในครอบครัวและสภาพแวดล้อม ทัศนคติและรูปแบบการบริโภคของคนในครอบครัวล้วนมีผลต่อพฤติกรรมการบริโภค (Bogart et al., 2017) และ โดยรายงานจาก กรมควบคุมโรค (2563) พบว่า ในปี 2560 ผู้บริโภคไทยส่วนใหญ่ติดบริโภครสหวาน และยังมีพฤติกรรมการบริโภคอาหารและเครื่องดื่มที่มีปริมาณน้ำตาลสูง แม้จะมีการเก็บภาษีเครื่องดื่มที่มีความหวานในอัตราก้าวหน้า แต่ยังไม่ครอบคลุมถึงธุรกิจเครื่องดื่มรายย่อย เช่น ร้านกาแฟ ร้านขนมไข่มุก ซึ่งยังมีปริมาณน้ำตาลสูง จึงเป็นอีกปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดโรค NCDs นอกจากนี้มีหลายหน่วยงานรณรงค์ลดการบริโภครสหวาน ได้แก่ เครือข่ายเด็กไทยไม่กินหวานของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการส่งเสริมสุขภาพ (สสส.) กระทรวงสาธารณสุข และสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา โดยการแนะนำให้บริโภคน้ำตาลลงเหลือไม่เกิน 6 ช้อนชาต่อวัน เพื่อส่งเสริมให้เกิดการปรับรูปแบบการบริโภคที่มีผลดีต่อสุขภาพมากขึ้น และเกิดความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อการเกิดโรค NCDs (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2561) แต่อย่างไรก็ตาม ความชุกของโรคเบาหวานและภาวะอ้วนของประเทศไทยยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง (กรมควบคุมโรค, 2563)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาถึงรูปแบบการบริโภครสหวานของผู้บริโภคและความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในสื่อรณรงค์การลดบริโภครสหวาน เพื่อเป็นประโยชน์แก่หน่วยงานรณรงค์ลดการบริโภครสหวานและภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง จากการใช้สื่อรณรงค์การลดบริโภครสหวานในการสร้างความตระหนักต่อความเสี่ยงของการเกิดโรค NCDs และการปรับพฤติกรรมการบริโภครสหวานให้มีแนวโน้มที่ดีต่อสุขภาพมากขึ้น

วิธีการวิจัย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรของงานวิจัยนี้ คือ กลุ่มผู้บริโภคที่เคยบริโภคกาแฟหรือเข้าใช้บริการในร้านกาแฟในช่วง 1 เดือนที่ผ่านมา ซึ่งเป็นกลุ่มเป้าหมายที่มีการใช้สื่อรณรงค์ลดการบริโภค โดยผู้วิจัยเก็บข้อมูลจากผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย 204 ตัวอย่าง โดยวิธีการเก็บตัวอย่างตามประสงค์ (Judgment or purposive sampling) (จวิพิมพ์, 2562)

วิธีการเก็บข้อมูล

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (survey research) โดยเก็บข้อมูลในช่องทางออนไลน์ ในรูปแบบ google form โดยใช้แบบสอบถาม (Questionnaires) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ข้อมูลส่วนบุคคล ได้แก่ เพศ อายุ การศึกษา อาชีพ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน เป็นต้น โดยคำถามเป็นแบบ Multiple choices ส่วนที่ 2 รูปแบบการบริโภคหวาน โดยคำถามเป็นแบบมาตราวัดของลิเคิร์ต 5 ระดับ (5 - Point Likert Scale) ส่วนที่ 3 การรับรู้สื่อรณรงค์การลดการบริโภคหวาน โดยคำถามเป็นแบบ Multiple choices และ ส่วนที่ 4 รูปแบบการบริโภคหวานของผู้บริโภคก่อนและหลังการรับสื่อรณรงค์การลดการบริโภคหวาน โดยคำถามเป็นแบบมาตราวัดของลิเคิร์ต 5 ระดับ (5 - Point Likert Scale) ซึ่งสื่อรณรงค์การลดการบริโภคหวานเป็นสื่อประเภทอินโฟกราฟิกส์ (Infographics) ซึ่งมีเนื้อหาประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1) ปริมาณน้ำตาลในเครื่องดื่มยอดนิยม 2) โรคติดต่อไม่เรื้อรัง (NCDs) และการแนวทางการปฏิบัติลดการบริโภคหวาน 3) ทางเลือกใหม่โดยใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล

การวิเคราะห์ข้อมูล

ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามในส่วนที่ 2 และ 4 โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์อัลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha coefficient) ซึ่งควรมีค่า มากกว่า 0.6 (Creswell, 2005) ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน พบว่า แบบสอบถามมีค่า Cronbach's alpha coefficient มากกว่า 0.6 จึงสรุปว่า แบบสอบถามมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลต่อไป

1) วิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) โดยการแจกแจงความถี่ (Frequency) และร้อยละ (Percentage) ในแบบสอบถามส่วนที่ 1 และ 3

2) วิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา โดยความเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในแบบสอบถามส่วนที่ 2 ซึ่งกำหนดให้มาตราวัดของลิเคิร์ต 5 ระดับ มีคะแนนระดับความคิดเห็นต่อรูปแบบการบริโภคหวาน ดังนี้ 1 = ระดับความคิดเห็นน้อยที่สุด, 2 = ระดับความคิดเห็นน้อย, 3 = ระดับความคิดเห็นปานกลาง, 4 = ระดับความคิดเห็นมาก และ 5 = ระดับความคิดเห็นมากที่สุด และกำหนดระดับความสำคัญตามช่วงของค่าเฉลี่ยคะแนนดังนี้ ได้แก่ ความคิดเห็นน้อยที่สุด (1.00–1.80) ความคิดเห็นน้อย (1.81–2.60) ความคิดเห็นปานกลาง (2.61–3.40) ความคิดเห็นมาก (3.41–4.20) และความคิดเห็นมากที่สุด (4.21–5.00) ซึ่งระดับความเห็นต่าง ๆ คือระดับของความคิดเห็นของผู้บริโภคที่มีต่อรูปแบบการบริโภคหวานและวิเคราะห์สถิติเชิงอนุมาน โดยทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของรูปแบบการบริโภคหวานโดยใช้วิธี Independent t-test

3) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยพฤติกรรมการบริโภคหวานของผู้บริโภคก่อนและหลังการรับสื่อรณรงค์การลดการบริโภคหวานโดยสถิติอนุมาน โดยวิธี Paired-Samples t-test ในแบบสอบถามส่วนที่ 4 และทดสอบความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อ

สุขภาพในการบริโภคหวานของผู้บริโภคระหว่างก่อนและหลังการดูสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานระหว่างกลุ่มผู้บริโภค 2 กลุ่มตามเกณฑ์ ได้แก่ 1) ครอบครัวที่มีคนเป็นโรค NCDs และ 2) ดิตรสหวาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการสำรวจกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 204 คน พบว่า 62.7% เป็นเพศหญิง และส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอายุ 26–35 ปี (54.9%) และมีระดับการศึกษาปริญญาตรีขึ้นไปถึง 90.7% มีรายได้อยู่ในช่วง 5,001–25,000 บาท/เดือน คิดเป็น 48.5% โดยส่วนมากมีขนาดครอบครัว 4–6 คน คิดเป็น 85.8% และในครอบครัวที่มีคนเป็นโรคติดต่อไม่เรื้อรัง (NCDs) ถึง 44.6% ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Demographic characteristics of sample ($n = 204$)

Characteristics	Variable	Frequency (%)
Gender	Male	76 (37.3%)
	Female	128 (62.7%)
Age (years)	18–25	65 (31.9%)
	26–35	112 (54.9%)
	36–45	12 (5.9%)
	> 46	15 (7.4%)
Level of education	Below a bachelor's degree	19 (9.3%)
	Bachelor's degree or higher	185 (90.7%)
Income (Baht/month)	< 5000	35 (17.2%)
	5001–25000	99 (48.5%)
	25001–45000	64 (31.4%)
	> 45000	6 (2.9%)
Household size (person)	1–3	22 (10.8%)
	4–6	175 (85.8%)
	> 6	7 (3.4%)
Someone in your family has NCDs (including you)	Have	91 (44.6%)
	Do not have	113 (55.4%)

ผลการวิเคราะห์รูปแบบการบริโภคหวานโดยรวม ดังแสดงใน Table 2 พบว่า ผู้บริโภคมีความคิดเห็นสูงที่สุดในระดับปานกลางต่อการมีของหวาน/เครื่องดื่มติดตู้เย็น (3.30 ± 0.91) รองลงมาเป็นชอบบริโภคอาหาร/เครื่องดื่มน้ำตาลสูง (3.24 ± 0.89) โดยมีความคิดเห็นในระดับน้อยต่อติดบริโภคหวาน (2.60 ± 0.89) การเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารหรือเครื่องดื่มมากกว่าปกติ (2.51 ± 0.98) โดยผลวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของรูปแบบการบริโภคหวานระหว่าง 2 กลุ่ม ได้แก่ ครอบครัวที่มี และไม่มีคนเป็นโรค NCDs พบว่า ในครอบครัวที่มีคนเป็นโรค NCDs มีรูปแบบการบริโภคหวานแตกต่างกับครอบครัวที่ไม่มีคนเป็นโรค NCDs อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ($p < 0.1$) ได้แก่ รูปแบบการติดบริโภคหวาน และมีของหวาน/เครื่องดื่มติดตู้เย็น การเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารหรือเครื่องดื่มมากกว่า

ปกติ ชอบบริโภคอาหาร/เครื่องดื่มน้ำตาลสูงและการใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาล โดยรูปแบบการบริโภคข้างต้นของผู้บริโภคที่ครอบครัวมีคนเป็นโรค NCDs มีแนวโน้มสูงกว่าครอบครัวที่ไม่มีคนเป็นโรค NCDs

Table 2 The opinion level of the sweet consumption patterns of the respondents

Consumption Pattern	Family with NCDs (n = 91)	Family without NCDs (n = 113)	t-value	Total sample (Mean±SD)	Opinion level (n = 204)
	Mean±SD				
C1 Addicted to sweet taste	2.87±0.73	2.38±0.93	-4.19***	2.60±0.89	Low
C2 Consume fruit after meals	2.95±0.89	2.87±0.85	-0.42	2.92±0.86	Moderate
C3 Consume dessert after meals	2.78±0.84	2.61±0.76	-1.51	2.69±0.80	Moderate
C4 Always have dessert/drinks (e.g., soft drinks) in the fridge	3.45±0.97	3.18±0.84	-2.13**	3.30±0.91	Moderate
C5 Add more sugar/syrup to food/drink than usual	2.65±1.06	2.41±0.89	-1.73*	2.51±0.98	Low
C6 Like to consume foods/ beverages that are high in sugar	3.37±0.93	3.13±0.85	-1.93*	3.24±0.89	Moderate
C7 Like to consume foods/ beverages that use sweeteners instead of sugar	2.82±0.81	2.63±0.77	-1.76*	2.72±0.79	Moderate
C8 Control sugar content according to the set limits in daily consumption	3.10±0.88	2.95±0.85	-1.25	3.01±0.87	Moderate

*** significance different level of 0.01 ** significance different level of 0.05 * significance different level of 0.1

The level of opinion was determined according to the range of the mean scores (1–5 points) as follows: very low (1.00–1.80), low (1.81–2.60), moderate (2.61–3.40), high (3.41–4.20), and very high (4.21–5.00)

Table 3 แสดงถึงการรับรู้ถึงสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานของผู้บริโภค โดยกลุ่มตัวอย่างส่วนมาก (62.7%) เคยเห็นสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานจากองค์กรอื่นๆ มาก่อน โดยช่องทางที่กลุ่มตัวอย่างเห็นสื่อมากที่สุดคือ ช่องทางออนไลน์ (โซเชียลมีเดียต่างๆ เช่น Facebook, Line, Instagram) (81.3%) และรองลงมาคือในร้านอาหารหรือร้านกาแฟ (46.1%) ในส่วนเนื้อหาในสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานที่แสดงให้ผู้ทำแบบสอบถาม (the media in questionnaire) ส่วนใหญ่เห็นว่าเนื้อหาในสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานที่ได้ดูมีความเหมาะสม (98.5%) และเข้าใจในเนื้อหาของสื่อที่ต้องการแสดงต่อผู้ทำแบบสอบถามถึง 92.6% และหลังจากการดูสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานแล้ว 78.4% ของผู้ทำแบบสอบถามเห็นว่า สื่อช่วยกระตุ้นให้ปรับเปลี่ยนรูปแบบในการบริโภคหวานลดลงได้

Table 3 Media on reducing sweet consumption

Responses on media	Variable	Frequency (%)
You have seen media campaigns to reduce sweet consumption from other organizations	Yes	128 (62.7%)
	No	76 (37.3%)
Channels that have seen the media campaign (n = 128)	Social media (e.g., Facebook, Line, IG)	104 (81.3%)
	Campaign banners in coffee shops	59 (46.1%)
The suitability of the content in the media (presented in questionnaire)	Suitable	201 (98.5%)
	Not suitable	3 (1.5%)

Table 3 (Continue)

Responses on media	Variable	Frequency (%)
Understanding in the content in the media (presented in questionnaire)	Understand	189 (92.6%)
	Don't understand	15 (7.4%)
Change behavior after viewing the media on reducing sweet consumption (presented in questionnaire)	Reduce the amount of sweetness	160 (78.4%)
	Usually don't like sweets	29 (14.2%)
	Choose to use sweeteners	11 (5.4%)
	Don't change behavior	4 (2%)

จากการเปรียบเทียบรูปแบบการบริโภคของผู้บริโภคระหว่างก่อนและหลังการดูสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวาน (โดยใช้แบบมาตรวัดของลิเคิร์ต 5 ระดับ) ดังแสดงใน Table 4 พบว่า รูปแบบการบริโภคของผู้บริโภคมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p < 0.01$) ซึ่งหลังจากการดูสื่อแสดงให้เห็นว่าผู้บริโภคมีแนวโน้มลดการเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารและเครื่องดื่มมากขึ้น โดยมีระดับความคิดเห็นลดลงจากระดับน้อย (2.51 ± 0.98) ไประดับน้อยที่สุด (1.78 ± 0.90) และผู้บริโภคเห็นว่าควรที่จะเลือกบริโภคอาหารหรือเครื่องดื่มที่ให้ความหวานทดแทนน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยมีระดับความคิดเห็นเพิ่มขึ้นจากระดับปานกลาง (2.72 ± 0.79) ไประดับมาก (3.75 ± 0.82) และผู้บริโภคเห็นว่าควรควบคุมปริมาณการบริโภคน้ำตาลตามเกณฑ์การบริโภคต่อวันเพิ่มขึ้น โดยมีระดับความคิดเห็นเพิ่มขึ้นจากระดับปานกลาง (3.01 ± 0.87) ไประดับมาก (4.03 ± 0.77) ดังนั้นจะเห็นว่า สื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานในรูปแบบ infographic ส่งเสริมให้ผู้บริโภคปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการบริโภคหวานที่ดีต่อสุขภาพมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรัตนภรณ์ และธานินทร์ (2559) ซึ่งพบว่า การใช้สื่อรณรงค์ลดการบริโภคน้ำตาลในร้านกาแฟ มีส่วนช่วยให้ผู้บริโภคมีการบริโภคหวานที่น้อยลงกว่าเดิม

Table 4 Consumption patterns before and after viewing a media on reducing sweet consumption ($n = 204$)

Consumption Patterns	Viewing the media		Mean difference	t-value
	(Mean \pm SD)			
	Before	After	(Before-After)	
C5 Add more sugar/syrup to food/drinks than usual	2.51 \pm 0.98	1.78 \pm 0.90	0.73 \pm 1.11	9.40***
C7 Like to consume food/drinks that use sweeteners instead of sugar	2.72 \pm 0.79	3.75 \pm 0.82	-1.03 \pm 1.00	-14.71***
C8 Control your sugar intake according to the set limits in daily consumption	3.01 \pm 0.87	4.03 \pm 0.77	-1.02 \pm 1.16	-12.63***

*** significance different level of 0.01 ** significance different level of 0.05 * significance different level of 0.1

จาก Table 5 แสดงการเปรียบเทียบความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการบริโภคหวานของผู้บริโภค ระหว่างก่อนและหลังการดูสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวาน โดยทดสอบระหว่างกลุ่มผู้บริโภค 2 กลุ่ม และใช้การแบ่งกลุ่ม

2 เกณฑ์ ได้แก่ 1) ครอบครัวที่มีคนเป็นโรค NCDs และ 2) ดิตรสหวาน พบว่า ผู้บริโภคจากการแบ่งกลุ่มทั้ง 2 เกณฑ์ที่มีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการบริโภคหวานระหว่างก่อนและหลังดูสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p < 0.01$) โดยที่ครอบครัวที่มีคนเป็นโรค NCDs (4.31 ± 0.73) และครอบครัวที่ไม่มีคนเป็นโรค NCDs (4.11 ± 0.72) มีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการบริโภคหวานเพิ่มขึ้นหลังจากได้ดูสื่อ แต่ครอบครัวที่ไม่มีคนเป็นโรค NCDs (-1.35 ± 1.10) มีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพเพิ่มขึ้นมากกว่าครอบครัวที่มีคนเป็นโรค NCDs (-0.76 ± 1.00) อย่างไรก็ตามครอบครัวที่ไม่มีคนเป็นโรค NCDs มีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการเลือกบริโภคหวานที่น้อยกว่าครอบครัวที่มีคนเป็นโรค NCDs

Table 5 Awareness of the health risks on sweet consumption between segments before and after viewing media on reducing sweet consumption ($n = 204$)

Segments	Subgroup	Awareness of the health risks on sweet consumption			
		Viewing the media		Mean difference (Before-After)	t-value
		(Mean±SD)			
Before	After				
Family with NCDs (including you)	With NCDs ($n = 91$)	3.55±0.96	4.31±0.73	-0.76±1.00	-7.21***
	Without NCDs ($n = 113$)	2.75±1.09	4.11±0.72	-1.35±1.10	-13.07***
Sweet Addiction	Sweet addiction ($n = 121$)	3.28±1.06	4.18±0.73	-0.90±1.04	-9.491***
	Non-sweet addiction ($n = 83$)	2.86±1.13	4.22±0.73	-1.36±1.12	-11.059***

*** significance different level of 0.01 ** significance different level of 0.05 * significance different level of 0.1

ในส่วนของกลุ่มผู้บริโภคที่ดิตรสหวานและไม่ดิตรสหวานจะเห็นได้ว่า กลุ่มที่ไม่ดิตรสหวานแสดงถึงการเป็นคนรักสุขภาพและการเลือกบริโภคหวาน หลังจากได้ดูสื่อ กลุ่มดิตรสหวาน (4.18 ± 0.73) และกลุ่มไม่ดิตรสหวาน (4.22 ± 0.73) มีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการบริโภคหวานเพิ่มขึ้น แต่กลุ่มไม่ดิตรสหวาน (-1.36 ± 1.12) มีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพเพิ่มขึ้นมากกว่ากลุ่มดิตรสหวาน (-0.90 ± 1.04) และเห็นได้ว่ากลุ่มไม่ดิตรสหวานมีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงกว่ากลุ่มดิตรสหวาน ดังนั้นสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานในรูปแบบ infographic ช่วยส่งเสริมให้ผู้บริโภคมีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการบริโภคหวานเพิ่มขึ้น ขึ้นกับสภาพแวดล้อมภายในครอบครัว (เช่น มีโรค NCDs) และรูปแบบการเลือกบริโภคหวาน ซึ่งสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานจะช่วยส่งเสริมให้เกิดความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการบริโภคหวานแก่กลุ่มผู้บริโภคที่ครอบครัวไม่มีคนเป็นโรค NCDs และกลุ่มไม่ดิตรสหวานมากกว่ากลุ่มที่ครอบครัวมีคนเป็นโรค NCDs และกลุ่มดิตรสหวาน ตามลำดับ

สรุป

จากอัตราการเกิดโรค NCDs ที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่อง และรูปแบบการบริโภคหวานที่หลากหลายทั้งทางตรงและทางอ้อม งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับเปลี่ยนรูปแบบการบริโภคหวานและตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับข้อมูลสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวาน ผลการศึกษาพบว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่มีของหวานหรือเครื่องดื่มติดตู้เย็นและชอบบริโภคอาหาร/เครื่องดื่มน้ำตาลสูงอยู่ในระดับปานกลาง และหลังจากผู้บริโภคได้ดูสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานแล้ว พบว่าผู้บริโภคมีแนวโน้มปรับเปลี่ยนรูปแบบการบริโภคหวานที่ดีขึ้นกว่าเดิมและมีความตระหนักถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพในการบริโภค

หวานเพิ่มขึ้น โดยสภาพแวดล้อมในครอบครัว (เช่น ครอบครัวมีโรค NCDs และไม่มีโรค NCDs) พบได้ว่าครอบครัวที่มีโรค NCDs มีรูปแบบการบริโภคหวาน (เช่น ดิตรหวาน) ที่มีแนวโน้มสูงกว่าครอบครัวที่ไม่มีคนเป็นโรค NCDs จึงสอดคล้องกับบทความของ Bogart et al. (2017) ที่กล่าวว่าสภาพแวดล้อม ทัศนคติและรูปแบบการบริโภคของคนในครอบครัวมีผลต่อพฤติกรรมการบริโภค จึงส่งผลต่อความตระหนักต่อสื่อรณรงค์การลดบริโภคหวานของผู้บริโภคแต่ละกลุ่มแตกต่างกัน ดังนั้นการสื่อสารในการรณรงค์การลดบริโภคหวาน ควรมีข้อมูลและรูปแบบการสื่อสารที่หลากหลายและสามารถเข้าถึงผู้บริโภคแต่ละกลุ่มได้ และสามารถเป็นส่วนช่วยให้มีการปรับลดการบริโภคหวานเพื่อสุขภาพที่ดีขึ้นในระยะยาวและช่วยให้ลดความเสี่ยงในการเกิดโรค NCDs ลดลงได้

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนค่าธรรมเนียมในการทำบทความวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. 2561. สถานการณ์การดำเนินงานด้านการป้องกันควบคุมโรคไม่ติดต่อ (NCDs). <http://www.thaincd.com>, 7 กันยายน 2564.
- กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. 2563. รายงานสถานการณ์โรค NCDs เบาหวาน ความดันโลหิตสูง และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง. <https://ddc.moph.go.th/uploads/publish/1035820201005073556.pdf>, 7 กันยายน 2564.
- รวีพิมพ์ จวีสุข. 2562. สถิติเพื่อการจัดการอุตสาหกรรมเกษตร, พิมพ์ครั้งที่ 3. ห้างหุ้นส่วนจำกัด สุเนตรฟิล์ม. กรุงเทพฯ.
- รัตนภรณ์ มั่นคง, อานินทร์ อ่อนนุชมงคล. 2559. รูปแบบการใช้สื่อรณรงค์ลดการบริโภคน้ำตาลในเครื่องดื่มในร้านกาแฟแบบลิ้นแฉก. สำนักทันตสาธารณสุข กรมอนามัย และเครือข่ายเด็กไทยไม่กินหวานสำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ.
- วิลาสินี หงสนันท์. 2563. การพัฒนาแบบสอบถามการบริโภคเครื่องดื่มรสหวานที่มีน้ำตาลของวัยรุ่นไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2561. ลดการบริโภคน้ำตาล. https://oryor.com/%E0%B8%AD%E0%B8%A2/detail/media_printing/1698/, 14 ตุลาคม 2564.
- Bogart, L.M., Elliott, M.N., Ober, A.J., Klein, D.J., Hawes-Dawson, J., Cowgill, B.O., Uyeda, K., Schuster, M.A. 2017. Home Sweet Home: Parent and home environmental factors in adolescent consumption of sugar-sweetened beverages. *Acad. Pediatr.* 17:529-536. doi: 10.1016/j.acap.2017.01.015.
- Creswell. 2005. Educational research-planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research (3rd ed.). Pearson Merrill Prentice Hall, New Jersey.
- World Health Organization. 2020. Noncommunicable Diseases Progress Monitor. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240000490>, 21 January 2022.

ผลของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง

Effect of high-pressure homogenization on physical, chemical and microbial qualities of coconut milk mixed with mango juice

วิชชุดา สุมาลัย, วรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ*

Wichuda Sumalai^a, Wannasawat Ratphitagsanti*

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wannasawat.r@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรและศึกษาผลของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง โดยนำน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงแก้วขมิ้นที่อัตราส่วน 80:20 (w/w) ซึ่งมีคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส ($p < 0.05$) ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงที่ระดับความดัน 20, 30 และ 40 MPa ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE^*) เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-เบสของเครื่องดื่ม (5.21 ± 0.01) และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (11.52 ± 0.01 ถึง 12.49 ± 0.27 °Brix) นอกจากนี้ กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ 0.6 log และพบการเจริญของยีสต์และเชื้อรา 1.3×10^1 ถึง 1.1×10^2 CFU/mL ดังนั้นกระบวนการโฮโมจีไนเซชันไม่สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้เท่ากับกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน

คำสำคัญ: น้ำนมมะพร้าว, พาสเจอร์ไรส์, มะม่วง, โฮโมจีไนเซชัน

Abstract

The objectives of this research were to develop the product formulation and study the effect of homogenization on changes in physical, chemical, and microbial qualities of the product using coconut milk mixed mango juice. Coconut milk mixed with Kaew kamin mango juice at a ratio of 80:20 (w/w) with the highest overall liking score of the sensory test ($p < 0.05$) was processed in a high-pressure homogenizer at room temperature using various pressure levels (20, 30 and 40 MPa). The total color difference (ΔE^*) increased ($p < 0.05$). High pressure homogenization-maintained pH of the beverage at 5.21 ± 0.01 . Total soluble solids were in the range of 11.52 ± 0.01 and 12.49 ± 0.27 °Brix. Microbial analysis results showed that high pressure homogenization could reduce 0.6 log of total plate count, while yeasts and molds were found between 1.3×10^1 and 1.1×10^2 CFU/mL Therefore, homogenization is unable to decrease the number of microbial as heating sterilization process.

Keywords: Beverage, Coconut, High pressure homogenization, Mango, Pasteurization

คำนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญด้านสุขภาพมากขึ้น ทั้งการรับประทานอาหารเจ อาหารมังสวิวัติน ส่งผลให้เครื่องดื่มทางเลือกจากพืชได้รับความสนใจจากผู้บริโภค มะพร้าวเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีศักยภาพของประเทศไทย มีการแปรรูปผลผลิตจากเนื้อมะพร้าวมากมายหลายรูปแบบ อาทิเช่น น้่านมมะพร้าว Ruengdech and Siripatrawan (2021) กล่าวถึงประโยชน์ของน้่านมมะพร้าว ได้แก่ กระตุ้นการลดน้ำหนัก ปรับปรุงสุขภาพหัวใจและเสริมสร้างภูมิคุ้มกันของร่างกาย จากการสืบค้นข้อมูลจากฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์ใหม่ระดับโลก Global New Products Database (GNPD) ของบริษัท Mintel ในช่วงปี พ.ศ. 2561–2563 พบว่าตลาดเครื่องดื่มทางเลือกจากพืชมีการเติบโตอย่างมาก และมีผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของน้่านมมะพร้าววางจำหน่ายจำนวน 460 รายการ หรือร้อยละ 6.7 ของผลิตภัณฑ์นมจากพืช (GNPD, 2021) กระบวนการแปรรูปที่นิยมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีกรดต่ำ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาได้นาน (Tangsuphoom and Coupland, 2005) แต่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียวิตามิน (Pedras et al., 2012) อีกทั้งผู้บริโภคมีความต้องการผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการน้อยที่สุด และมีความสดเหมือนใหม่ (fresh-like) กระบวนการโฮโมจีไนเซชันเป็นหนึ่งในทางเลือกในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ โดยของเหลวจะถูกบังคับให้ไหลผ่านช่องเล็กๆ ภายใต้แรงดัน ความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหล เป็นพารามิเตอร์หลักที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน การยับยั้งจุลินทรีย์เป็นผลจากปัจจัยหลายประการ เช่น การเปลี่ยนแปลงแรงดันกะทันหัน แรงบิด แรงเฉือน และคลื่นกระแทกที่เกิดจากโพรงอากาศที่เกิดจากฟองแก๊สระเบิด (Patrignani et al., 2021) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องดื่มน้่านมมะพร้าวผสมน้่านมมะม่วง เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรให้สูงขึ้น รวมถึงศึกษาผลของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ ของผลิตภัณฑ์ โดยเปรียบเทียบกับเครื่องดื่มน้่านมมะพร้าวผสมน้่านมมะม่วงที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์และผ่านการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมน้่านมมะม่วง

มะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ คือ มะม่วงน้ำดอกไม้ มะม่วงแก้วขมิ้น และมะม่วงเขียวเสวย ซึ่งจากสวนผลไม้ในอำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี เก็บเกี่ยวในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 อายุการเก็บเกี่ยว 110–120 วัน นำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 27 ± 1.5 °C เป็นระยะเวลา 6–8 วัน จากนั้นนำมาสกัดน้่านมมะม่วงโดยน้่านมมะม่วงมาล้าง ปอกเปลือก แยกเนื้อ นำไปนึ่งเป็นเวลา 1 นาที เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์และปั่นผสมอัตราส่วนเนื้อมะม่วงต่อน้ำ 1:3 ด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ไฟฟ้า (SHARP รุ่น EMC-15) ที่ความเร็วระดับสูงสุดเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง และบรรจุในถุงพลาสติกใส (1 กิโลกรัมต่อถุง) และเก็บไว้ที่ -20 °C จนกว่าแปรรูปและวิเคราะห์คุณภาพ (Zhou et al., 2017) ก่อนนำไปแปรรูปให้น้่านมมะม่วงแช่เยือกแข็งมาละลายโดยนำมาแช่น้ำอุณหภูมิห้องและให้น้ำไหลผ่านเป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง

การเตรียมน้่านมมะพร้าว

นำผงบ้่านมมะพร้าว (ยี่ห้อปรุง บริษัท วันไทย ฟู้ดส์ จำกัด, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย) ซึ่งปริมาณ 10 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 65 °C ซึ่งปริมาณ 500 กรัม จากนั้นปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ไฟฟ้าให้เข้ากัน (SHARP รุ่น EMC-15) ที่ความเร็วระดับต่ำสุด เป็นเวลา 5 นาที นำไปผสมกับน้่านมมะม่วงทันทีหลังเตรียมเสร็จ (Ruengdech and Siripatrawan, 2021) คุณภาพของน้่านมมะพร้าว ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 6.44 ± 0.28 และ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด เท่ากับ 1.77 ± 0.18 °Brix (Rincon, et al., 2020).

การศึกษาสายพันธุ์และอัตราส่วนของมะม่วงต่อคะแนนความชอบ

เตรียมน้ำมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ คือ มะม่วงน้ำดอกไม้ มะม่วงแก้วขมิ้น และมะม่วงเขียวเสวย ผสมกับน้ำนมมะพร้าวในอัตราส่วน 50:50 เดิมเกลือ 0.075% และปรับน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ที่ 11–13 °Brix โดยการเติมน้ำตาลซูโครส นำไปฆ่าเชื้อด้วยการต้มในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90–95 °C เป็นเวลา 5 นาที ทำให้เย็นทันที (วัชร และคณะ, 2558) ทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ของมะม่วง จากนั้นนำมะม่วงที่มีคะแนนความชอบสูงสุดมาศึกษาอัตราส่วนของน้ำนมมะพร้าวต่อน้ำมะม่วง โดยอัตราส่วนน้ำนมมะพร้าวต่อน้ำมะม่วง ดังนี้ 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 เดิมเกลือ 0.075% และปรับน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ที่ 11–13 °Brix โดยการเติมน้ำตาลซูโครส นำไปฆ่าเชื้อด้วยการต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90–95 °C เป็นเวลา 5 นาที ทำให้เย็นทันที (วัชร และคณะ, 2558) และทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวิธี 9 - point hedonic scale กับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ประเมินความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นมะม่วง รสชาติ และความชอบโดยรวม วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกอย่างสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD)

การศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปต่อคุณภาพเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง

นำตัวอย่างน้ำนมมะพร้าวผสมกับน้ำมะม่วงในอัตราส่วนน้ำนมมะพร้าวต่อน้ำมะม่วงที่ผ่านการคัดเลือกเข้าสู่กระบวนการแปรรูป ดังนี้

1. กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน

นำตัวอย่างต้มฆ่าเชื้อทั้งหมด 3 ระดับ คือ อุณหภูมิ 63 °C เวลา 30 นาที, อุณหภูมิ 70 °C เวลา 10 นาที ด้วยอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น TGSP20 บริษัท ThermoFisher ประเทศสหรัฐอเมริกา) และอุณหภูมิ 115 °C เวลา 5 นาที ด้วยเครื่องนึ่งแรงดันสูงแบบไฟฟ้า (บริษัท เอฟเอ็นบี แมชชีนเนอร์รี่แอนดิโซลูชันส์ จำกัด ประเทศไทย) ทำให้เย็นทันทีด้วยน้ำผสมน้ำแข็งและบรรจุลงในขวดพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต (Polyethylene Terephthalate: PET) ขนาด 150 mL

2. กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูง

นำตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนเติมลงในเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer) (รุ่น APV-2000 บริษัท SPX Flow Technology ประเทศโปแลนด์) โดยควบคุมอุณหภูมิเข้าอยู่ที่ 30±1 °C ระดับความดันที่ใช้ (ขั้นที่ 1/ขั้นที่ 2) ได้แก่ 20(15/5), 30(25/5) และ 40(35/5) MPa นำน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงบรรจุลงในขวดพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต ขนาด 150 mL จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 °C วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และกายภาพน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง ดังนี้ วิเคราะห์ค่าสี ด้วยเครื่อง Color meter (รุ่น ColorFlex บริษัท Hunter Lab ประเทศสหรัฐอเมริกา) วัดค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เมื่อค่า L_0^* , a_0^* , b_0^* เป็นค่าสีเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ คำนวณการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*) เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ ตาม Equation 1:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

วิเคราะห์ความเป็นกรด-เบส (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (รุ่น SevenCompact บริษัท METTLER-TOLEDO ประเทศสหรัฐอเมริกา) วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ด้วยเครื่อง Refractometer (รุ่น RX-5000α บริษัท ATAGO ประเทศญี่ปุ่น) อุณหภูมิที่วัดไม่เกิน 20 °C บันทึกผลที่ได้เป็น °Brix วิเคราะห์จุลินทรีย์ ด้วยวิธีการ pour plate โดยการวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar จากนั้นเก็บจานเพาะเชื้อบ่มที่อุณหภูมิ 35–37 °C เป็นระยะเวลา 48±3 ชั่วโมง สำหรับ ยีสต์และเชื้อรา (Yeasts and Molds) ทำการวิเคราะห์ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar และปรับกรดด้วยสารละลายกรดทาร์ทาริก 10% ให้มี pH ประมาณ 3.5 จากนั้นเก็บจานเพาะเชื้อบ่มที่อุณหภูมิ 20–25 °C เป็นระยะเวลา 120±3 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นในจานเพาะเชื้อ รายงานผลเป็น CFU/mL

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มทดลองโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics Version 28.0 (Thaisoftup Co., Ltd., Thailand)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การพัฒนาสูตรของเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง (สายพันธุ์และอัตราส่วนของมะม่วงต่อคะแนนความชอบ)

ผลการสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมทางเลือกจากพืช จากผู้บริโภคทั้งหมด 500 คน ที่มีอายุตั้งแต่ 20 ปีขึ้นไป ซึ่งได้มาจากการศึกษาเบื้องต้น (preliminary study) พบว่า ผู้บริโภค 94.2% มีความสนใจเครื่องดื่มนมทางเลือกที่ทำมาจากน้ำนมมะพร้าวผสมผลไม้ โดยมะม่วงเป็นผลไม้ที่ได้คะแนนมากที่สุด คิดเป็น 69.8% จึงเลือกมะม่วงเป็นผลไม้ที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำผลไม้ จากผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Table 1) พบว่า น้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงแก้วขมิ้นมีความชอบโดยรวมสูงที่สุดและได้รับคะแนนความชอบสูงสุดในคุณลักษณะด้านสี ($p < 0.05$) ดังนั้นจึงเลือกมะม่วงแก้วขมิ้นในการศึกษาต่อสำหรับคะแนนความชอบต่ออัตราส่วนน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง พบว่าคะแนนความชอบลดลงเมื่ออัตราส่วนของน้ำมะม่วงเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนน้ำนมมะพร้าวต่อน้ำมะม่วงที่ 80:20 มีคะแนนความชอบสูงสุดในทุกคุณลักษณะ อีกทั้งมีคะแนนความชอบสูงสุดในด้านของกลิ่นมะม่วง (Table 2) และไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับอัตราส่วน 90:10 ($p > 0.05$) จึงเลือกน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงแก้วขมิ้นอัตราส่วน 80:20 ในการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์

Table 1 Sensory liking scores of coconut milk mixed with 3 different varieties of mango juice (ratio of coconut milk to mango juice was 50:50)

Varieties of mango	Appearance ^{ns}	Color	Odor of mango ^{ns}	Taste ^{ns}	Overall liking
Nam Dok Mai	4.9±0.6	3.6±0.8 ^b	5.9±0.9	6.2±0.8	4.5±0.9 ^b
Kaew Kamin	5.2±0.6	4.5±0.8 ^a	6.2±0.8	6.2±0.8	4.9±0.9 ^a
Khiew Sawoey	4.9±0.7	3.6±0.8 ^b	5.9±0.9	6.2±0.8	4.4±0.9 ^b

*Means±SD in the same column followed by different superscript were significantly different ($p < 0.05$)

Table 2 Sensory liking scores of coconut milk mixed with mango juice at different proportions

Ratio of coconut milk to mango juice	Appearance	Color	Odor of mango	Taste	Overall liking
90:10	6.9±1.0 ^a	6.6±0.9 ^{ab}	6.4±0.9 ^b	6.5±1.1 ^{ab}	5.9±0.8 ^a
80:20	6.9±0.8 ^a	6.8±0.9 ^a	6.9±0.9 ^a	6.7±1.0 ^a	6.0±0.8 ^a
70:30	6.5±0.8 ^b	6.3±0.8 ^b	6.3±0.9 ^b	6.4±1.1 ^{ab}	5.1±0.8 ^b
60:40	5.8±1.1 ^c	5.3±1.1 ^c	5.8±1.1 ^c	6.2±1.0 ^b	4.4±0.9 ^c
50:50	5.6±0.8 ^c	5.3±0.8 ^c	5.8±0.9 ^c	6.2±1.0 ^b	4.5±0.8 ^c

*Means±SD in the same column followed by different superscript were significantly different ($p < 0.05$)

ผลของกระบวนการแปรรูปต่อคุณภาพเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง

ค่า pH และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วง (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อนและกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูง ค่า pH ของน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน เท่ากับ 5.25 ± 0.05 ในขณะที่น้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงมีค่า pH เท่ากับ 5.21 ± 0.01 จัดอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีกรดต่ำ (pH มากกว่า 4.6) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อนอยู่ในช่วง 12.17 ± 0.31 ถึง 12.34 ± 0.00 °Brix และน้ำนมมะพร้าวที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงอยู่ในช่วง 11.52 ± 0.01 ถึง 12.49 ± 0.27 °Brix ค่าสี (Table 3) ของน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อนมีค่า ΔE^* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรส์สูง และเวลานั่น ในขณะที่น้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงมีค่า ΔE^* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระดับความดันที่ใช้เพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมีผลมาจากค่า L^* เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าเมื่อค่า ΔE^* ในน้ำนมถั่วลายเสียเพิ่มขึ้นจาก 1.64 ± 0.12 (ความดัน 22 (18/4) MPa อุณหภูมิ 80 °C, 15 วินาที) เป็น 3.15 ± 0.01 (200 MPa) และ 3.18 ± 0.08 (300 MPa) ผู้ทดสอบให้คะแนนความเป็นสว่างเพิ่มขึ้นตามระดับ การเพิ่มขึ้นของค่า L^* เกิดจากการเพิ่มขึ้นของการเลี้ยวเบนของแสงที่เกิดจากจำนวนหยดน้ำมันที่เป็นส่วนประกอบของน้ำนมมะพร้าวที่กระจายตัวมากขึ้นหลังจากการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบขนาดของหยดน้ำมันในน้ำนมถั่วลายเสียพบว่าเมื่อความดันเพิ่มจาก 200 MPa เป็น 300 MPa ขนาดของหยดน้ำมันมีขนาดเล็กลงและกระจายตัวได้มากขึ้น (Codina-Torrella et al., 2017)

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่พบในน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ไม่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ (Table 4) เท่ากับ 3.2×10^2 CFU/mL เมื่อผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงที่ระดับความดัน 20 MPa สามารถลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ลงเหลือ 8.4×10^1 CFU/mL (0.6 log reduction) และการเพิ่มความดันเป็น 30 และ 40 MPa พบว่าจำนวนเชื้อจุลินทรีย์คงเหลือ 4.6×10^1 (0.9 log reduction) และ 3.1×10^1 CFU/mL (1 log reduction) ตามลำดับ ผลของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงต่อการทำลายจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้และอุณหภูมิขาเข้าของผลิตภัณฑ์ โดยให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นด้วยการเพิ่มความดันและอุณหภูมิขาเข้าของผลิตภัณฑ์ (Codina-Torrella et al., 2018) จากงานวิจัยของ Poliselis-Scopel et al. (2012) เมื่อน้ำนมถั่วเหลืองมาผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันที่ 200 MPa และเพิ่มความดันเป็น 300 MPa โดยใช้อุณหภูมิขาเข้าที่ 55 °C ทำให้จุลินทรีย์ลดลง ~3 log CFU/mL และหากอุณหภูมิขาเข้า

ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 55 เป็น 65 °C ที่ความดัน 200 MPa จำนวนจุลินทรีย์ลดลง ~1 log CFU/mL การใช้ระดับความดันที่แตกต่างกัน 3 ระดับ พบการเจริญของยีสต์และเชื้อรา อยู่ที่ 1.1×10^2 , 1.4×10^1 และ 1.3×10^1 CFU/mL ตามลำดับ ในขณะที่น้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงพบการเจริญอยู่ที่ 1.8×10^1 CFU/mL การพบยีสต์และเชื้อราหลังผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูง อาจเกิดจากสปอร์ของเชื้อราที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบ เมื่อใช้อุณหภูมิเข้าผลิตภัณฑ์ 30 ± 1 °C จึงไม่สามารถทำลายสปอร์ของ เชื้อราได้ ซึ่งผลจากการวิจัยของ Reverter-Carrión et al. (2018) ที่ได้ศึกษาการหยุดการทำงานของ *Aspergillus niger* โดยกระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูง พบว่าการใช้อุณหภูมิเข้าที่ 20 °C ที่มีสปอร์ *Aspergillus niger* ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ฆ่าเชื้อแล้ว ต้องใช้ความดันสูงถึง 300 MPa จึงสามารถทำลายได้ 5 log reduction และการทำลายสปอร์ของ *Aspergillus niger* โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิเข้าที่ 20 และ 50 °C ที่ความดัน 100–300 MPa พบว่า *A. niger* conidiospores มีการตายเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเข้าของผลิตภัณฑ์ 50 °C และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้ทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย โดยที่อุณหภูมิเข้า 20 °C ความดัน 300 MPa สามารถทำลายสปอร์ *Alicyclobacillus acidoterrestris* ในน้ำส้มได้เพียง 1 log reduction เท่านั้น

Table 3 Color parameters of coconut milk mixed with mango juice after being treated by different processes

Process	Treatment	L*	a*	b*	ΔE^*
Pasteurization	Untreated	62.95±0.02 ^d	11.91±0.05 ^c	56.60±0.08 ^e	-
	63 °C , 30 min	57.08±0.12 ^h	11.09±0.03 ^d	54.36±0.09 ^f	6.33±0.03 ^d
	70 °C , 10 min	61.31±0.01 ^e	12.79±0.01 ^a	60.58±0.08 ^a	4.39±0.08 ^e
	115 °C, 5 min	60.58±0.03 ^f	10.19±0.03 ^e	58.08±0.14 ^b	3.28±0.08 ^f
High pressure homogenization	Untreated	58.57±0.09 ^g	12.05±0.06 ^b	58.23±0.57 ^b	-
	20 (15/5) MPa	68.27±0.02 ^c	9.91±0.02 ^f	58.13±0.10 ^b	9.93±0.14 ^c
	30 (25/5) MPa	68.83±0.21 ^b	9.66±0.02 ^g	57.11±0.08 ^d	10.59±0.24 ^b
	40 (35/5) MPa	69.36±0.01 ^a	9.35±0.02 ^h	57.39±0.08 ^c	11.16±0.18 ^a

*Means±SD in the same column followed by different superscript were significantly different ($p < 0.05$)

Table 4 Microbial counts in coconut milk mixed with mango juice after being treated by different processes

Process	Treatment	Total plate count (CFU/ml)	Yeast and mold (CFU/ml)
Pasteurization	Untreated	5.7×10^3	1.7×10^2
	63 °C , 30 min	< 10 est.	< 10 est.
	70 °C , 10 min	< 10 est.	< 10 est.
	115 °C, 5 min	< 10 est.	< 10 est.
High pressure homogenizer	Untreated	3.2×10^2	1.8×10^1
	20 (15/5) MPa	8.4×10^1	1.1×10^2
	30 (25/5) MPa	4.6×10^1	1.4×10^1
	40 (35/5) MPa	3.1×10^1	1.3×10^1

*Means±SD in the same column followed by different superscript were significantly different ($p < 0.05$)

สรุป

คะแนนความชอบของน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงแก้วขมิ้นมีคะแนนความชอบสูงที่สุดในทุกด้าน แต่ระดับคะแนนอยู่ในระดับต่ำในช่วงของการคัดเลือกสายพันธุ์ เมื่อปรับอัตราส่วนของน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงแก้วขมิ้น (80:20) ทำให้มีคะแนนความชอบเพิ่มขึ้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงแก้วขมิ้นจากพืชอีกหนึ่งทางเลือกของผู้บริโภค กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงสามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่า pH ค่าสี และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงแก้วขมิ้นได้ใกล้เคียงกับเครื่องดื่มน้ำนมมะพร้าวผสมน้ำมะม่วงที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ แต่กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงยังไม่สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าของผลิตภัณฑ์ไม่เพียงพอในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์และสปอร์ของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ดังนั้นการใช้กระบวนการโฮโมจีไนเซชันแรงดันสูงควรใช้ความร้อนร่วมในกระบวนการแปรรูป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์และสปอร์ของเชื้อจุลินทรีย์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนองานวิจัย คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน และขอขอบคุณบุคลากรและคณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัททิปโก้ เอฟแอนด์บี จำกัด ที่ให้คำปรึกษา และเอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- วัชรวิทย์ เทพโยธิน วาสนา รุ่งตระกูลไทย และสาสมร บุตรพรม. 2558. การยอมรับของผู้บริโภคและคุณภาพของน้ำมะม่วงมหาชนกพร้อมดื่ม. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. ฉบับพิเศษ: 131-140.
- Codina-Torrella, I., Guamis, B., Zamora, A., Quevedo, J.M., Trujillo, A.J. 2017. Potential application of ultra-high pressure homogenization in the physico-chemical stabilization of tiger nuts' milk beverage. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 40: 42-51. doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.023.
- Codina-Torrella, I., Guamis, B., Zamora, A., Quevedo, J.M., Trujillo, A.J. 2018. Microbiological stabilization of tiger nuts' milk beverage using ultra-high pressure homogenization. A preliminary study on microbial shelf-life extension. *Food Microbiol.* 69: 143-150. doi.org/10.1016/j.fm.2017.08.002
- GNPD-Mintel Group Ltd. 2021. Category Insight: Beverage. <https://www.gnpd.com>. 1 April 2021.
- Pedras, M.M., Pinho, C.R.G., Tribst, A.A.L., Franchi, M.A., Cristianini, M. 2012. The effect of high pressure homogenization on microorganisms in milk. *Int. Food Res. J.* 19: 1-5.
- Patrignani, F., Rossi, S., Vannini, L., Lanciotti, R., 2021. High-pressure homogenization effects on spoilage and pathogenic microorganisms in foods. In: Knoerzer, K., Muthukumarappan, K. (Eds.). *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*. Vol. 3, Elsevier, AE Amsterdam, Netherlands, pp. 274-292.
- Poliseli-Scopel, F.H., Hernández-Herrero, M., Guamis, B., Ferragut, V., 2012. Comparison of ultra high pressure homogenization and conventional thermal treatments on the microbiological, physical and chemical quality of soymilk. *LWT - Food Sci. Technol.* 46: 42-48. doi.org/10.1016/j.lwt.2011.11.004.

- Reverter-Carrión, L., Saucedo-Gálvez, J.N., Codina-Torrella, I., Hernández-Herrero, M.M., Gervilla, R., Roig-Sagués, A.X., 2018, Inactivation study of *Bacillus subtilis*, *Geobacillus stearothermophilus*, *Alicyclobacillus acidoterrestris* and *Aspergillus niger* spores under ultra-high Pressure homogenization, UV-C light and their combination. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 48: 258–264.
- Rincon, L., Botelhob, R.B.A., Alencarc, E.R. 2020. Development of novel plant-based milk based on chickpea and coconut. *LWT - Food Sci. Technol.* 128: 109479. doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109479.
- Ruengdech, A., Siripatrawan, U. 2021. Application of catechin nanoencapsulation with enhanced antioxidant activity in high pressure processed catechin-fortified coconut milk. *LWT - Food Sci. Technol.* 140: 110594. doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110594.
- Santhirasegaram, V., Razali, Z., George, D.S., Somasundram, C., 2015. Comparison of UV-C treatment and thermal pasteurization on quality of Chokanan mango (*Mangifera indica* L.) juice. *Food Bioprod. Process.* 94: 313–321. doi.org/10.1016/j.fbp.2014.03.011.
- Tangsuphoom, N., Coupland, J.N., 2005. Effect of Heating and Homogenization on the stability of coconut milk emulsions. *J. Food Sci.* 70: e466-e470. doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb11516.x
- Zhou, L., Guan, Y., Bi, J., Liu, X., Yi, J., Chen, Q., Wu, X., Zhou M. 2017. Change of the rheological properties of mango juice by high pressure homogenization. *LWT - Food Sci. Technol.* 82: 121–130. doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.038.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
(Subject: Agro-Industry)

ภาคโปสเตอร์
(Poster Presentation)

Chemical properties and inhibitory effect on nitric oxide production of five mushroom extracts in RAW264.7 macrophages

Kwanchanok Hunthayung, Sassy Bhawamai*

CPF Food Research and Development Center, Ayutthaya 13170, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sassy.bha@cpf.co.th

Abstract

Edible mushrooms are widely consumed as a food source, food product, and mushroom extract due to their benefit on human health including antioxidant activities, immunity modulation, and immune cell activation effects. The purpose of this study is to analyze the basic composition (fat, protein, moisture content) and bioactive compounds (β -glucan, phenolic acid) of five mushroom extracts including tremella (*Tremella fuciformis*), shiitake (*Lentinus edodes*), king royal oyster (*Pleurotus eryngii*), enoki (*Flammulina velutipes*) and champignon (*Agaricus bisporus*). Moreover, the antioxidant activities and immune-modulating effects (cytotoxicity and nitric oxide level) were investigated. The results showed that fat, moisture, protein content varied in ranges of 0.49–1.19 g/100g DW, 3.49–12.16 g/100g DW and 8.9–40.01 g/100g, respectively. The bioactive compounds in mushrooms varied depending on the species. King royal oyster had the highest β -glucan and total phenolic contents. In this study, shiitake and champignon mushrooms reduced NO production on LPS-stimulated RAW 264.7 macrophages. In conclusion, the immunity potential of mushrooms makes them a prospective raw material selection for value-added product development.

Keywords: Anti-inflammatory, Antioxidant, Bioactive compounds, Edible mushrooms, Raw 264.7 macrophage

Introduction

Mushrooms are well known as a good source of nutritional value and bioactive compounds such as β -glucan, phenolic group, and tocopherol. Some edible mushrooms have been reported that their immune-modulating effects and medical properties (Gunawardena et al., 2014). In previous studies, the composition of edible mushrooms ranged widely including protein (0.47–28.6%), carbohydrates (56.61–87.41%), fat (0.14–2.5%), ash (0.62–8.27%) and moisture contents (79.78–91.64%). Moreover, the bioactive compounds and antioxidant capacities have also been reported at various levels (Ulzijargal and Mau, 2011, Hung and Nhi, 2012; Reis et al., 2012; Boonsong et al., 2016; Sari et al., 2017). Recently, shiitake, enoki, champignon, and tremella mushrooms have been reported to exhibit anti-inflammatory effects by decreasing the mediated production of inflammation such as nitric oxide (NO) and inflammatory cytokines (tumor necrosis factor- α ; TNF- α , interleukin-1 β ; IL-1 β) in macrophage cell culture studies (Chanput et al., 2012; Moro et al., 2012; Gunawardena et al., 2014;). Murine RAW 264.7 macrophage cell line has been extensively used as a model to study the immune modulating effects of food compound (Yang et al., 2008; Moro et al., 2012; Bhawamai et al., 2016).

In Thailand, commercially cultivated mushrooms include tremella, shiitake, king royal oyster, enoki and champignon have been widely consumed, only a few have been studied in terms of their bioactive compounds and immune responses. Therefore, this study aimed to evaluate the proximate compositions, bioactive compounds, antioxidant capacities and inhibitory NO production effects in a murine macrophage cell model.

Materials and Methods

Materials and reagents

Mushrooms (tremella, shiitake, king royal oyster, enoki and champignon) were purchased from a local supermarket in Ayutthaya, Thailand. A β -glucan assay kit was purchased from Megazyme (Bray Business Park, Wicklow, Ireland). All other reagents were of analytical or biological grade.

The murine RAW 264.7 cell line was obtained from American Type Culture Collection (ATCC, Rockville, MD, USA). Raw 264.7 macrophages were grown in DMEM medium supplemented with 10% FBS in humidified incubator at 37 °C and 5% CO₂. After reaching 80% confluence, the cells were passaged (Bhawamai et al., 2016).

Mushroom extraction

Fresh mushrooms with whole part were hot-air dried at 60 °C overnight and then ground to powder. Mushroom powders were extracted with distilled water. The mixture was shaken at 60 °C for 24 hr. and then centrifuged at 5000 rpm and 25 °C. The supernatant unfiltered extracts were collected and kept at 4°C before testing.

Compositional analysis

Moisture, solid and fat were measured by a rapid NMR fat analyzer (CEM, Oracle, North Carolina, USA) (Hunthayung and Bhawamai, 2020). Protein contents were determined using a Kjeldahl digestive system (K-439, Büchi Labortechnik AG, Switzerland) with nitrogen factor 6.25 (AOAC, 2000).

Determination of bioactive compounds (β -glucan and total phenolic content) and antioxidant activities

The β -glucan contents of mushroom powders were determined by a β -glucan assay kit, according to the manufacturer's recommendations. Total phenolic contents (TPC) were determined with the Folin-Ciocalteu method (Singleton and Rossi, 1965). One hundred μ L of each mushroom extract was mixed with 500 μ L of 10% Folin-Ciocalteu reagent, 2 μ L of sodium carbonate solution (7.5% w/v), distilled water and incubated for 2 hr. at 25 °C. The TPC were measured at 755 nm and expressed as μ g gallic acid equivalents per ml sample (Bhawamai et al., 2016). Antioxidant activities of mushroom extracts were analyzed by 2,2 diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay (Blois, 1958). The extracts were mixed with a DPPH solution and incubated at 25 °C for 30 minutes. Absorbance was measured at 525 nm and expressed as μ g Trolox equivalents per mL sample.

Effects of mushroom extracts on Raw 264.7 macrophages

Cell viability was analyzed by using the MTS assay. Cells were seeded in a 96-well plate and treated with distilled water (DW) or mushroom extracts at concentration of 125, 250, 500, 1000 μ g/mL for 24 hr. After that, 20 μ L of 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-5-(3-carboxymethoxyphenyl)-2-(4-sulfophenyl)-2H-tetrazolium (MTS reagent) was added and incubated for 1.5 hr. Absorbance was measured at 490 nm using a microplate reader (Omega, BMG labtech, Ortenberg, Germany) (Bhawamai et al., 2016). NO level was determined by the Griess method. Cells were seeded at a density of 5×10^4 cells per well. After 24 hr, cells were treated with extracts for 24 hr. and then stimulated with lipopolysaccharide (LPS) at a concentration of 100 ng/mL for another 24 hr. Culture media were collected and mixed with an equal volume of 100 μ L Griess reagent. Absorbance was measured at 540 nm.

Statistical analysis

All treatments were performed using three independent replications. Comparative analyses including compositions, bioactive compounds, antioxidant activity and NO levels among the treatments were performed using one-way ANOVA with Duncan post hoc comparison test. Cell viability comparison between the non-treated and extracts-treated group was performed with pair-sample t-test. A *p*-value of 0.05 was considered statically significant using SPSS software version 22 (IBM, Armonk, New York, USA).

Results and Discussion

Compositions of mushroom powders

Five edible mushroom powders including Tremella, Shiitake, King royal oyster, Enoki and Champignon were analyzed as shown in Table 1. They had fat content varying from 0.49–1.19 g/100 g DW. In general, mushrooms contain low fat content, and the major unsaturated fatty acids are linolenic acid and oleic acid (Bernaś et al., 2006; Kalač, 2013). Meanwhile, the moisture, solid content and protein content in these samples were 3.49–12.16%, 87.84–96.51%, and 8.90–40.01 g/100 g, DW respectively. Other studies showed that the protein content of mushrooms cultivated in different countries had varied due to the mushroom species, temperature, humidity during growth, cultivated area and level of nitrogen available (Longvah and Deosthale, 1998; Hung and Nhi, 2012).

As previously reported, the other nutrients include total carbohydrates including glucan, sugar, glycogen and dietary fiber ranged from 56.61–87.41%, while the contents of ash were varied in ranges between 0.62–8.78% (Ulziijargal and Mau, 2011; Reis et al., 2012). Moreover, mushrooms contain variety of vitamins and high level of potassium, phosphorus, magnesium and calcium (Yadav and Negi, 2021). These results indicated that mushrooms are a good source of health food that are rich in protein, dietary fiber, vitamins and mineral contents.

Table 1 Compositions of five edible mushrooms.

Type of mushroom	Moisture (%)	Solid (%)	Fat (g/100g)	Protein (g/100g)
Tremella	12.16±0.46 ^a	87.84±0.46 ^d	0.83±0.02 ^b	8.90±0.01 ^e
Shiitake	8.84±0.14 ^b	91.16±0.14 ^c	0.49±0.03 ^d	20.70±0.10 ^c
King royal oyster	5.76±0.53 ^c	94.24±0.53 ^b	0.64±0.04 ^c	21.83±0.23 ^b
Enoki	3.49±0.32 ^d	96.51±0.32 ^a	1.13±0.07 ^a	19.26±0.25 ^d
Champignon	3.88±0.09 ^d	96.12±0.09 ^a	1.19±0.04 ^a	40.01±0.19 ^a

Note: mean ± SD with different superscripted letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

Bioactive compounds and antioxidant activities

Bioactive compounds including β -glucan and phenolic group were determined in this study. β -glucan is a polysaccharide, which has health promoting effects such as anti-microbial, anti-inflammation and anti-allergic activity (Zhu et al., 2015). The results showed that King royal oyster and Shiitake had higher β -glucan content at 27.76 and 27.36 mg/100 mg DW, respectively (Table 2). In comparison with other studies, β -glucan in shiitake and tremella were similar, ranging from 23.5–27.4 g/100 g and 14.9 g/100 g, respectively (McCleary and Draga, 2016). Meanwhile, β -glucan content of champignon, enoki and king royal oyster showed varied, which could be influenced by the growing region, the extraction method (Sari et al., 2017).

Mushrooms contain phenolic compounds including flavonoids, hydroxybenzoic acid, lignans, tannins, phenolic acid and oxidized polyphenol (Yadav and Negi, 2021). Among samples, King royal oyster had the highest TPC at 3.38 mg GAE /100g DW, followed by enoki, shiitake, champignon and tremella, as shown in Table 2. Interestingly, the effect of extraction method on TPC was observed from previous studies. shiitake, champignon and king royal oyster boiled in water for 10 min had TPC from 4.67–9.63 mg GAE/g DW (Roncero-Ramos et al., 2017). The differences in TPC were probably due to the extraction method, a high extraction temperature results in increasing TPC content (Tulsawani et al., 2020). Thus, selection of the appropriate method is a key factor to preserve the bioactive compounds and nutritional value.

It has been reported that the TPC of mushroom extracts were highly correlated with DPPH scavenging value (Kim et al., 2008; Hung and Nhi, 2012). Among these extracts, shiitake had the highest antioxidant activity. Similar to the other reported (Boonsong et al., 2016). However, tremella extracts did not show antioxidants which may be influenced from the lower β -glucan and TPC contents. From the bioactive activities of mushroom, we hypothesized that mushroom extracts could also show anti-inflammatory effects.

Table 2 β -glucan contents, total phenolic contents and antioxidant activities of five edible mushroom extracts

Type of mushroom extracts	β -glucan content (g/100g DW)	Total phenolic content (mg gallic acid/g DW)	Antioxidant (mg trolox/g DW)
Tremella	14.59±0.30 ^c	1.05±0.10 ^c	ND*
Shiitake	27.36±0.15 ^a	2.61±0.09 ^b	11.63±1.04 ^a
King royal oyster	27.76±0.44 ^a	3.38±0.16 ^a	1.79±0.60 ^c
Enoki	16.42±0.30 ^b	3.26±0.07 ^a	7.00±2.86 ^b
Champignon	3.78±0.46 ^d	2.68±0.07 ^b	5.96±3.11 ^b

Note: *ND means not detect in this method, mean \pm SD with different superscripted letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

Effects of mushroom extracts on Raw 264.7 macrophages

The cell viability values of mushroom extracts-treated were not significantly different to that of DW (Data not shown). Therefore, 250–1000 μ g/mL of mushroom extracts were used to investigate the anti-inflammatory effects via NO production. NO is an important pro-inflammatory mediator which plays a role in chronic inflammatory development (Sharma et al., 2007). The results showed that LPS induced NO production compared with the control group. Moreover, pre-treated cells with shiitake, king royal oyster, enoki and champignon extracts significantly inhibited NO production, whereas the tremella did not show any effect (Fig. 1).

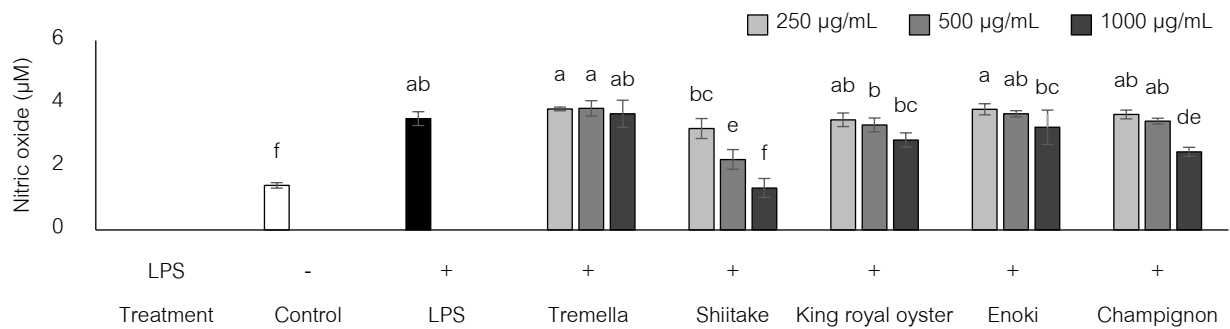


Fig. 1 NO level of LPS (100 ng/mL) induced RAW264.7 macrophages treated with five mushroom extracts. Bars represent the mean and standard deviations from three different experiment performed in triplicate. The different letters are significantly different at $p < 0.05$.

Previous studies showed similar results that shiitake, enoki and champignon inhibited NO production in LPS stimulated RAW264.7 macrophages (Moro et al., 2012; Gunawardena et al., 2014). The anti-inflammatory effects of mushrooms related to the presence of bioactive compounds such as β -glucan and phenolic group and antioxidant activity (Kim et al., 2008). In this study, shiitake mushroom extracts showed the highest anti-inflammation activities, while tremella mushroom had no anti-inflammatory effect. These results demonstrated that high antioxidant activities, β -glucan and total phenolic content in mushrooms related to suppressed inflammatory response, especially nitric oxide levels.

The β -glucan of mushroom is a heterogenous polysaccharide of glucose, consist of β -(1-3) backbone, branched via- β -(1-6) link side chains (Murphy et al., 2010). Many studies have investigated the immune-modulating mechanism of mushroom β -glucan including nuclear factor kB (NF-kB) pathway, dectin-1 in association with toll-like receptors (TLRs) pathway in the cell model (Gantner et al., 2003; Yang et al., 2008). Moreover previously reported, p-hydroxybenzoic acid, p-coumaric, and cinnamic acid are phenolic compounds in mushrooms that possess anti-inflammatory effects (Taofiq et al., 2015). In addition, a positive correlation of the phenolic group with antioxidant and anti-inflammation has been investigated (Kim et al., 2008). In actual fact, antioxidants can inhibit reactive oxygen species (ROS), which results in the inflammation process. However, the definite mechanisms on inflammatory diseases need further investigation.

Conclusion

To the best of our knowledge, we investigated Thai cultured edible mushrooms (tremella, shiitake, king royal oyster, enoki and champignon mushrooms) and found various fat, moisture, protein, bioactive compound, antioxidant activities and anti-inflammation levels. This suggests that some species of mushrooms have potential natural antioxidant and anti-inflammation abilities, which can be used as functional ingredients in food.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there are no conflicts of interests.

Acknowledgement

The authors thank the CPF Food Research and Development Center for supporting this project.

References

- Association of Analytical Chemists. 2000. Official Methods of Analysis, 15th ed. Inc Suite 400. Virginia, USA.
- Bernaś, E., Jaworski, G., Lisiewska, Z. 2006. Edible mushrooms as a source of valuable nutritive constituents. Acta Sci. Pol. Technol. Aliment. 5: 5–20.
- Bhawamai, S., Lin, S.H., Hou, Y.Y., et al. 2016. Thermal cooking changes the profile of phenolic compounds, but does not attenuate the anti-inflammatory activities of black rice. Food Nutr. Res. 60: 1–10.
- Blois, M.S. 1958. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. Nature 181: 1199–1200. doi.org/10.1038/1811199a0
- Boonsong, S., Klaypradit, W., Wilaipun, P. 2016. Antioxidant activities of extracts from five edible mushrooms using different extractants. Agr. Nat. Resour. 50: 89–97.
- Chanput, W., Reitsma, M., Kleinjans, L. et al. 2012. β -glucans are involved in immune-modulation of thp-1 macrophages. Mol. Nutr. Food Res. 56: 822–833.
- Gantner, B.N., Simmons, R.M., Canavera, S.J., et al. 2003. Collaborative induction of inflammatory responses by dectin-1 and toll-like receptor 2. Exp. Med. 197: 1107–1117.
- Gunawardena, D., Bennett, L., Shanmugam, K., et al. 2014. Anti-inflammatory effects of five commercially available mushroom species determined in lipopolysaccharide and interferon- γ activated murine macrophages. Food Chem. 148: 92–96.
- Hung, P., Nhi, N. 2012. Nutritional composition and antioxidant capacity of several edible mushrooms grown in the southern vietnam. Int. Food Res. J. 19: 611–615.
- Hunthayung, K., Bhawamai, S. 2020. Physical, chemical property and antioxidant capacity of indian pomegranate (*punica granatum L*), In: Proceedings of PIM 10th National and 3rd International Conference. Nonthaburi, Thailand. pp. 911–923.
- Kalač, P. 2013. A review of chemical composition and nutritional value of wild-growing and cultivated mushrooms. J. Sci. Food Agric. 93: 209–218.
- Kim, M.-Y., Seguin, P., Ahn, J.-K., et al. 2008. Phenolic compound concentration and antioxidant activities of edible and medicinal mushrooms from korea. J. Agric. Food Chem. 56: 7265–7270.
- Longvah, T., Deosthale, Y.G. 1998. Compositional and nutritional studies on edible wild mushroom from northeast india. Food Chem. 63: 331–334.
- McCleary, B.V., Draga, A. 2016. Measurement of β -glucan in mushrooms and mycelial products. J. AOAC Int. 99: 364–373.
- Moro, C., Palacios, I., Lozano, M., et al. 2012. Anti-inflammatory activity of methanolic extracts from edible mushrooms in lps activated raw 264.7 macrophages. Food Chem. 130: 350–355.

- Murphy, E.A., Davis J.M., Carmichael. M.D. 2010. Immune modulating effects of β -glucan. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 13: 656–661.
- Reis, F.S., Barros, L., Martins, A., et al. 2012. Chemical composition and nutritional value of the most widely appreciated cultivated mushrooms: An inter-species comparative study. *Food Chem. Toxicol.* 50: 191–197.
- Roncero-Ramos, I., Mendiola-Lanao, M. Pérez-Clavijo, M., et al. 2017. Effect of different cooking methods on nutritional value and antioxidant activity of cultivated mushrooms. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 68: 287–297.
- Sari, M., Prange, A. Lelley, J.I., et al. 2017. Screening of beta-glucan contents in commercially cultivated and wild growing mushrooms. *Food Chem.* 216: 45–51.
- Sharma, J., Al-Omran, A. Parvathy. S. 2007. Role of nitric oxide in inflammatory diseases. *Inflammopharmacol* 15: 252–259. doi.org/10.1111/j.1574-695X.2007.00329.x
- Singleton, V.L., Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdc-phosphotungstic acid reagents. *Am. J. Enol. Vitic.* 16: 144–158.
- Taofiq, O., Calhelha, R.C., Heleno, S., et al. 2015. The contribution of phenolic acids to the anti-inflammatory activity of mushrooms: Screening in phenolic extracts, individual parent molecules and synthesized glucuronated and methylated derivatives. *Food Res. Int.* 76: 821–827.
- Tulsawani, R., Sharma, P., Manimaran, M., et al. 2020. Effects of extraction temperature on efficacy of lingzhi or reishi medicinal mushroom, ganoderma lucidum (agaricomycetes), aqueous extract against oxidative stress. *Int. J. Med. Mushrooms* 22: 547–558.
- Ulzijaigal, E., Mau., J.L. 2011. Nutrient compositions of culinary-medicinal mushroom fruiting bodies and mycelia. *Int. J. Med. Mushrooms* 13: 343–349.
- Yadav, D., Negi, P.S. 2021. Bioactive components of mushrooms: Processing effects and health benefits. *Food Res. Int.* 148: 1–23. doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110599
- Yang, J.L., Jang, J.H., Radhakrishnan, V., et al. 2008. Beta-glucan suppresses lps-stimulated no production through the down-regulation of inos expression and nf-Kb transactivation in raw 264.7 macrophages. *Food Sci. Biotechnol.* 17: 106–113.
- Zhu, F., Du, B., Bian, Z., et al. 2015. Beta-glucans from edible and medicinal mushrooms: Characteristics, physicochemical and biological activities. *J. Food Compos. Anal.* 41: 165–173.

ผลของโปรตีนจากถั่วเหลืองและเห็ดนางฟ้าต่อคุณภาพมีทบอลจากเห็ด

Effect of soy protein and mushroom on the quality of mushroom plant-based balls

ฐิตินันท์ โรจน์เพ็ญเพียร, กมลวรรณ แจ่มชัด*, อนุวัตร แจ่มชัด

Thitinun Rotphenphian, Kamolwan Jangchud*, Anuvat Jangchud

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagikwj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เห็ดเป็นแหล่งโปรตีนและใยอาหาร สามารถใช้เป็นส่วนผสมในอาหารจากพืช งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณโปรตีนเกษตร (TSP, ร้อยละ 11–33) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI, ร้อยละ 11–33) และแป้งข้าวโพด (C, ร้อยละ 50–67) ต่อคุณภาพมีทบอลจากเห็ดนางฟ้า โดยวางแผนการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) จากการศึกษพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนเกษตร ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกและค่าความเป็นสีแดงของตัวอย่างสูงขึ้น ตัวอย่างที่มีปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดสูงกว่าโปรตีนเกษตร ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก ค่าความแข็งและการทนต่อการเคี้ยวสูงกว่าตัวอย่างที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเท่ากับโปรตีนเกษตร ตัวอย่างที่มีปริมาณแป้งข้าวโพดมาก ส่งผลให้ค่าความแข็ง ความเหนียวเป็นยางหรือกาว และการทนต่อการเคี้ยวสูงขึ้น ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรส เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของตัวอย่างที่มีอัตราส่วน TSP: SPI: C ที่ 0.17: 0.33: 0.50 สูงที่สุด อยู่ในระดับชอบปานกลาง (6.5–8.7 คะแนน) การเพิ่มปริมาณเห็ดส่งผลให้ตัวอย่างที่มีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก และค่าความสว่างต่ำลง สูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมีทบอลจากเห็ดคือสูตรที่มีอัตราส่วน TSP: SPI: C เท่ากับ 0.17: 0.33: 0.50 และมีอัตราส่วนของเห็ดต่อส่วนผสมอื่นๆ เท่ากับ 30: 50

คำสำคัญ: โปรตีนเกษตร, โปรตีนถั่วเหลืองสกัด, มีทบอลจากพืช, เห็ด

Abstract

Mushroom is a source of protein and fiber. It can be used in plant-based food. The objective of this research was to study the effect of Textured Soy Protein (TSP, 11–33%), Soy Protein Isolate (SPI, 11–33%), corn starch (C, 50–67%) on the quality of mushroom plant-based balls. The mixture design was used in this study. The result showed that as the TSP content increased, cooking yield and redness increased. The samples with higher SPI than TSP content gave more cooking yield (%) and chewiness and were harder than the samples with equal SPI and TSP content. Sample containing high corn starch increased hardness, gumminess and chewiness. Panelist rated the highest liking score of flavor, texture and overall liking of the sample with TSP: SPI: C ratio at 0.17: 0.33: 0.50 as liking moderately (6.7–8.7 scores). Increasing mushroom content reduced cooking yield, lightness, hardness, gumminess and chewiness. The optimal formula to produce mushroom plant-based balls contained TSP: SPI: C ratio at 0.17: 0.33: 0.50 and mushroom to other ingredients ratio at 30: 50.

Keywords: Mushroom, Plant-based ball, Soy protein isolate, Textured soy protein

คำนำ

อาหารจากพืช (Plant-based food) เป็นอาหารที่มีส่วนประกอบของโปรตีนที่สกัดมาจากพืชทดแทนเนื้อสัตว์ เช่น โปรตีนถั่วเหลือง, ถั่วเขียว, ถั่วดำ, เห็ด, ข้าว หรือ ถั่วชนิดต่างๆ ผ่านกระบวนการแปรรูปแต่งกลิ่นรส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรสชาติใกล้เคียงเนื้อสัตว์ (Kyriakopoulou et al., 2019) ในปัจจุบันผู้บริโภคใส่ใจดูแลสุขภาพ เลือกบริโภคอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและมีคุณค่าทางจิตใจ โดยตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มากจากการดำเนินชีวิตในสังคมปัจจุบัน รวมถึงจากการบริโภคอาหาร ซึ่งในการเลี้ยงสัตว์เพื่อผลิตเนื้อสัตว์ต้องให้ทรัพยากรสูง รวมถึงมีของเสียจากกระบวนการผลิตเกิดขึ้นมาก ในขณะที่การปลูกพืชจะช่วยลดปัญหาดังกล่าว จึงทำให้อาหารจากพืชได้รับความนิยมและเป็นที่ต้องการมากขึ้น (Dagevos and Voordouw, 2013) มีทบอล (Meat ball) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำมาจากเนื้อสัตว์บด เช่น เนื้อวัวหรือเนื้อแกะ ผสมกับเครื่องเทศต่างๆ ขึ้นรูปเป็นก้อนกลมขนาดเล็ก ผ่านการทอด อบ หรือนึ่ง (Kilic et al., 2010) การพัฒนาผลิตภัณฑ์มีทบอลโดยใช้โปรตีนจากแหล่งอื่นทดแทนเนื้อสัตว์ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในกลุ่มมังสาวิริติ (Vegetarian) หรือ กลุ่มบริโภคมังสาวิริติเป็นครั้งคราว (Flexitarian) โดยเห็ด (Mushroom) เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกหนึ่งที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 17-37, ใยอาหารร้อยละ 3-48 คาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 46-73 และมีปริมาณไขมันต่ำประมาณร้อยละ 2-4 (Manikandan, 2011) อีกทั้งมีเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์ มีงานวิจัยที่ใช้เห็ดและโปรตีนจากถั่วเหลืองทดแทนเนื้อสัตว์ในผลิตภัณฑ์เบอร์เกอร์เนื้อ ซึ่งสามารถใช้โปรตีนเกษตรทดแทนเนื้อสัตว์ได้ร้อยละ 20 และใช้เห็ดทดแทนเนื้อสัตว์ได้ร้อยละ 10% ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกสูงขึ้น ลดปริมาณโซเดียมและไขมันในผลิตภัณฑ์ลงได้ (Kristin et al., 2018) เห็ดนางฟ้า (*Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Sing) เป็นเห็ดเศรษฐกิจของประเทศไทย ที่มีการเพาะปลูกในหลายพื้นที่ ได้รับความนิยมในการนำมาประกอบอาหาร มีลักษณะเนื้อสัมผัสและรสชาติเป็นที่คุ้นเคยต่อผู้บริโภค และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์ มีงานวิจัยไม่มากนักที่ใช้เห็ดเป็นส่วนผสมหลักในผลิตภัณฑ์มีทบอลจากพืช ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณเห็ดนางฟ้า โปรตีนจากถั่วเหลืองและแป้งข้าวโพด ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตมีทบอลจากเห็ด ให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับต่อผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

เห็ดนางฟ้า (*Sarjor-cuju* mushroom) จากตลาดบางใหญ่ นนทบุรี, โปรตีนเกษตร (Textured Soy Protein, TSP) ปริมาณโปรตีนร้อยละ 49.8 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 40.9 ปริมาณไขมันร้อยละ 0.4 จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (Soy Protein Isolate, SPI) ปริมาณโปรตีนร้อยละ 90.3 จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, แป้งข้าวโพด จากบริษัทยูนิลีเวอร์ไทยโฮลดีนส์ จำกัด และคาร์ราจีแนน จากบริษัทแม็กซ์เวย์ จำกัด

การเตรียมตัวอย่าง

เห็ดนางฟ้า เตรียมโดยการนำมาล้างให้สะอาด ลวกเป็นเวลา 5 นาที กรองและบีบน้ำจนเหลือน้ำหนักร้อยละ 60 จากนั้นนำเห็ดเริ่มต้น นำไปบดละเอียด เตรียม TSP โดยแช่น้ำร้อน (อุณหภูมิ 60±2 °C) ในอัตราส่วน TSP: น้ำ เท่ากับ 1: 2 เป็นเวลา 5 นาที นำไปบดละเอียด (Grasso et al., 2019) SPI ผสมกับน้ำอุณหภูมิห้อง (30±2 °C) ในอัตราส่วน 1: 3 (Kamani et al., 2019) แล้วผสมส่วนผสมทั้งหมดในเครื่องปั่นผสม จากนั้นแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 30 นาที บั่นขึ้นรูปเป็นก้อนกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3±0.2 เซนติเมตร น้ำหนัก 15±1 กรัม บรรจุในกล่องพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °C ระยะเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อนำไปทดสอบทางคุณภาพต่อไป

การศึกษาผลของอัตราส่วนโปรตีนและแป้งข้าวโพดที่มีต่อคุณภาพมีทบอลจากเห็ด

โดยวางแผนการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) ศึกษาอัตราส่วนระหว่าง TSP และ SPI เท่ากับ 1: 1, 1: 2 และ 2: 1 และอัตราส่วนระหว่างโปรตีนและแป้งข้าวโพด เท่ากับ 1: 1 และ 1: 2 ทั้งหมด 6 สิ่งทดลอง ดังแสดงใน Table 1 โดย

สูตรพื้นฐาน ได้ดัดแปลงจาก Husain and Huda-Faujan (2020) กำหนดให้น้ำหนักรวมของ TSP, SPI และ C เป็น 18 กรัม แปลงเป็นอัตราส่วนโดยกำหนดทศนิยม 2 ตำแหน่ง และส่วนผสมชนิดอื่นคงที่ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ เตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 ± 0.2 เซนติเมตรตามวิธีการข้างต้น นำตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งมาละลายที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที นำไปนึ่งเป็นเวลา 5 นาที อุณหภูมิภายในตัวอย่าง $70 \pm 2^\circ\text{C}$ แล้วให้ความร้อนตัวอย่างบนเตาไฟฟ้าชนิดหลุม ยี่ห้อ House worth รุ่น HW-2131T ประเทศจีน อุณหภูมิ $110 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 8 นาที โดยมีการพลิกกลับตัวอย่างขณะให้ความร้อน อุณหภูมิภายในตัวอย่างหลังให้ความร้อนเท่ากับ $80 \pm 2^\circ\text{C}$ ดำเนินการวิเคราะห์ค่าคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส

Table 1 Formulations of mushroom plant-based balls with different ratios of protein and corn starch

Ingredient (%)	Formulation (TSP:SPI:C)					
	1 (0.25:0.25:0.50)	2 (0.17:0.17:0.67)	3 (0.17:0.33:0.50)	4 (0.11:0.22:0.67)	5 (0.33:0.17:0.50)	6 (0.22:0.11:0.67)
Textured Soy Protein	4.5	3.0	3.0	2.0	6.0	4.0
Soy Protein Isolate	4.5	3.0	6.0	4.0	3.0	2.0
Corn starch	9.0	12.0	9.0	12.0	9.0	12.0
Mushroom	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Water	27.7	27.7	27.7	27.7	27.7	27.7
Carrageenan	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Salt	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sugar	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Spices	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Total	100	100	100	100	100	100

การศึกษาผลของปริมาณเห็ดที่มีต่อคุณภาพมีทบอล

ศึกษาปริมาณเห็ดที่ใช้เป็นส่วนผสมของมีทบอล โดยเลือกสูตรที่มีเนื้อสัมผัสที่เหมาะสมและมีคะแนนความชอบจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูงสุด วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ศึกษาอัตราส่วนของเห็ดต่อปริมาณส่วนผสมอื่นๆ ทั้งหมด 3 ระดับที่ 30: 50, 40: 50 และ 50: 50 ทำการทดลอง 2 ซ้ำ เตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ค่าคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

ปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก (Cooking yield) ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการปรุงสุก (กรัม) คำนวณ Cooking yield (%) ตาม Equation 1 วิเคราะห์ตัวอย่างจำนวน 20 ซ้ำ (Grasso et al., 2019)

$$\text{Cooking yield (\%)} = \frac{\text{cooked weight}}{\text{raw weight}} \times 100 \quad (1)$$

การวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer กำหนด D65, 10° illuminant ตามวิธีการของ Niu et al. (2020) โดยวัดสีจากผิวด้านนอกของตัวอย่าง วิเคราะห์ตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัส (Texture profile analysis, TPA) ด้วยหัววัดชนิดทรงกระบอก (Cylindrical probe, SMS P/75) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนดระยะทางที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียรูปร้อยละ 50 โดยใช้ตัวอย่างทั้งชิ้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 ± 0.2 เซนติเมตร น้ำหนัก 13 ± 1 กรัม บันทึกค่าความแข็ง (Hardness, N), ความยืดหยุ่น

(Springiness), ความสามารถในการเกาะรวมกัน (Cohesiveness), ความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess, N/cm²) และ การทนต่อการเคี้ยว (Chewiness, N/cm) วิเคราะห์ค่าตัวอย่างจำนวน 10 ซ้ำ ตามวิธีการของ Grasso et al. (2019)

การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9 - Point Hedonic scale) ทดสอบคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ (Appearance), สี (Color), กลิ่นรส (Flavor), รสชาติ (Taste), เนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบโดยรวม (Overall liking) ประเมินโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ IBM SPSS Statistics 19

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของอัตราส่วนโปรตีนและแป้งข้าวโพดที่มีต่อคุณภาพมีทบอจากเห็ด

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของแหล่งโปรตีน 2 ชนิดระหว่าง TSP ต่อ SPI และอัตราส่วนระหว่างโปรตีนต่อแป้งข้าวโพด ที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพของมีทบอจากเห็ด พบว่าอัตราส่วนของ TSP, SPI และแป้งข้าวโพดมีผลต่อปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 2 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแป้งข้าวโพดคงที่ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของ TSP หรือ SPI ชนิดหนึ่งสูง ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกของตัวอย่างสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างที่มีอัตราส่วน TSP: SPI: C เท่ากับ 0.33: 0.17: 0.50 มีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกเท่ากับ 88.81–92.69% เนื่องจาก TSP มีความสามารถในการดูดน้ำและคืนรูปได้สูง ส่วน SPI มีคุณสมบัติในการเกิดเจลและดูดซับน้ำได้ดี โดยอุณหภูมิภายในของตัวอย่างหลังให้ความร้อนอยู่ที่ $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้โปรตีนเสื่อมสภาพและเกิดเจลของ β -conglycinin เท่ากับ 63 – 68°C และ glycinin เท่ากับ 80 – 88°C (Jacoba et al., 2002) โดยอัตราส่วนของ TSP: SPI เท่ากับ 2: 1 มีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกสูงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพดและลดปริมาณแหล่งโปรตีน ส่งผลให้ตัวอย่างมีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากแป้งข้าวโพดทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะส่วนผสมของมีทบอ ซึ่งมีความสามารถในการกักน้ำ (ร้อยละ 149.0) (Shad et al., 2016) น้อยกว่าโปรตีนเกษตร (ร้อยละ 166.2) (Lindriati et al., 2018) โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Kilic et al. (2010) รายงานว่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุกของตัวอย่างมีทบอมีค่าลดลง เมื่อใช้ TSP 10% และ 20% แทนที่เนื้อสัตว์ในสูตร และ Li (2019) รายงานว่า การเพิ่มปริมาณ SPI ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกของเนื้อสัตว์แปรรูปเพิ่มสูงขึ้น

Table 2 Physical properties of mushroom plant-based balls from different ratios of protein and corn starch

Formula	TSP	:	SPI	:	C	Yield (%)	L*	a*	b*
1	0.25		0.25		0.50	85.08±3.02 ^d	41.88±1.21 ^a	3.73±0.25 ^b	19.23±0.64 ^a
2	0.17		0.17		0.67	82.39±1.95 ^e	41.32±0.94 ^a	3.42±0.07 ^{cd}	18.50±0.27 ^b
3	0.17		0.33		0.50	88.70±1.73 ^b	41.24±0.55 ^a	3.54±0.10 ^{bc}	18.09±0.51 ^b
4	0.11		0.22		0.67	86.04±1.56 ^c	41.28±0.46 ^a	3.30±0.13 ^d	16.15±0.18 ^c
5	0.33		0.17		0.50	90.75±1.94 ^a	41.93±0.32 ^a	4.03±0.18 ^a	18.65±0.68 ^{ab}
6	0.22		0.11		0.67	89.22±1.80 ^b	41.16±0.49 ^a	3.54±0.14 ^{bc}	18.06±0.74 ^b

^{a-e} Means within the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากการวัดค่าสี พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ของทุกสิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 41.16–41.93 ค่าความเป็นสีแดงอยู่ในช่วง 3.30–4.03 และค่าความเป็นสีเหลืองอยู่ในช่วง 16.15–19.23 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน TSP: SPI: C เท่ากับ 0.33: 0.17: 0.5 มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) สูงกว่าตัวอย่างอื่น อาจเนื่องมาจาก TSP ที่มีสีน้ำตาล ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความเป็นสีแดงมากขึ้น เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพดในสูตร ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองของตัวอย่างลดลง เช่นเดียวกับ Yeater et al. (2017) รายงานว่า การเพิ่มปริมาณ TSP ส่งผลให้ตัวอย่างนักเก็ตไก่มีค่าความเป็นสีแดงมากขึ้น และ Li (2019) รายงานว่าการเพิ่มปริมาณสตาร์ชส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงของตัวอย่างลดลง

Table 3 Texture properties of mushroom plant-based balls from different ratios of protein and corn starch

Formula	TSP	:	SPI	:	C	Hardness (N)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess (N/cm ²)	Chewiness (N/cm)
1	0.25		0.25		0.50	15.22±0.98 ^d	0.91±0.03 ^c	0.74±0.03 ^c	11.32±0.95 ^d	10.30±0.99 ^d
2	0.17		0.17		0.67	17.09±1.11 ^b	0.94±0.02 ^a	0.80±0.03 ^a	13.63±1.27 ^b	12.83±1.34 ^b
3	0.17		0.33		0.50	16.19±0.97 ^c	0.93±0.01 ^{ab}	0.77±0.03 ^b	12.42±0.92 ^c	11.59±0.94 ^c
4	0.11		0.22		0.67	18.97±0.76 ^a	0.94±0.02 ^a	0.80±0.03 ^a	15.11±0.83 ^a	14.26±0.94 ^a
5	0.33		0.17		0.50	16.90±0.95 ^b	0.90±0.02 ^c	0.70±0.04 ^d	11.90±1.05 ^{cd}	10.72±1.09 ^d
6	0.22		0.11		0.67	17.37±0.93 ^a	0.92±0.02 ^b	0.76±0.03 ^b	14.77±1.19 ^a	13.68±1.33 ^a

^{a-d} Means within the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากการวัดค่าทางเนื้อสัมผัส พบว่า ปริมาณ TSP, SPI และแป้งข้าวโพด มีผลต่อคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 3 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแป้งข้าวโพดคงที่ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน 0.11: 0.22: 0.67 และ 0.22: 0.11: 0.67 มีค่า Hardness, Gumminess และ Chewiness สูงโดยมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากปริมาณแป้งข้าวโพดในสูตรสูง จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่แน่นและเคี้ยวได้ยากมากขึ้น ในขณะที่ตัวอย่างที่มีแป้งข้าวโพดต่ำในปริมาณที่เท่ากันที่อัตราส่วน 0.25: 0.25: 0.50 มีค่า Hardness, Gumminess และ Chewiness ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วน 0.17: 0.33: 0.50 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากสัดส่วนของ SPI ที่ลดลง โดย SPI มีคุณสมบัติในการเกิดเจลที่มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมาก (Li, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Li (2019) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชและ SPI ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปมีค่า Hardness, Springiness, Chewiness และ Cohesiveness สูงขึ้น และตัวอย่างที่มี TSP สูงและ SPI ต่ำ ที่อัตราส่วน 0.33: 0.17: 0.50 มีค่า Springiness และ Cohesiveness ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วน 0.17: 0.33: 0.50 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แสดงถึงปริมาณ TSP มากทำให้ตัวอย่างมีการเกาะตัวกันได้ไม่ดีและความยืดหยุ่นไม่สูงมาก เช่นเดียวกับรายงานของ Kassama et al. (2003) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ TSP (2-5%) ทำให้ตัวอย่างเนื้อเบอร์เกอร์มีค่า Cohesiveness ต่ำลง

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ และสี ของทุกสิ่งทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังแสดงใน Table 4 โดยตัวอย่างที่มีอัตราส่วน 0.33: 0.17: 0.50 ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสและรสชาติต่ำ เนื่องจากอัตราส่วนของ TSP ที่สูง ทำให้ตัวอย่างมีกลิ่นของโปรตีนถั่วเหลืองที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะ ส่งผลต่อการยอมรับของผู้ทดสอบ ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่มีอัตราส่วน 0.25: 0.25: 0.50 ต่ำ เนื่องจากเนื้อสัมผัสที่นุ่ม ไม่แน่นและมีความยืดหยุ่นต่ำ จากการวัดค่าทางเนื้อสัมผัส ดังแสดงใน Table 3 ในขณะที่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน 0.17: 0.33: 0.50 ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบในด้านเนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวมสูงสุด ($p \leq 0.05$) เนื่องจากตัวอย่างดังกล่าวมีคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสด้านความแข็งอยู่ในระดับไม่สูงมาก สามารถเคี้ยวได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นของเนื้อสัมผัสที่ดี รวมถึงมีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก อยู่ในช่วงที่สูง

(88.7%) จึงเลือกตัวอย่างดังกล่าวทดสอบในการทดลองถัดไป และเนื่องจากปริมาณเห็ดในสูตรที่ค่อนข้างสูงทำให้มีกลิ่นรสเฉพาะในผลิตภัณฑ์ จึงศึกษาการลดปริมาณเห็ดเพื่อปรับปรุงกลิ่นรส รวมถึงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

Table 4 Sensory Evaluation of mushroom plant-based balls from different ratios of protein and corn starch

Formula	TSP	SPI	C	Appearance	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall liking
1	0.25	0.25	0.50	7.2±1.2 ^a	6.9±1.2 ^a	6.5±1.1 ^{ab}	6.4±1.5 ^{bc}	6.2±1.2 ^c	6.5±1.1 ^{bc}
2	0.17	0.17	0.67	7.2±1.2 ^a	6.8±1.2 ^a	7.1±1.1 ^a	6.7±1.2 ^{abc}	6.7±1.2 ^{bc}	6.9±1.1 ^b
3	0.17	0.33	0.50	7.3±1.3 ^a	7.1±1.4 ^a	7.1±1.1 ^a	7.4±1.2 ^a	7.6±1.1 ^a	7.6±1.1 ^a
4	0.11	0.22	0.67	7.2±1.2 ^a	7.1±1.2 ^a	6.9±1.2 ^{ab}	7.0±0.7 ^{ab}	6.8±1.1 ^{bc}	7.1±0.7 ^b
5	0.33	0.17	0.50	6.9±1.1 ^a	6.7±1.3 ^a	6.4±1.2 ^b	6.2±1.2 ^c	6.5±1.1 ^{bc}	6.3±1.1 ^c
6	0.22	0.11	0.67	6.9±1.2 ^a	6.6±1.3 ^a	6.5±1.0 ^b	6.8±1.1 ^{abc}	7.1±1.1 ^{ab}	6.7±1.0 ^{bc}

^{a-c} Means within the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

ผลของปริมาณเห็ดที่มีต่อคุณภาพมีทบอล

จากการศึกษาปริมาณของเห็ดที่เป็นส่วนประกอบของมีทบอล 3 ระดับ พบว่า การลดปริมาณเห็ด มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเห็ดมีปริมาณความชื้นสูง และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้างต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปและได้รับความร้อนทำให้เกิดการสูญเสียน้ำภายในโครงสร้าง ทำให้ตัวอย่างที่มีสัดส่วนเห็ดต่อปริมาณส่วนผสมอื่นๆ เท่ากับ 30:50 มีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก สูงที่สุด (93.58%) ดังแสดงใน Table 5 เช่นเดียวกับ Wong et al. (2018) รายงานว่า การลดลงของปริมาณเห็ดส่งผลให้ตัวอย่างเบอร์เกอร์มีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก เพิ่มขึ้น จากการวัดค่าสี พบว่า เมื่อลดปริมาณเห็ดในส่วนประกอบของมีทบอล ส่งผลต่อค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลือง ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความสว่างสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Wang et al. (2019) พบว่าการเพิ่มปริมาณเห็ดของตัวอย่างไส้กรอก ส่งผลให้ค่าความสว่างของตัวอย่างลดลง ในขณะที่ Chung et al. (2009) พบว่าการเพิ่มปริมาณเห็ดในตัวอย่างซูริมิ ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความเป็นสีเหลืองสูงขึ้น และ Lin (2014) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเห็ดในตัวอย่างเบอร์เกอร์ ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดระหว่างการให้ความร้อนของกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ที่เป็นองค์ประกอบในเห็ด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง

Table 5 Physical properties of mushroom plant-based balls from different amounts of mushroom

Mushroom (g.)	Yield (%)	L*	a*	b*
30	93.58±1.66 ^a	42.52±0.74 ^c	3.26±0.14 ^b	17.16±0.32 ^b
40	91.63±2.00 ^b	41.86±0.56 ^b	3.34±0.16 ^b	17.03±0.21 ^b
50	90.44±1.65 ^c	41.10±0.43 ^a	3.70±0.21 ^a	17.75±0.55 ^a

^{a-c} Means within the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากการวัดค่าทางกายภาพ พบว่า เมื่อลดปริมาณเห็ดลง ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า Hardness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 6 เนื่องจากเห็ดมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบสูง มีเนื้อสัมผัสค่อนข้างนุ่ม ทำให้เนื้อสัมผัสของตัวอย่างมีทบอลมีความแข็งลดลง ซึ่งการลดปริมาณเห็ดเป็นการเพิ่มส่วนประกอบอื่นในสูตร รวมถึงปริมาณ TSP, SPI และแป้งข้าวโพด ที่ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของมีทบอล Wang et al. (2019) รายงานว่า การเพิ่มปริมาณเห็ดในตัวอย่างไส้กรอก ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า Hardness, Springiness,

Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness ลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Wan Rosli et al. (2011) พบว่า การเพิ่มปริมาณเห็ดในตัวอย่างเบอร์เกอร์ไก่ ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า Hardness, Cohesiveness และ Gumminess ลดลง

Table 6 Texture properties of mushroom plant-based balls from different amounts of mushroom

Mushroom (g.)	Hardness (N)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess (N/cm ²)	Chewiness (N/cm)
30	20.32±1.39 ^a	0.93±0.01 ^a	0.78±0.02 ^a	15.84±1.34 ^a	14.78±1.39 ^a
40	18.89±0.76 ^b	0.93±0.01 ^a	0.76±0.02 ^a	14.47±0.80 ^b	13.43±0.87 ^b
50	16.77±0.65 ^c	0.91±0.01 ^b	0.73±0.02 ^b	12.24±0.62 ^c	11.18±0.67 ^c

^{a-c} Means within the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ปริมาณเห็ดในสูตรไม่ส่งผลต่อคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏและสีของตัวอย่าง ($p > 0.05$) แต่มีผลต่อกลิ่นรส เนื้อสัมผัส รสชาติและความชอบโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 7 โดยผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรส เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงสุดของตัวอย่างที่มีสัดส่วนเห็ดต่อปริมาณส่วนผสมอื่นๆ เท่ากับ 30:50 แสดงถึงผู้ทดสอบมีความพอใจกับลักษณะเนื้อสัมผัสของมีทบอลที่ค่อนข้างแน่น รวมถึงกลิ่นรสของเห็ดน้อย ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมประกอบด้วย อัตราส่วนของ TSP: SPI: C เท่ากับ 0.17: 0.33: 0.50 โดยมีสัดส่วนของเห็ด 30 กรัมต่อปริมาณส่วนผสมอื่นๆ 50 กรัม

Table 7 Sensory Evaluation of mushroom plant-based balls from different amount of mushroom

Mushroom (g.)	Appearance	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall liking
30	6.9±0.9 ^a	6.9±0.7 ^a	7.1±0.9 ^a	7.0±0.7 ^a	7.6±0.9 ^a	7.6±0.8 ^a
40	6.8±0.9 ^a	6.9±0.6 ^a	6.6±0.8 ^b	6.5±0.8 ^b	6.7±0.7 ^b	6.7±0.7 ^b
50	6.5±0.8 ^a	6.8±0.7 ^a	6.5±0.6 ^b	6.5±0.6 ^b	6.7±0.7 ^b	6.8±0.5 ^b

^{a-c} Means within the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุป

การเพิ่มอัตราส่วนของ TSP และ SPI ส่งผลให้มีมีทบอลจากเห็ดที่มีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุกสูงขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนของ SPI และแป้งข้าวโพดส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า Hardness, Gumminess และ Chewiness สูงขึ้น เมื่อลดปริมาณเห็ดนางฟ้าลงส่งผลให้ตัวอย่างมีปริมาณผลผลิตหลังการปรุงสุก, ค่าความสว่าง, Hardness, Gumminess และ Chewiness สูงขึ้น สูตรที่เหมาะสมประกอบด้วยอัตราส่วนของเห็ดต่อส่วนผสมอื่นๆ เท่ากับ 30:50 โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก (7.6)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับทุนสนับสนุนผลงานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60

เอกสารอ้างอิง

- Chung, S.I., Kim, S.Y., Nam, Y.J., Kang, M.Y. 2009. Development of Surimi gel from king oyster mushroom and cuttlefish meat paste. Food Sci. Biotechnol. 19: 51–56.
- Dagevos, H., Voordouw, J. 2013. Sustainability and meat consumption: is reduction realistic?. Sustain.: Sci. Pract. Policy 9: 60–69.

- Grasso, S., Smith, G., Bower, S., Ajayi, O.M. 2019. Effect of texturized soy protein and yeast on the instrumental and sensory quality of hybrid beef meatballs. *J. Food Sci. Technol.* 56: 3126–3135.
- Husain, H., Huda-Faujan. N. 2020. Potential application of grey oyster mushroom stems as Halal meat replacer in imitation chicken nuggets. *Food Res.* 4: 179–186.
- Jacoba, M., Renkema, S. Vliet. T.V. 2002. Heat-Induced gel formation by soy proteins at neutral pH. *J. Agric. Food Chem.* 50: 1569–1573.
- Kamani, M.H., Meera, M.S. Bhaskar, N., Modi, V.K. 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: 2660–2669.
- Kassama, L.S., Ngadi, M.O., Raghavan, G.S.V. 2003. Structural and instrumental textural properties of meat patties containing soy protein. *Int. J. Food Prop.* 6: 519–529.
- Kilic, B., Kankaya, T., Ekici Y.K., Orhan. H. 2010. Effect of textured soy protein on quality characteristics of low fat cooked kofre (Turkish meatball). *J. Anim. Vet. Adv.* 9: 3048–3054.
- Kristin, M., Corradini, M.G. Autio W.Kinchla. A.J. 2019. Sodium reduction strategies through use of meat extenders (white button mushrooms vs. textured soy) in beef patties. *Food Sci. Nutr.* 7: 506–518.
- Kyriakopoulou, K., Dekkers B., Goot, A.J. 2019. Sustainable meat production and processing. Elsevier, Amsterdam.
- Li, L. 2019. The effect of soy protein isolate, starch and salt on quality of ready-to-eat restructures beef products. *International Journal of Food Engineering and Technology* 3: 31–44.
- Lin, C.Y. 2014. Physicochemical properties of soy-and pea-based imitation sausage patties. M.Sc. thesis, Faculty of the Graduate School, Columbia, MO, United States, Missouri University.
- Lindriati, T., Herlina, H., Arbiantara, H. 2018. Effect of *Xanthosoma Sagittifolium* powder, water and mixing time on texturized vegetable protein properties. *Adv. Eng. Res.* 172: 210-213.
doi.org/10.2991/fanres-18.2018.43
- Manikandan, K. 2011. Mushrooms: Production, consumption and marketing. Directorate of Mushroom Research, Solan.
- Niu, Y., Fang, H., Huo, T., Sun, X., Gong, Q., Yu., L. 2020. A novel fat replacer composed by gelatin and soluble dietary fibers from black bean coats with its application in meatballs. *LWT – Food Sci. Technol.* 122: 1–7.
- Shad, M.A., Nawaz, H., Noor, M., Ahmad, H.B., Hussain, M., Choudhry, M.A. 2013. Functional properties of maize flour and its blends with wheat flour: optimization of preparation conditions by response surface methodology. *Pak. J. Bot.* 45: 2027–2035.
- Wan Rosli, W.I, Solihah, M.A., Aishah, M., Nik Fakurudin, N.A., Mohsin, S.S.J. 2011. Colour, texture properties, cooking characteristic and fibre content of chicken patty added with oyster mushroom (*Pleurotus sajor-caju*). *Int. Food Res. J.* 18: 612–618.
- Wang, L., Guo, H., Liu, X., Jiang, G., Li, C., Li, X., Li, Y. 2019. Role of *Lentinula edodes* as the pork lean meat replacer in production of the sausage. *Meat Sci.* 156: 45–51.
- Wong, K.M., Corradini, M.G. Autio, W., Kinchla, A.J. 2018. Sodium reduction strategies through use of meat extenders (white button mushroom vs textures soy) in beef patties. *Food Sci. Nutr.* 7: 506–518.
- Yeater, M., Casco, G., Miller, R.K., Alvarado, C.Z. 2017. Comparative evaluation of texture wheat ingredients and soy proteins in the quality and acceptability of emulsified chicken nuggets. *Poult. Sci.* 96: 4430–4438.

ผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อคุณภาพด้านเคมีและกายภาพของเค้กกล้วยหอม

Effect of partial replacement of wheat flour with soy protein isolate on chemical and physical quality of banana cake

ปริยา รักษาเจริญ, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช*, นันทวัน เทอดไทย

Preeya Raksacharoen, 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: pitipom.r@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) ต่อคุณลักษณะของแบทเทอร์ (ด้านความหนืด) และเค้กกล้วยหอม (ด้านเคมีและกายภาพ) โดย SPI ที่ใช้ในการผลิตเค้กมีปริมาณโปรตีน 90.84% แทนที่แป้งสาลีที่ 0, 10, 20 และ 30% เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลโดยใช้สมการ Power law สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดีมากโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.997 มีค่าดัชนีการไหล (n) 0.45–0.56 แสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning และค่าดัชนีความข้นเหลว (K) ของแบทเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ SPI ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพด้านกายภาพของเค้ก ผลการวิเคราะห์คุณภาพของเค้กแสดงให้เห็นว่าค่า Browning index, ปริมาณโปรตีน, ไขมัน, เส้นใยหยาบ และเถ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ SPI ในขณะที่ค่า Specific volume, Springiness, Cohesiveness, Chewiness และปริมาณความชื้นมีค่าลดลง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SPI ใช้ในการผลิตเค้กเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการได้

คำสำคัญ: การทดแทนแป้งสาลี, เค้กกล้วยหอม, โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

Abstract

This study focused on the effect of partial replacement of wheat flour with soy protein isolate (SPI) on the characteristics of batter (viscosity) and banana cakes (chemical and physical qualities). SPI, which contains a high amount of crude protein (90.84%), was used to replace 0, 10, 20 and 30% of wheat flour to make cakes. The flow behavior test results provided a good fit ($R^2 > 0.997$) for the power law model. The flow behavior index (n) ranged from 0.45 to 0.56, which showed a shear thinning behavior. The consistency index (K) of batters increased with increasing SPI which affected the physical qualities of the resulting cakes. Also, the quality analysis of the cakes revealed that the contents of browning index, and the contents of protein, fat, fiber, and ash of cakes increased with increasing SPI content whereas the specific volume, springiness, cohesiveness, chewiness, and moisture content showed a reverse trend. In conclusion, SPI can be used in cake production to improve nutritional values.

Keywords: Banana cake, Soy protein isolate (SPI), Wheat replacement

คำนำ

ถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารที่หลากหลาย เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีน 36–40% มีกรดอะมิโนที่จำเป็นทั้ง 9 ตัว และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงถึง 86–88% จากข้อมูลสำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร พบว่าในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีความต้องการใช้ถั่วเหลืองถึง 4.04 ล้านตัน ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช อาหารสัตว์ และอาหารแปรรูป เช่น นำนมถั่วเหลือง ซีอิ๊ว และเต้าหู้ ซึ่งผลพลอยได้ที่สำคัญคือ กากถั่วเหลือง และส่วนใหญ่มักใช้เป็นวัตถุดิบของอาหารสัตว์

โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (Soy protein isolate, SPI) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกากถั่วเหลือง ด้วยการสกัดส่วนของโปรตีนออกมา โดยมีปริมาณโปรตีนสูงถึง 91.1–91.5% และไขมัน 0.1–0.3% จากสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลาย เช่น การให้ความคงตัวกับอิมัลชัน การเกิดโฟม (สิรินดา, 2554) ทำให้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดถูกนำไปใช้ในหลายๆ ผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์แปรรูปเนื้อสัตว์ (Paglarini et al., 2019) ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม (Chiang et al., 2021) รวมถึงผลิตภัณฑ์ขนมอบ มักใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นแหล่งโปรตีนและทดแทนแป้งสาลี เช่น เค้ก (Ronda et al., 2011) ขนมปัง (Crockett et al., 2011) และคุกกี้ (Ogunbusola et al., 2020) อย่างไรก็ตามการใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากมีกลิ่นเฉพาะตัวของถั่วเหลืองซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมโปรตีนจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัด จึงต้องทำการศึกษหาปริมาณที่เหมาะสมและปรับปรุงคุณลักษณะทางด้านกลิ่นรส เพื่อกลบกลิ่นของถั่วเหลืองให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

เค้กกล้วยหอมเป็นเค้กชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จักอย่างมากในประเทศไทย เนื่องจากลักษณะปรากฏและกลิ่นรสที่เป็นเอกลักษณ์ มีวัตถุดิบหลัก คือ แป้งสาลี ไขมัน น้ำตาล และกล้วยหอม จึงมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและไขมันสูง จากงานวิจัยของ ผกาวดี (2559) พบว่า เค้กกล้วยหอมมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 44.48% ไขมัน 19.04% โปรตีน 4.08% และเถ้า 1.20% ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญกับการรับประทานอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น การเพิ่มปริมาณโปรตีนให้แก่เค้กกล้วยหอมโดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดทดแทนแป้งสาลี จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าและคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์ โดยการใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อองค์ประกอบทางเคมีและคุณภาพทางกายภาพของเค้กกล้วยหอม

อุปกรณ์และวิธีการ

การวางแผนการทดลองและการเตรียมตัวอย่างเค้กกล้วยหอม

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดทดแทนแป้งสาลีบางส่วนต่อคุณภาพทางเคมีและทางกายภาพของเค้กกล้วยหอม โดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดทางการค้า (กรุงเทพเคมี, ประเทศจีน) แปรผันปริมาณการแทนที่ 4 ระดับคือ 0, 10, 20 และ 30% ของน้ำหนักแป้งสาลีทั้งหมด วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ดัดแปลงเค้กกล้วยหอมสูตรพื้นฐานจาก ผกาวดี (2559) การเตรียมตัวอย่างเค้กเริ่มจากร่อนแป้งเค้ก 100 กรัม ผงฟู 3.4 กรัม และเบคกิ้งโซดา 1.1 กรัม เข้าด้วยกัน ใช้เครื่อง Kitchen Aid (5KSM175PSEFL, KitchenAid, United States) ตีผสมไข่ไก่ 94.7 กรัม น้ำตาลทรายขาว 85.7 กรัม และเกลือ 1.5 กรัม ด้วยความเร็วสูง 5–7 นาที จนขึ้นฟู เติมน้ำที่ร้อนแล้วคนผสมต่อด้วยความเร็วต่ำ 2 นาที จากนั้นเติมน้ำมันรำข้าว 57.2 กรัม ผสมต่อด้วยความเร็วปานกลาง 2 นาที และสุดท้ายเติมกล้วยหอมสุกบด 85.7 กรัม ผสมต่อด้วยความเร็วต่ำ 1 นาที เทส่วนผสมลงในพิมพ์ขนาดก้นกว้าง 30 มม. สูง 20 มม. ชั่งน้ำหนัก 13–14 กรัมต่อถ้วย อบเค้กด้วยเครื่อง Convection oven (DH4B-B, LinkRich, Russia) ที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 15–20 นาที พักให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและบรรจุในกล่องพลาสติกที่ปิดไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เค้กมีความชื้นสมดุลก่อนทำการวิเคราะห์คุณภาพ

การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด แป้งสาลี และเค้กทั้ง 4 สิ่งทดลองตามวิธีการของ AOAC (2000) ได้แก่ วิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (FD115, Binder, Germany) ที่อุณหภูมิ 105°C จนทราบน้ำหนักคงที่, วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนวิธี Kjeldahl method ด้วยชุดย่อยโปรตีน (Digestion Unit K-435, Buchi, Switzerland) และเครื่องกลั่นไนโตรเจน (KjelFlex K-360, Buchi, Switzerland), วิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยเครื่อง Autosoxlet extraction unit (E-816, Buchi, Switzerland), วิเคราะห์ปริมาณเถ้าโดยเผาตัวอย่างในเตาเผาเถ้า (ELF11/14, Carbolite, Germany) ที่อุณหภูมิ 550 °C จนกระทั่งได้เถ้าสีขาว, วิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบด้วยเครื่อง Hot extraction unit (Fibertec 8000, FOSS, Sweden) และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตจากสมการ (Equation 1) ทำการวิเคราะห์สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ รายงานผลเป็นค่าร้อยละน้ำหนักแห้ง (%db)

$$\text{คาร์โบไฮเดรต (\%)} = 100 - (\text{ปริมาณ ความชื้น} + \text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{เถ้า} + \text{เส้นใยหยาบ}) \quad (1)$$

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

วิเคราะห์ความหนืดของแบทเทอร์ ดัดแปลงจากวิธีการของ Ronda et al. (2011) ใช้เครื่อง Brookfield viscometer (DV-III ULTRA Programmable Rheometer, United States) ใช้หัววัดเบอร์ 29 ความเร็วรอบในการหมุนในช่วง 10–90 rpm ควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างที่ 25 ± 1 °C วัดค่า Shear stress (σ) และ Shear rate ($\dot{\gamma}$) นำข้อมูลมาสร้างกราฟและอธิบายความสัมพันธ์ด้วยสมการ Power law (Equation 2)

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

โดย K คือ ค่าดัชนีความข้นเหลว (Consistency index) และ n คือ ค่าดัชนีการไหล (Flow behavior index) วิเคราะห์สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ

วิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักหลังการอบ (Baking loss) ของเค้ก ดัดแปลงจากวิธีของ Milicevic et al. (2020) นำแบทเทอร์ของเค้กถ้วยหอมก่อนอบมาชั่งน้ำหนัก (W1) และนำเค้กขึ้นเตาอบมาชั่งน้ำหนักหลังอบเสร็จ (W2) วิเคราะห์สิ่งทดลองละ 5 ซ้ำ คำนวณหาการสูญเสียน้ำหนักหลังการอบจากสมการ (Equation 3)

$$\text{Baking loss (\%)} = [(W1 - W2) / W1] \times 100 \quad (3)$$

วิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) ของเค้ก ตามวิธีการของ TIS.(374-2534) ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเค้ก (W) จากนั้นใส่เค้กลงในภาชนะเติมเมล็ดงาให้เต็ม วัดปริมาตรของเมล็ดงาที่ใช้เติมลงไป (A) และวัดปริมาตรเมล็ดงาของภาชนะเปล่า (B) วิเคราะห์สิ่งทดลองละ 5 ซ้ำ หาปริมาตรจำเพาะจากสมการ (Equation 4)

$$\text{Specific volume (ml/g)} = (B - A) / (W) \quad (4)$$

วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเค้ก ดัดแปลงจากวิธีของ Huang and Yang (2019) โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom) ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) ใช้หัววัดแบบจานเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 75 มม. กำหนดสภาวะในการวัด ดังนี้ load cell 50 กก., pre-test speed 5 มม./วินาที, test speed 1 มม./วินาที, post-test speed 1 มม./วินาที และกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทางครึ่งหนึ่งของความสูงตัวอย่าง

วิเคราะห์ตัวอย่างทั้งขึ้นโดยนำตัวอย่างออกจากพิมพ์ก่อนการวิเคราะห์ ทำการวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness, N) ค่าการคืนตัว (Springiness) ค่าการยึดเกาะ (Cohesiveness) และแรงที่ใช้ในการเคี้ยว (Chewiness, N) สิ่งทดลองละ 10 ซ้ำ วิเคราะห์ค่าสีของเค้ก ดัดแปลงจากวิธีของ Konak et al. (2017) ใช้เครื่อง Spectrophotometer (UltraScan PRO, HunterLab, United States) วิเคราะห์ค่าสีด้วยระบบ CIE $L^* a^* b^*$ สิ่งทดลองละ 5 ซ้ำ ค่าสีที่วัด ได้แก่ L^* (แสดงความสว่าง), a^* (แสดงถึงสีแดงและสีเขียว) และ b^* (แสดงถึงสีเหลืองและสีน้ำเงิน) หาค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index) จากสมการ (Equation 5)

$$\text{Browning index} = \frac{100(x-0.31)}{0.17}, \quad x = \frac{a^*+1.75L^*}{5.645L^*+a^*-3.012b^*} \quad (5)$$

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำค่าคุณภาพเคมีและกายภาพของเค้กกล้วยหอมมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range ค่าคุณภาพทางเคมีของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและแป้งสาลี เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Independent-Sample t-Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมทางสถิติสำเร็จรูป SPSS for Windows version 28.0 (IBM Co., New York, United States)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณภาพทางเคมีของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด แป้งสาลี และเค้กกล้วยหอม

Table 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและแป้งสาลีที่ใช้เป็นวัตถุดิบของเค้กกล้วยหอม เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีด้านปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่า มีมากกว่าแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าแป้งสาลีถึง 80% แสดงให้เห็นว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นแหล่งโปรตีนที่สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่เค้กกล้วยหอมได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณคาร์โบไฮเดรตของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีน้อยกว่าแป้งสาลี ($p \leq 0.05$) ดังนั้นการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดจึงอาจส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพของเค้กได้ (Sahagún et al., 2018)

Table 1 Chemical compositions (%db) of wheat flour, soy protein isolate (SPI) and banana cakes replacement with soy protein isolate at different levels.

Chemical compositions (%db)	Raw materials		Banana cake samples			
	SPI	Wheat flour	SPI 0%	SPI 10%	SPI 20%	SPI 30%
Moisture	7.27±0.15 ^B	12.42±0.21 ^A	34.20±0.06 ^a	31.38±0.49 ^b	31.53±0.21 ^b	31.60±0.12 ^b
Protein	90.84±0.39 ^A	10.21±0.21 ^B	9.02±0.01 ^d	12.52±0.06 ^c	15.44±0.10 ^b	18.92±0.22 ^a
Fat	0.73±0.03 ^A	0.15±0.01 ^B	23.26±0.09 ^b	23.45±0.06 ^b	23.97±0.08 ^a	23.90±0.03 ^a
Ash	6.01±0.01 ^A	0.61±0.02 ^B	2.07±0.07 ^b	2.54±0.03 ^a	2.62±0.09 ^a	2.65±0.05 ^a
Fiber	0.45±0.01 ^A	0.31±0.02 ^B	0.47±0.03 ^c	0.50±0.01 ^c	0.83±0.01 ^b	1.49±0.15 ^a
Carbohydrate	1.97±0.37 ^B	88.72±0.18 ^A	65.17±0.00 ^a	60.99±0.14 ^b	57.14±0.10 ^c	54.67±0.13 ^d

Means in rows followed by different superscript letters are significantly different ($p \leq 0.05$). Upper case letters indicate the significant differences within raw materials and lower case letters indicate the significant differences within banana cake samples.

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเค้กกล้วยหอมดัง Table 1 เมื่อทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพิ่มมากขึ้น ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบของเค้กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม พบว่า เค้กที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นจาก 9% เป็น 12–19% หากคำนวณปริมาณโปรตีน ต่อ 1 หน่วยปริมาตรของเค้ก พบว่า เค้กที่เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดสามารถกล่าวอ้างได้ว่าผลิตภัณฑ์เป็นแหล่งของโปรตีน โดยมีโปรตีน 6.26–8.64 กรัมต่อ 1 หน่วยปริมาตร (50 กรัม) คิดเป็น 12.52–17.28% ของ Thai RDI (50 กรัมต่อวัน) (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข จ.182 พ.ศ. 2541) ในขณะที่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของเค้กลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เป็นวัตถุดิบ และปริมาณความชื้นของเค้กที่มีการใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม สอดคล้องกับค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังอบ (Baking loss) ที่เพิ่มขึ้นใน Table 3 เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติ Water absorption capacity ของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีค่า 4.1 g water/g protein (Dominguez et al., 2021) และแป้งสาลีมีค่า 2.0–2.1 g water/g protein (Gutierrez et al., 2002) ถึงแม้ว่าแป้งสาลีจะมีคุณสมบัติการดูดซับน้ำได้น้อยกว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัด แต่ด้วยคุณสมบัติของโครงร่างกลูเตนมีความยืดหยุ่นในโครงสร้างผลิตภัณฑ์ จึงมีส่วนช่วยให้มีการกักเก็บน้ำในระหว่างการอบได้ดี เมื่อปริมาณกลูเตนในส่วนผสมที่น้อยลงทำให้การกักเก็บน้ำระหว่างอบได้น้อยลง (Mau et al., 2017)

คุณภาพทางกายภาพของเค้กกล้วยหอม

Fig. 1A แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Shear stress) และอัตราเฉือน (Shear rate) และ Fig. 1B แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) และอัตราเฉือนของแบทเทอร์ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในระดับต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น และความหนืดปรากฏของแบทเทอร์ลดลงในทุกสิ่งทดลอง จาก Fig. 1B เมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนเดียวกัน พบว่า การทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนืดปรากฏสูงขึ้น

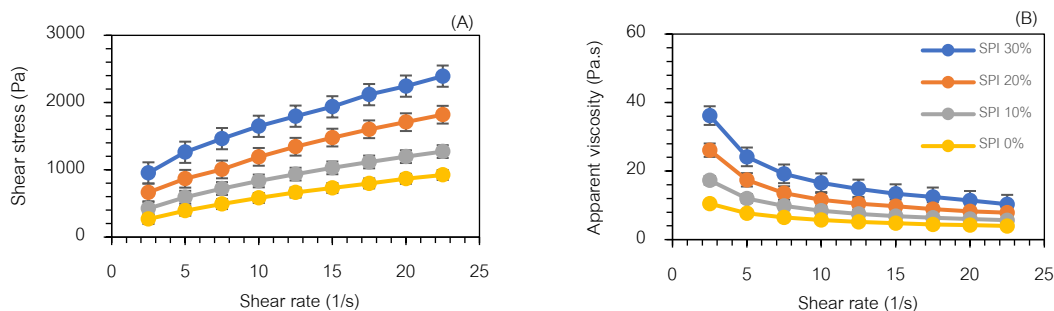


Fig.1. Relations of shear rate and shear stress (A), shear rate and apparent viscosity (B) of batters supplemented with soy protein isolate (SPI) at different levels.

Table 2 แสดงผลสถิติจากการใช้สมการ Power law อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของแบทเทอร์ทั้ง 4 สิ่งทดลอง พบว่าสมการ Power law สามารถอธิบายพฤติกรรมกรไหลของแบทเทอร์ได้ดีมาก โดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.997 ซึ่งแบทเทอร์ของทุกสิ่งทดลองแสดงพฤติกรรมกรไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) เนื่องจากค่าดัชนีการไหล (Flow behavior index; n) อยู่ในช่วง 0.4–0.5 (Huang and Yang, 2019) เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความข้นเหลว (Consistency index; K) พบว่า ค่าดัชนีความข้นเหลวมากขึ้นเมื่อปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าแบทเทอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากความสามารถในการดูดซับน้ำหรือความสามารถในการจับน้ำที่สูงขึ้นจากโครงสร้างโปรตีนที่มีมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณของน้ำอิสระ (Free water) ในแบทเทอร์ลดลง (Indriani et al., 2020) ประกอบกับเส้นใยหยาบที่มีมากขึ้น ส่งผลให้เค้กมีปริมาตรจำเพาะ

(Specific volume) ลดลง เนื่องจากเส้นใยหยาบมีคุณสมบัติในการจับน้ำและไขมัน ทำให้เบทเทอร์มีความคงตัวมากขึ้น จึงทำให้อากาศเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น (Segundo et al., 2017)

Table 2 Rheological properties of batters substituted with soy protein isolate (SPI) at different levels.

Rheological properties	SPI 0%	SPI 10%	SPI 20%	SPI 30%
Consistency index (K)	15.660±0.099 ^d	27.283±0.294 ^c	41.850±0.546 ^b	59.498±0.504 ^a
Flow behavior index (n)	0.562±0.011 ^a	0.493±0.006 ^b	0.457±0.016 ^c	0.447±0.009 ^c
R ²	0.999	0.999	0.997	0.998

Means in row followed by different superscript letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

เมื่อพิจารณาปริมาตรจำเพาะของเค้กกล้วยหอม Table 3 พบว่า การทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะมีค่าลดลง เนื่องจากการทดแทนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทำให้เบทเทอร์มีความหนืดมากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวของฟองอากาศเกิดยากในระหว่างการอบในช่วงแรก (Sahagún et al., 2018) เนื่องจากโครงสร้างของกลูเตนจะมีลักษณะที่ยืดหยุ่น จึงมีผลให้ความสามารถในการกักอากาศในเบทเทอร์ระหว่างการผสมและอบน้อยลงทำให้ปริมาตรจำเพาะลดลง (Aslan and Bilgiçli, 2021)

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพเนื้อสัมผัสของเค้กกล้วยหอม Table 3 พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ส่วนค่าการคืนตัว (Springiness) ค่าการยึดเกาะ (Cohesiveness) และแรงที่ใช้ในการเคี้ยว (Chewiness) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากเค้กมีโครงสร้างกลูเตนจากแป้งสาลีน้อยลง โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างกลูเตนมีหน้าที่ทำให้เค้กมีเนื้อสัมผัสคงรูปและยึดเกาะกัน (Ramírez et al., 2016)

Table 3 Physical properties of banana cakes substituted with soy protein isolate (SPI) at different levels.

Cake samples	Specific volume (g/ml)	Baking weight loss (%)	Hardness (N)	Springiness	Cohesiveness	Chewiness (N)
SPI 0%	2.01±0.05 ^a	11.63±0.31 ^c	10.157±0.257 ^a	0.907±0.003 ^a	0.607±0.008 ^a	5.588±0.156 ^a
SPI 10%	1.95±0.01 ^{ab}	17.91±0.13 ^b	10.337±0.419 ^a	0.892±0.003 ^b	0.572±0.006 ^b	5.271±0.233 ^b
SPI 20%	1.95±0.03 ^{ab}	18.07±0.25 ^{ab}	10.361±0.408 ^a	0.875±0.018 ^c	0.548±0.010 ^c	4.968±0.247 ^c
SPI 30%	1.93±0.05 ^b	18.36±0.14 ^a	10.430±0.499 ^a	0.870±0.005 ^c	0.536±0.017 ^c	4.865±0.301 ^c

Means in columns followed by different superscript letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

Fig. 2 แสดงลักษณะปรากฏของเค้กกล้วยหอมที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาตรจำเพาะของเค้ก Table 3 เมื่อวิเคราะห์ค่าสีของเค้กหลังจากอบ 1 วัน โดยทำการวัดที่เปลือกด้านนอก Table 4 พบว่า สีของเค้กที่มีการทดแทนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดส่งผลให้ค่า L* และค่า b* ลดลง ในขณะที่ค่า a* และค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม เป็นผลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reactions) ระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโน และกระบวนการคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) ของน้ำตาลระหว่างการอบ ดังนั้นเค้กที่มีปริมาณโปรตีนสูงจึงเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้มากกว่าเค้กที่มีปริมาณโปรตีนน้อย (Sahagún et al., 2018)



Fig.2. The appearance of banana cakes substituted with soy protein isolate (SPI) at different levels.

Table 4 Color properties of banana cakes substituted with soy protein isolate (SPI) at different levels.

Cake samples	L*	a*	b*	Browning index
SPI 0%	49.51±0.16 ^a	14.71±0.29 ^b	41.43±0.12 ^a	167.59±1.51 ^c
SPI 10%	47.23±0.11 ^b	15.51±0.25 ^a	40.13± 0.22 ^b	173.71± 1.38 ^b
SPI 20%	44.56±0.24 ^c	15.59±0.32 ^a	59.13± 0.63 ^{ab}	186.14± 0.79 ^a
SPI 30%	44.43±0.22 ^c	15.75±0.20 ^a	39.43± 0.21 ^c	187.59± 1.80 ^a

Means in columns followed by different superscripts letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

สรุป

การทดแทนแป้งสาลีด้วยโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองที่ระดับ 0–30% ในเค้กกล้วยหอมมีผลทำให้คุณภาพทางเคมีและกายภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยการทดแทนโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นและคาร์โบไฮเดรตลดลง และค่าการคืนตัว ค่าการยืดเกาะ แรงที่ใช้ในการเคี้ยว ปริมาตรจำเพาะ และค่า L* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังอบของเค้ก และค่าดัชนีสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการทดแทนด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดส่งผลต่อคุณภาพของเค้ก จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านการยอมรับของผู้บริโภคเพื่อหาระดับการทดแทนที่เหมาะสมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนองานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60

เอกสารอ้างอิง

- ผกาวัต ภูจันทร์. 2559. ผลการเสริมผงเปลือกกล้วยต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เค้กกล้วยหอม. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว. 32: 228–238.
- สิรินดา กุสุมภ์, ณัฐฐา มณีศิลาสันต์ และ วรสิทธิ์ หวังอนุตตร. 2554. การทดแทนนมผงขาดมันเนยด้วยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในไอศกรีมไขมันต่ำ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 19: 48–59.
- สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข. 2541. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 182 พ.ศ.2541 ฉลากโภชนาการ. <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2541/D/047/23.PDF>, 10 พฤศจิกายน 2564.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2534. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งสาลีชนิดทำขนมปัง มอก374- 2534. https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf_files/tis/a374-25xx.pdf, 1 มิถุนายน 2564.
- สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2563. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า ปี 2563. <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2564/commodity2563.pdf>, 10 มิถุนายน 2564.
- AOAC. 2000. Official methods of analysis of AOAC international. Maryland: USA.

- Aslan, M., Bilgiçli, N. 2021. Improvement of functional cake formulation with fermented soy (*Glycine max*) and lupin (*Lupinus albus L*) powders. *Int. J. Gastron. Food Sci.* 26: 100429. doi: 10.1016/j.ijgfs.2021.1004 29.
- Chiang, J.H., Tay, W., Ong, D.S.M., Liebl, D., PengNg, C., Henry, C.J. 2021. Physicochemical, textural and structural characteristics of wheat gluten-soy protein composited meat analogues prepared with the mechanical elongation method. *Food Struct.* 28: 100183. doi: 10.1016/j.foostr.2021.100183.
- Crockett, R., le, P., Vodovotz, Y. 2011. Effects of soy protein isolate and egg white solids on the physicochemical properties of gluten-free bread. *Food Chem.* 129: 84–91.
- Domínguez, L.A., Ronzon, Y.C., Beltran, L.A., Martinez, E.H. 2021. Effect of a cryogenic treatment in the microstructure, functional and flow properties of soy protein isolate. *Food Hydrocoll.* 119: 106871. doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.1068 71.
- Gutierrez, A.D.R., Guilbert, S., Cuq, B. 2002. Distribution of water between wheat flour components: A dynamic water vapour adsorption study. *J. Cereal Sci.* 36: 347–355.
- Huang, M., Yang, H. 2019. Eucheuma powder as a partial flour replacement and its effect on the properties of sponge cake. *LWT-Food Sci. Technol.* 110: 262–268.
- Indriana, S., Karimb, M.S.B., Nalinanona, S., Karnjanapratuma, S. 2020. Quality characteristics of protein-enriched brown rice flour and cake affected by Bombay locust (*Patanga succincta L*) powder fortification. *LWT-Food Sci. Technol.* 119: 1088762. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108876.
- Konak, U.I., Certel, M., Karaka, B. 2017. Effects of ultraviolet irradiation of batter and different baking methods on cake quality. *J. microbial., biotechnol. food sci.* 7: 113–117.
- Mau, J.L., Lee, C.C., Chen, Y.P., Lin, S.D. 2017. Physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of chiffon cake prepared with black rice as replacement for wheat flour. *LWT-Food Sci. Technol.* 75: 434–439.
- Milicevic, N., Saka, M., Hadnaev, M., Skrobot, D., Saric, B., Hadnaev, T.D., Jovanov, P., Pezo, L. 2020. Physicochemical properties of low-fat cookies containing wheat and oat bran gels as fat replacers. *J. Cereal Sci.* 95: 103056. doi: 10.1016/j.jcs.2020.103056.
- Ogunbusola, E.M., Alabi, O.O., Sanni, T.A., Seidu, K.T., Oke, H.O., Akinwale, O.R. 2020. Assessment of gluten-free cookies made from rice and soy protein isolate blends. *J. microbial., biotechnol. food sci.* 9: 899–906.
- Paglarinia, C.d.S., Martinib, S., Pollonio, M.R. 2019. Using emulsion gels made with sonicated soy protein isolate dispersions to replace fat in frankfurters. *LWT-Food Sci. Technol.* 99: 453–459.
- Ramírez, M.D., Domínguez, G.C., Garibay, M.G., Guzm, J.J., Carvajal, A.V., Cruz, M.P.S., Coter, D.A. Ramírez, E.D.M. 2016. Effect of whey protein isolate addition on physical, structural and sensory properties of sponge cake. *Food Hydrocoll.* 61: 633–639.
- Ronda, F., Oliete, B., Gómez, M., Caballero, P.A., Pando, V. 2011. Rheological study of layer cake batters made with soybean protein isolate and different starch sources. *J. Food Eng.* 102: 272–277.
- Sahagún, M., BravoNúñez, A., Bascónes, G., Gómez, M. 2018. Influence of protein source on the characteristics of gluten-free layer cakes. *LWT-Food Sci. Technol.* 94: 50–56.
- Segundo, C., Román, L., Gómez, M., Martínez, M.M. 2017. Mechanically fractionated flour isolated from green bananas (*M. cavendishii* var. *nanica*) as a tool to increase the dietary fiber and phytochemical bioactivity of layer and sponge cakes. *Food Chem.* 219: 240–248.

ผลของคาร์ราจีแนนและระยะเวลาการอบแห้งต่อคุณภาพบางประการของกัมมีเยลลี่

Effect of carrageenan and drying time on selected qualities of gummy jelly

วรพต สวนคร้ามดี, เบญจมาศ จิรคชาพร, เทพกัญญา หาญศิลวัต*

Worapot Suankramdee, Benjamath Jirakachaporn, 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

กัมมีเยลลี่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้เจลาตินเป็นสารก่อเจล ทำให้ผู้ที่ไม่รับประทานเนื้อสัตว์ไม่สามารถรับประทานได้ คาร์ราจีแนนเป็นหนึ่งในสารก่อเจลที่ผลิตมาจากสาหร่ายสีแดง แต่ในการใช้งานต้องมีการอบแห้งหลังกระบวนการเนื่องจาก เจลของคาร์ราจีแนนคายน้ำออกมาหลังเซ็ทตัว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคาร์ราจีแนนและระยะเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพของกัมมีเยลลี่ โดยศึกษาปริมาณคาร์ราจีแนนที่ 1.0% 1.2% 1.5% และ 2.0% และระยะเวลาการอบแห้งที่ 0, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์ราจีแนนทำให้กัมมีเยลลี่มีค่า hardness, cohesiveness, gumminess และ springiness เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งส่งผลให้ค่า hardness, springiness chewiness, gumminess และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของกัมมีเยลลี่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลง จากการศึกษาทำให้ทราบแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่โดยใช้คาร์ราจีแนนเป็นส่วนผสม

คำสำคัญ: กัมมีเยลลี่, คาร์ราจีแนน, คุณภาพ, ระยะเวลาในการอบแห้ง

Abstract

Gummy jelly generally uses gelatin as a gelling agent, therefore vegetarians cannot consume this type of product. Carrageenan is a gelling agent produced from red algae. However, due to syneresis after setting, drying of gummy jelly is needed. Therefore, the objective of this research was to study the effect of carrageenan and drying time on the qualities of gummy jelly. This study investigated on carrageenan content at 1.0% 1.2% 1.5%, and 2.0% and drying time at 0, 12, 24, 36, and 48 hours. The results showed that increasing the amount of carrageenan increased hardness, cohesiveness, gumminess, and springiness of gummy jelly. Increasing drying time increased hardness, springiness, chewiness, gumminess, and total soluble solids content while the water activity was decreased. This study can be used as a guideline for developing gummy jelly products using carrageenan as a gelling agent.

Keywords: Carrageenan, Drying time, Gummy jelly, Quality

คำนำ

กัมมี่เยลลี่หรือเยลลี่แห้งเป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่มีส่วนประกอบของสารก่อเจล เช่น เจลาติน ผสมกับสารให้ความหวาน ได้แก่ น้ำตาล และกลูโคสไซรัป (Jiamjariyatam, 2018) เจลาตินเป็นโปรตีนที่สกัดได้จากส่วนของคอลลาเจนในกระดูกและหนังสัตว์ เช่น หนังหมู, กระดูกโค, กระดูกกระบือ, และหนังปลา เป็นต้น (มีทนา และคณะ, 2552) ทำให้ผู้ที่ไม่รับประทานเนื้อสัตว์ หรือผลิตภัณฑ์จากสัตว์ไม่สามารถรับประทานกัมมี่เยลลี่ที่ใช้เจลาตินเป็นสารก่อเจลได้ ในปัจจุบันมีผู้ที่ลดการรับประทานเนื้อสัตว์ หรือไม่รับประทานเนื้อสัตว์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผู้บริโภคให้ความสำคัญกับเรื่องสุขภาพมากขึ้น ปัจจัยในเรื่องของสิ่งแวดล้อม และผู้บริโภคมีความตระหนักถึงสวัสดิภาพสัตว์ โดยในปี พ.ศ. 2556 สัดส่วนของประชากรไทยที่ไม่รับประทานเนื้อสัตว์ มีร้อยละ 4 ในขณะที่ในปี พ.ศ. 2560 มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 12 ของประชากรไทยอายุ 6 ปีขึ้นไป (เรไร, 2564) คาร์ราจีแนน เป็นคาร์โบไฮเดรตที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเล นิยมใช้เป็นสารก่อเจล และสามารถใช้ในการผลิตอาหารฮาลาลได้ (สถาบันฮาลาลมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2557) คาร์ราจีแนนที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ได้แก่ แคปป้าคาร์ราจีแนน แต่เจลของแคปป้าคาร์ราจีแนนมักมีการปล่อยของเหลว (syneresis) ออกมาหลังจากแช่หัตว์ (Ako, 2015) ในการนำมาใช้กัมมี่เยลลี่จึงต้องมีการนำกัมมี่เยลลี่ไปอบแห้งเพื่อลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ และยืดอายุการเก็บรักษา งานวิจัยของ Utomo et al. (2014) ที่ได้ศึกษาผลของปริมาณสารก่อเจลระหว่างคาร์ราจีแนน และผงบุกในอัตราส่วนต่างๆ ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างพบว่ามีการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50–60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากกัมมี่เยลลี่แช่หัตว์ในพิมพ์ เพื่อให้ตัวอย่างแห้ง นอกจากนี้ Delgado and Banon (2014) ได้ศึกษาผลของระยะเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพของกัมมี่เยลลี่ พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งกัมมี่เยลลี่ ส่งผลให้ความชื้น และวอเตอร์แอกติวิตีของกัมมี่เยลลี่มีค่าลดลง ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้, ค่า hardness, gumminess, chewiness และ springiness มีค่าสูงขึ้น และจากงานวิจัยของ Rochmawati and Ermawati (2021) ที่ได้ศึกษาปริมาณของคาร์ราจีแนนต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ต่อผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ขมิ้น พบว่าการเพิ่มปริมาณคาร์ราจีแนนส่งผลให้ความแข็งแรงของเจลกัมมี่เยลลี่เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความชื้นลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรดต่าง และน้ำหนักของกัมมี่เยลลี่ จากข้อมูลดังกล่าวจึงควรพิจารณาการเลือกใช้ส่วนผสมให้เหมาะสมเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคที่ไม่รับประทานเนื้อสัตว์ หรือผลิตภัณฑ์จากสัตว์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคาร์ราจีแนน และระยะเวลาการอบแห้งต่อคุณภาพบางประการของกัมมี่เยลลี่ เพื่อเป็นทางเลือกในการพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ในรูปแบบที่หลากหลายและเหมาะสมกับพฤติกรรมของผู้บริโภคในปัจจุบัน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

คาร์ราจีแนน (RS025, Greenfresh), น้ำเชื่อมกลูโคส ตราลินซ์, น้ำตาลทรายขาว ตรามิตรผล, กรดซิตริก (กรุงเทพเคมี), กลิ่นมะม่วง (IMCD), สีผสมอาหารสีเหลือง ตราวินเนอร์, และแบะแซ ตราช้าง 5 ดาว

1. การเตรียมตัวอย่างกัมมี่เยลลี่

เตรียมตัวอย่างกัมมี่เยลลี่ตามปริมาณส่วนผสมที่แสดงใน Table 1 เริ่มจากการเตรียมส่วนผสมของคาร์ราจีแนน โดยนำคาร์ราจีแนนผสมกับกลูโคสไซรัป จากนั้นเติมน้ำตาลทรายและน้ำส่วนที่ 1 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที โดยมีการคนตลอดเวลาจนมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 71°Brix จะได้สารละลายคาร์ราจีแนนที่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบ นำส่วนผสมอีกส่วน ได้แก่ กรดซิตริก โซเดียมซิเตรท กลิ่น และสี ผสมกับน้ำส่วนที่ 2

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จะได้สารละลายส่วนที่ 2 นำมาเติมในสารละลาย คาร์ราจีแนน ผสมให้เข้ากัน แล้วเทใส่พิมพ์ขณะร้อน (อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส) ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 5 องศาเซลเซียส) จนตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 30–35 องศาเซลเซียส จะได้ตัวอย่างกัมมี่เยลลี่ที่ยังไม่แข็ง นำตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง $1.5 \times$ ยาว $1.5 \times$ สูง 1.5 เซนติเมตร นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงจนมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด $83 \pm 0.5^\circ \text{Brix}$ จะได้ตัวอย่างกัมมี่เยลลี่แห้ง เก็บตัวอย่างในภาชนะบรรจุที่กันความชื้นและอากาศ เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่อไป (ดัดแปลงวิธีการจากบริษัท IMCD ประเทศไทย)

Table 1 Gummy jelly formulations containing different amounts of carrageenan

Ingredients	Carrageenan content (%w/w)			
	1.0	1.2	1.5	2.0
Glucose syrup	48.0	48.0	48.0	48.0
White sugar	20.6	20.6	20.6	20.6
Carrageenan	1.0	1.2	1.5	2.0
Citric acid	0.8	0.8	0.8	0.8
Sodium citrate	1.6	1.6	1.6	1.6
Flavor	0.2	0.2	0.2	0.2
Color	0.1	0.1	0.1	0.1
Water (1)	25.7	25.5	25.2	24.7
Water (2)	2	2	2	2

2. การศึกษาผลของปริมาณคาร์ราจีแนนต่อคุณภาพทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัสของกัมมี่เยลลี่

เตรียมตัวอย่างกัมมี่เยลลี่ ตามวิธีการในข้อ 1 นำตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง $1.5 \times$ ยาว $1.5 \times$ สูง 1.5 เซนติเมตร นำไปวัดค่าเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT Plus, Stable Micro Systems, UK) โดยใช้หัววัดทรงกระบอกขนาด 35 มิลลิเมตร ตั้งค่า pre-test speed 2 มิลลิเมตรต่อวินาที test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที post-test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะห่างระหว่างหัววัดกับตัวอย่าง 10 มิลลิเมตร trigger force 5 กรัม (Mutlu et al., 2018)

3. การศึกษาผลของระยะเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพทางเคมีและกายภาพของกัมมี่เยลลี่

เตรียมตัวอย่างกัมมี่เยลลี่ ตามวิธีการในข้อ 1 นำตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง $1.5 \times$ ยาว $1.5 \times$ สูง 1.5 เซนติเมตร นำไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 55 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ นำตัวอย่างที่ได้มาวัดค่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ($^\circ \text{Brix}$) โดยการนำตัวอย่างสไลด์เป็นแผ่นบางขนาด 3 มิลลิเมตร จากนั้นกดลงในเครื่องวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (PAL-2, Atago, Japan) อ่านค่าที่ได้จดบันทึกผล ทำการวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) โดยการนำตัวอย่างกัมมี่เยลลี่บดให้ละเอียด ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 1 กรัม ลงในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 9 มิลลิลิตร คนผสมด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปวัดปริมาณความเป็นกรดต่างด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (8685, AZ Instrument, Taiwan) ทำการคำนวณค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ด้วยการนำตัวอย่างกัมมี่เยลลี่บดให้ละเอียด นำไปวัดค่าในเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (TE, Aqua Lab Series 3, USA) ที่อุณหภูมิ 25 ± 0.5 องศาเซลเซียส และทำการวัดค่าเนื้อสัมผัส เช่นเดียวกับข้อ 2

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) โดยใช้แบบการทดลองแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) พร้อมทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของปริมาณของคาร์ราจีแนนต่อคุณภาพทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัสของกัมมีเยลลี่

ผลการศึกษาปริมาณของคาร์ราจีแนนต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกัมมีเยลลี่ 4 ระดับ ได้แก่ 1.0% 1.2% 1.5% และ 2.0% w/w แสดงดัง Table 2 พบว่าปริมาณคาร์ราจีแนนมีผลต่อค่า hardness, cohesiveness, gumminess และ springiness แต่ไม่มีผลต่อค่า chewiness โดยตัวอย่างที่มีปริมาณคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น ค่า hardness, cohesiveness, gumminess และ springiness ของตัวอย่างกัมมีเยลลี่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์ราจีแนนทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของกัมมีเยลลี่ร่วมกับน้ำตาล การเพิ่มปริมาณคาร์ราจีแนนจึงส่งผลต่อค่าคุณภาพทางเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง ผลที่ออกมามีความสอดคล้องกับกุสุมา และนันทน (2559) ซึ่งทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่ธัญพืชเพื่อสุขภาพโดยมีการใช้สารก่อเจลผสมระหว่างคาร์ราจีแนน และกลูโคแมนแนน ในอัตราส่วน 9:1 จำนวน 3 ระดับที่ 0.8% 1.0% และ 1.2% พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารก่อเจลจะส่งผลให้ค่า hardness gumminess และ springiness เพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่อปริมาณสารก่อเจลเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างแบบร่างตาข่ายมีความหนาแน่นมากขึ้น จึงส่งผลให้เจลมีความแข็งแรงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจล (Kaya et al., 2015)

Table 2 Effect of carrageenan on textural properties of gummy jelly

Carrageenan (% w/w)	Hardness (N)	Cohesiveness	Gumminess	Springiness	Chewiness ^{ns} (N)
1.0	11802.90±568.90 ^d	2.62±0.62 ^b	2451.59±879.87 ^b	1.58±0.23 ^b	1557.29±465.88
1.2	13927.94±750.96 ^c	3.21±0.93 ^{ab}	2636.76±556.58 ^b	1.79±0.34 ^b	1208.79±299.05
1.5	16762.94±864.50 ^b	3.14±1.12 ^{ab}	2950.65±1007.14 ^b	2.56±0.08 ^a	1567.98±410.32
2.0	22638.51±2089.24 ^a	4.23±0.52 ^a	3749.48±514.29 ^a	2.39±0.31 ^a	1333.86±335.26

*Means±SD within columns with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$) (ns) not significant

2. ผลของระยะเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพทางเคมีและกายภาพของกัมมีเยลลี่

ผลของระยะเวลาในการอบแห้งกัมมีเยลลี่ที่อุณหภูมิ 55±5 องศาเซลเซียส 5 ระดับ ได้แก่ 0, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ต่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี, ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และค่าความเป็นกรดต่างแสดงดัง Fig. 1 พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด แต่ไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรดต่างของกัมมีเยลลี่ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งทำให้ตัวอย่างมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลง และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งมีผลต่อการลดปริมาณความชื้น หรือน้ำในตัวอย่าง จึงส่งผลต่อค่าคุณภาพดังกล่าว โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Delgado and Banon (2014) ที่มีการศึกษาผลของระยะเวลาในการอบแห้งของกัมมีเยลลี่ที่เวลา 12, 16, 20 และ 24 ชั่วโมง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของตัวอย่างลดลง ในขณะที่ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมีการระเหยออก

จากกัมมี่เยลลี่ ระหว่างกระบวนการอบแห้งจึงส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของตัวอย่างลดลง ปริมาณน้ำที่ลดลงส่งผลให้สัดส่วนของส่วนผสมในกัมมี่เยลลี่เปลี่ยนแปลงไป คือปริมาณน้ำตาลและสารก่อเจลมีสัดส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของกัมมี่เยลลี่เพิ่มขึ้น

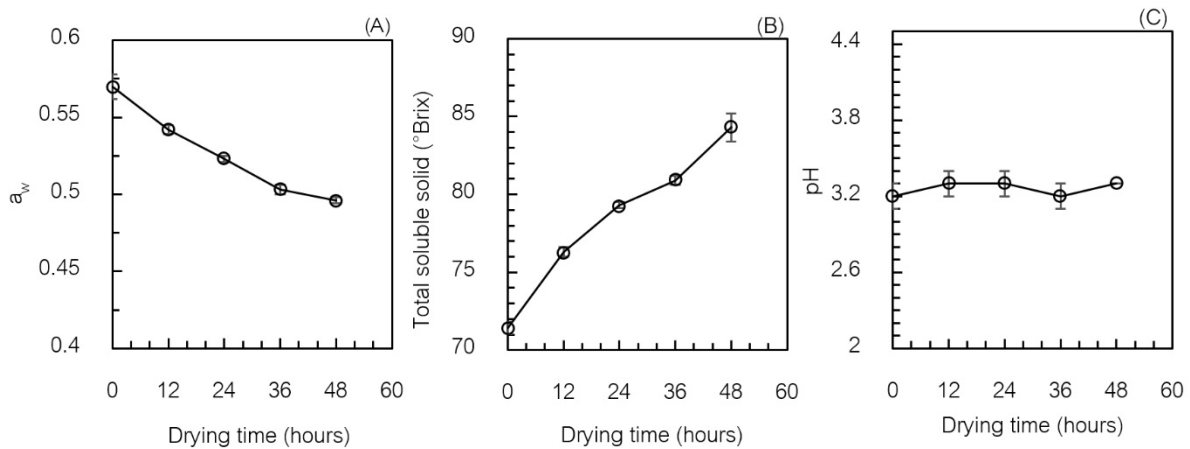


Fig. 1 Effect of drying time on (A) water activity, (B) total soluble solid, and (C) pH of gummy jelly product

ผลของระยะเวลาในการอบแห้งกัมมี่เยลลี่ที่อุณหภูมิ 55 ± 5 องศาเซลเซียส 5 ระดับ ได้แก่ 0, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ต่อค่าคุณภาพทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัสของกัมมี่เยลลี่ แสดงดัง Table 3 พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อค่า hardness, gumminess, springiness และ chewiness โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งให้มากขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าเหล่านี้เพิ่มขึ้น โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Delgado and Banon (2014) ที่มีการศึกษาผลของระยะเวลาในการอบแห้งต่อเนื้อสัมผัสของกัมมี่เยลลี่ที่เวลา 12, 16, 20 และ 24 ชั่วโมง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งจะส่งผลให้ค่า hardness, gumminess และ chewiness เพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งทำให้สารก่อเจลเกิดการคายน้ำ ส่งผลให้โครงสร้างของสารก่อเจลเกิดการหดตัว รวมทั้งในส่วนผสมของกัมมี่เยลลี่มีน้ำตาลอยู่ในปริมาณมาก ทำให้โครงสร้างของสารก่อเจลที่เกิดขึ้น ร่วมกับโครงสร้างของน้ำตาลในส่วนผสมส่งผลให้โครงสร้างของเจลมีความแข็งแรงขึ้น และส่งผลให้กัมมี่เยลลี่มีความหนึบมากขึ้น

Table 3 Effect of drying time on textural properties of gummy jelly

Drying time (Hours)	Hardness (N)	Cohesiveness ^{ns}	Gumminess	Springiness	Chewiness (N)
0	4572.24±206.92 ^d	2.12±0.30	2047.77±752.92 ^b	2.10±0.41 ^b	1313.21±200.69 ^b
12	10250.57±701.26 ^c	2.14±0.73	2267.29±435.07 ^{ab}	4.02±1.51 ^a	3412.93±1202.26 ^a
24	13358.69±323.16 ^b	2.33±0.28	2510.06±110.10 ^{ab}	4.88±1.08 ^a	3630.72±327.34 ^a
36	15998.20±667.27 ^a	2.87±0.16	2824.49±61.48 ^a	4.39±0.92 ^a	2499.25±1205.12 ^{ab}
48	16762.94±864.50 ^a	2.82±0.52	2865.01±816.14 ^a	4.43±1.75 ^a	2894.50±1421.81 ^a

*Means±SD within columns with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$) (ns) not significant

สรุป

จากการศึกษาผลของคาร์ราจีแนนและระยะเวลาการอบแห้งต่อคุณภาพบางประการของกัมมีเยลลี่พบว่า ปริมาณของคาร์ราจีแนนมีผลต่อค่าเนื้อสัมผัสของกัมมีเยลลี่ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์ราจีแนนทำให้กัมมีเยลลี่มีค่า hardness, cohesiveness, gumminess, และ springiness เพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของกัมมีเยลลี่ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้ง ส่งผลให้ค่า hardness, gumminess, springiness, chewiness และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลง จากการศึกษาทำให้ทราบแนวทางการใช้คาร์ราจีแนนทดแทนเจลาตินในการพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ที่ปราศจากส่วนผสมของสัตว์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ทุกคน ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับทุนนำเสนองานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60 และขอขอบคุณบริษัท IMCD ประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์สารในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- กุสุมา ทินกร ณ อยุธยา, นัทมน พุฒดวง. 2559. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่ธัญพืชเพื่อสุขภาพ. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 11: 13–20.
- มัทนา แสนจินดาวงษ์, วันชัย วรวิวัฒน์เมธีกุล, วรณวิมล คล้ายประดิษฐ์. 2552. การผลิตเจลาตินจากเศษเหลือของกระบวนการผลิตซูริมิ. ใน: นิทรรศการงานวิจัย บนเส้นทางงานวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในงานวันเกษตรแห่งชาติ ประจำปี 2552.
- เรไร จันทรเดียม. 2564. Plant-based Food อาหารแห่งโลกอนาคต. ใน: วรณศิริ กางกั้น (บรรณาธิการ). อุตสาหกรรมสาร วารสารกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 63. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ, หน้า 5–10.
- สถาบันฮาลาลมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2557. ตัวอย่างสารเติมแต่งฮาลาล (คาร์ราจีแนน). <http://www.halinst.psu.ac.th/th/knowledge-th/halalarticle-th/407-2014-05-15-04-31-16>, 11 ธันวาคม 2564.
- Ako, K. 2015. Influence of elasticity on the syneresis properties of K-carrageenan gels. *Carbohydr. Polym.* 115: 408–414. doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.109
- Delgado, P., Banon, S. 2015. Determining the minimum drying time of gummy confections based on their mechanical properties. *CYTA J. Food* 13: 329–335. doi.org/10.1080/19476337.2014.974676
- Jiamjariyatam, R. 2018. Influence of gelatin and isomaltulose on gummy jelly properties. *Int. Food Res. J.* 25: 776–783.
- Kaya, A.O., Suryani, A., Santoso, J.T., 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. *IJSBAR*. 20: 313–324.
- Multu, C., Arsian, S., Erbas, M. 2018. Production of a minimally processed jelly candy for children using honey instead of sugar. *LWT – Food Sci. and Technol.* 93: 499–505. doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.064
- Rochmawati, N., Ermawati, D. E. 2021. The effect of carrageenan concentration on the physical and chemical properties of gummy turmeric acid jamu. *Majalah Farmaseutik*. 17: 230–237. doi: 10.22146/farmaseutik.v17i2.63615
- Utomo, B.S.B., Darmawan, M., Hakim, A.R., Ardi, D.T. 2014. Physicochemical properties and sensory evaluation of jelly candy made from different ratio of k-carrageenan and konjac. *Squalen Bull. Mar. Fish. Postharvest Biotechnol.* 9: 25–34. doi.org/10.15578/squalen.v9i1.93

การสำรวจตลาดผลิตภัณฑ์บะหมี่และการสำรวจความต้องการของผู้บริโภคสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่

A survey of noodles market and consumer needs for the development of noodle

ปภาวี บำรุงพงษ์*, ทานตะวัน พิรัชช์

Paparve Bumrungphong*, 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: paparve.b@ku.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันผู้บริโภคจำนวนมากต้องการรับประทานอาหารที่สะดวก รวดเร็ว เช่น บะหมี่และบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป จากการสำรวจฐานข้อมูล Global New Products Database ในปี 2017–2021 พบว่า ตลาดบะหมี่เติบโตขึ้น โดยเฉพาะปี 2020 ผลิตภัณฑ์บะหมี่จำหน่ายเพิ่มขึ้น 2 เท่า จากปี 2019 (12.6% เพิ่มขึ้นเป็น 25.3%) จากการสนทนากลุ่มกับผู้บริโภคที่ชอบรับประทานบะหมี่ 2 กลุ่ม กลุ่มละ 8 คน พบว่า ผู้บริโภคต้องการบะหมี่ที่ลดคาร์โบไฮเดรตและเพิ่มโปรตีน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลิตภัณฑ์บะหมี่ โดยคัดเลือกบะหมี่สูตรพื้นฐาน 2 สูตร ที่มีปริมาณไข่แตกต่างกันให้เป็นบะหมี่ที่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคเป้าหมาย เมื่อวิเคราะห์ค่าสี ร้อยละความชื้น ไขมัน เกล็ด และคาร์โบไฮเดรต พบว่ามีความแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) เมื่อทดลองคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้วยผู้ทดสอบที่ไม่มีฝึกฝนจำนวน 30 คน พบว่าสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 (ไข่ 34.5%) มีความชอบโดยรวมมากกว่าสูตรที่ 2 (ไข่ 2%) ($p \leq 0.05$) งานวิจัยนี้จึงเลือกสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 เพื่อพัฒนาให้เป็นบะหมี่ที่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคเป้าหมายต่อไป

คำสำคัญ: ตลาดผลิตภัณฑ์บะหมี่, บะหมี่

Abstract

Nowadays, numerous consumers want to consume convenience food. Noodle and instant noodle is the largest industry according to the online research from Global New Products Database in 2017–2021. Especially, the market share of noodles increased from 12.6% in 2019 to 25.3% in 2020. Result from the focus group in 2 groups (8 people per group) are “they want low carbohydrate and high protein noodles” This research compared the difference between the 2-standard formulas of fresh noodle and selected the best formulation as the prototype for development of noodle. This research analyzed the color, %moisture, %fat, %ash and %carbohydrate of the 2-standard formulas was significantly different ($p \leq 0.05$). By sensory testing on 30 inexperienced practices, consumer preferred the first formula (egg 34.5%) more than second formula (egg 2%) ($p \leq 0.05$). Hence, this research selected the first formula as a prototype for the development of noodle in the next experiment.

Keywords: Noodle, Noodle Market

คำนำ

บะหมี่และบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปเป็นอาหารที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากผู้บริโภคต้องการรับประทานอาหารที่สะดวก รวดเร็ว เพื่อตอบสนองการใช้ชีวิตที่เร่งรีบของสังคมในปัจจุบัน แต่หากมองคุณค่าทางโภชนาการแล้ว ส่วนประกอบหลักของผลิตภัณฑ์บะหมี่คือ แป้ง (Arora, 2017) ดังนั้นการสำรวจตลาดและความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์บะหมี่ จึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อให้แนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่สอดคล้องกับความต้องการและเพิ่มทางเลือกของผู้บริโภค และงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสำรวจตลาด และการสำรวจความต้องการผู้บริโภค เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่ ให้ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคโดยครอบคลุมการศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตเบื้องต้นด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้

อุปกรณ์ในการผลิต – อุปกรณ์พื้นฐานในกระบวนการผลิตบะหมี่ เช่น ถ้วย พลาสติกแรปอาหาร, เครื่องรีดเส้นและตัดเส้นบะหมี่ยี่ห้อ PRIMA ขนาดหน้ากว้าง 14 เซนติเมตร, นาฬิกาจับเวลา, เทอร์โมมิเตอร์ยี่ห้อ BOSS, เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Perfeclan5

อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ – ตู้อบลมร้อนยี่ห้อ Binder, เครื่องวัด texture analyzer วัดแบบ texture profile analysis โดยใช้หัววัด A/SPR, เครื่องวัดไขมัน ด้วยเครื่อง Auto soxtex 2050, เตาเผาถั่ว, เครื่องวัดสี hunter lab ยี่ห้อ ultra scan PRO, เครื่องวัดโปรตีน ยี่ห้อ FOSS

วัตถุดิบในการผลิต – แป้งเซโมลินา ยี่ห้อ Ticinella, ไข่ไก่เบอร์ 3 ยี่ห้อ CP, น้ำสะอาด ยี่ห้อ Nestle, เกลือ ยี่ห้อปรุงรสปิพย์

การศึกษาผลิตภัณฑ์บะหมี่ในท้องตลาดทั่วโลก

การสำรวจตลาดแบบออนไลน์ – สำรวจแนวโน้มความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ประเภทบะหมี่ผ่าน GNPD - Global New Products Database (www.GNPD.com) ใช้คำค้นหา-noodle, region-all categories, claim-high/added protein, flavor-savoury ในระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา เริ่มจากเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560-2564

การสำรวจตลาดแบบออฟไลน์ – สำรวจผลิตภัณฑ์บะหมี่จากตลาดในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 21 พฤศจิกายน ถึง 6 ธันวาคม 2564 โดยแบ่งประเภทของตลาดเป็น 3 แบบ คือ ตลาดขนาดใหญ่ (Hypermarket), ตลาดขนาดกลาง (Supermarket), ตลาดขนาดเล็ก (Minimart) ได้แก่ บริเวณเขตหลักสี่ เขตตลาดพร้าว เขตจตุจักร เขตบางกะปิ และเขตบึงกุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

การสนทนากลุ่ม (Focus group)

สำรวจความต้องการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์บะหมี่จากตัวแทนกลุ่มผู้บริโภค คือ ผู้ที่ขอรับประทานบะหมี่ จำนวน 8-10 คน ต่อ 1 กลุ่ม โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือ อายุ 18-25 ปี เพศชาย 2 คน และเพศหญิง 6 คน เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่มีลักษณะการใช้ชีวิตที่เร่งรีบ ต้องการรับประทานอาหารที่รวดเร็ว และกลุ่มที่ 2 คือ อายุ 25-35 ปี เพศหญิง 8 คน เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่มีต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการมาก เพื่อสนทนากลุ่มเก็บข้อมูลแนวคิดของตัวแทนกลุ่มผู้บริโภค โดยใช้คำถามทั้งหมด 13 ข้อ และใช้เวลาในการสนทนากลุ่มร่วมกับตัวแทนกลุ่มผู้บริโภคบะหมี่ กลุ่มละ 30-50 นาที

การคัดเลือกสูตรพื้นฐานสำหรับกระบวนการผลิตขนมปัง

สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 และ 2 (Hester, 2017) แสดงดัง Table 1

Table 1 Standard of formula

Ingredient	Formula 1	Formula 2
Semolina	100	100
Egg	48	3
Water	0	45
Salt	0.12	0.3

Source : modified from Hester et al. (2017)

การผลิตผลิตภัณฑ์ขนมปัง เริ่มจากการผสมแป้งเซโมลิน่าและเกลือด้วยไม้พายในถ้วย จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำไปทีละ 3 และน้ำตามอัตราส่วน ผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันด้วยไม้พาย เป็นเวลา 15 นาที พักโดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที โดยการคลุมผิวหน้าโด นำโดที่พักแล้วไปรีดให้บาง และตัดแผ่นโดด้วยมีดที่แห้งให้มีความหนาของแผ่นแป้งประมาณ 1.0–2.0 มิลลิเมตร (อิริชา, 2560) นำเส้นโดไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ (ด้านสี) และเคมี นำเส้นโดไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นประเมินคุณภาพทางเนื้อสัมผัสและลักษณะทางประสาทสัมผัส

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมีและลักษณะทางประสาทสัมผัส

วิเคราะห์ค่าทางกายภาพ

ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการวัดแบบ texture profile analysis ด้วยเครื่องวัด texture analyzer โดยใช้หัววัด A/SPR, ซึ่งดัดแปลงมาจาก (สุภาพร, 2557) ทำการวิเคราะห์ 20 ซ้ำต่อตัวอย่าง และวัดค่าสี $L^* a^* b^*$ ด้วยเครื่อง hunter lab ยี่ห้อ ultra scan PRO ตามวิธีของ (สุภาพร, 2557) โดยวิเคราะห์ 6 ซ้ำต่อตัวอย่าง

วิเคราะห์ค่าทางเคมี

ปริมาณความชื้น โดยวิธี (AOAC, 1990) โดยชั่งตัวอย่างตัวอย่าง 2 กรัม นำไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักที่แน่นอน และคำนวณปริมาณความชื้นตามสมการ (Equation 1):

$$\text{Moisture content (\%)} = (\text{weight of sample before drying} / \text{weight of sample after drying}) * 100 \quad (1)$$

ปริมาณโปรตีน โดยวิธีเจลดาล์ (Kjeldahl method) โดยวิธี (AOAC, 2000) วิเคราะห์โปรตีนโดยการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยการย่อยและกลั่นตัวอย่าง และคำนวณปริมาณโปรตีนตามสมการ (Equation 2):

$$\text{Protein content (\%)} = \% \text{total of Nitrogen} * 6.25 \quad (2)$$

ปริมาณไขมัน โดยวิธี Soxlet (AOAC, 2000) ด้วยเครื่อง Auto soxtex 2050 และคำนวณปริมาณไขมันตามสมการ (Equation 3):

$$\text{Fat content (\%)} = ((\text{weight of can after drying} - \text{weight of can before drying}) * 100) / \text{total of weight} \quad (3)$$

ปริมาณเถ้า โดยวิธี (AOAC,2000) โดยการเผาไล่ควันด้วย hot plate และเผาด้วยเตาเผาเถ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมงจนได้เถ้าสีขาว และคำนวณปริมาณเถ้าตามสมการ (Equation 4):

$$\text{Ash content (\%)} = (\text{weight of ash after drying} / \text{weight of ash before drying}) * 100 \quad (4)$$

ปริมาณไฟเบอร์ โดยการนำบะหมี่เส้นสดอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชม. และสกัดไขมันก่อน จึงสกัดไฟเบอร์และเผาด้วยเตาเผาเถ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมงจนได้เถ้าสีขาว (AOAC, 2000) และคำนวณปริมาณไฟเบอร์ตามสมการ (Equation 5):

$$\text{Fiber content (\%)} = ((\text{weight of fiber after drying} - \text{weight of fiber after burning}) / \text{weight of sample}) * 100 \quad (5)$$

โดยการวางแผนการทดลองแบบ CRD วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธี ANOVA ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan Multiple Rank Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS version 19 และรายงานผลเป็น ค่าเฉลี่ย (mean) \pm ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

วิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

วิธีการทดสอบความชอบแบบตัวอย่างคู่ (pair preference test) กับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ทดสอบความชอบของบะหมี่สูตรพื้นฐาน 2 สูตร โดยการวงกลมรหัสตัวอย่างบะหมี่สูตรพื้นฐานที่ชอบมากที่สุด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลิตภัณฑ์บะหมี่ในท้องตลาดทั่วโลก

การสำรวจตลาดแบบออนไลน์ - ศึกษาผลิตภัณฑ์บะหมี่ในท้องตลาดทั่วโลกทำได้โดยการสำรวจผ่านเว็บไซต์ GNPD - Global New Products Database (www.GNPD.com) ใช้คำค้นหา-noodle, region-all categories, claim-high/added protein, flavor-savory ในระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา นับจากเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 – 2564 ผลิตภัณฑ์ประเภทบะหมี่เป็นที่สนใจของผู้บริโภคจึงทำให้มียอดจำหน่ายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในปี พ.ศ.2563 ยอดจำหน่ายเพิ่มเป็น 25.3% จากปี 2562 ที่มียอดจำหน่ายเท่ากับ 12.6% และในปี 2564 มียอดจำหน่ายเท่ากับ 26.3% โดยประเทศที่ได้รับความนิยม ได้แก่ ยุโรป เอเชียแปซิฟิก อเมริกาเหนือ ลาตินอเมริกา ตามลำดับ และรสชาติที่ได้รับความนิยมได้แก่ รสชาติ savory คือ อาหารที่มีรสเค็มหรือเผ็ดแต่ไม่มีรสหวาน และ fauna คือ สัตว์ประจำท้องถิ่น เมื่อใช้คำค้นหา noodle และเพิ่ม nutrition-protein พบว่า ในระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา เริ่มจากเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560-2564 ผลิตภัณฑ์ประเภทบะหมี่ที่มีโปรตีนเป็นที่สนใจของผู้บริโภคอย่างมากในปี พ.ศ.2564 มียอดจำหน่าย 30.1% จากปี 2563 ยอดจำหน่ายเท่ากับ 28.9%

การสำรวจตลาดแบบออฟไลน์ - ศึกษาผลิตภัณฑ์ประเภทบะหมี่จากตลาดขนาดต่างๆ ระหว่างวันที่ 21 พฤศจิกายน ถึง 6 ธันวาคม 2564 สถานที่ที่ใช้สำรวจ คือ ตลาดขนาดใหญ่ (Hypermarket), ตลาดขนาดกลาง (Supermarket), ตลาดขนาดเล็ก (Minimart) ได้แก่ บริเวณเขตหลักสี่ เขตลาดพร้าว เขตจตุจักร เขตบางกะปิ และเขตปทุม กลุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย แสดงดัง Table 2

Table 2 Summary of noodles in Thailand marketplace

Marketing activities	Hypermarket			Supermarket	Minimart
	Tops	Makro	Tesco lotus	Foodland, Villa market, Gourmet market	Seven eleven, Familymart
variety of Brands	A lot of product in Thailand and Import product from Italy, England, USA and Australia	A lot of too big pack product in Thailand and Import product from Italy, England, USA and Australia	A few of product in Thailand and Import product from Italy	A lot of product in Thailand and Import product from Italy, England, USA and Australia	
Type of noodles	variety of product such as spaghetti, macaroni, penne, fettuccine, fusilli, linguine, Vongola, lasagna	variety of product such as spaghetti, macaroni, penne, fettuccine, fusilli, linguine, Vongola, lasagna	Mostly of them are spaghetti, macaroni, fusilli,	variety of product such as spaghetti, macaroni, penne, fettuccine, fusilli, linguine, Vongola, lasagna	Not found
Price and Quantity	55–150 bath / 500 g	60–114 bath / 500 g 60–114 bath / 1 kg 60–114 bath / 3 kg	34–116 bath / 500 g	40–95 bath / 500 g	
Promotion	sale of 1–5 baht or buy 2 get 1 free	sale of 3 baht or buy 1 get 1 free	sale of 5 baht	buy 1 get 1 free	
Total amount	8 rows / 9 columns	6 rows / 6 columns	6 rows / 2 columns	7 rows / 4 columns	

พบว่า ผลิตภัณฑ์บะหมี่วีแกนที่อยู่ในตลาดประเภทเดียวกัน คือ ตลาดขนาดใหญ่ (Hypermarket), ตลาดขนาดกลาง (Supermarket) และตลาดขนาดเล็ก (Minimart) มีความหลากหลายและจำนวนผลิตภัณฑ์บะหมี่ต่างกัน เช่น ยี่ห้อประเทศที่นำเข้า ราคา เป็นต้น โดยตลาดที่มีผลิตภัณฑ์บะหมี่วีแกนมากที่สุด คือ ตลาดขนาดใหญ่ ที่ Tops hypermarket อันดับ 2 คือ ตลาดขนาดกลางและตลาดขนาดใหญ่ที่ Makro อันดับ 3 คือ ตลาดขนาดใหญ่ Tesco lotus และ Minimart ไม่พบสินค้าประเภทบะหมี่ยุโรปเลย

การสนทนากลุ่ม (Focus group)

จากการศึกษาตัวแทนกลุ่มผู้บริโภคที่ขอรับประทานบะหมี่ 2 กลุ่ม (จำนวน 8–10 คนต่อ 1 กลุ่ม) สามารถแบ่งประเด็นการสนทนาได้ ดังนี้

1. ประเด็นการบริโภคผลิตภัณฑ์ทั่วไปที่มีตามท้องตลาด พบว่า เหตุผลที่ชอบบริโภคผลิตภัณฑ์บะหมี่ของผู้เข้าร่วมสนทนา ส่วนใหญ่ คือ รู้สึกเบื่อผลิตภัณฑ์ประเภทข้าว และต้องการรับประทานบะหมี่ที่มีความเหนียวนุ่ม คู่กับน้ำซุบที่ร้อน ความถี่ในการบริโภคบะหมี่เฉลี่ย 3–4 ครั้งต่อสัปดาห์ สถานที่ในการซื้อบะหมี่ คือ ตลาดขนาดใหญ่ และตลาดขนาดเล็ก

ราคาเฉลี่ยที่ยอมรับได้ต่อมือ 35–60 บาท และยี่ห้อที่ส่วนใหญ่เลือก คือ เส้นบะหมี่ที่มีความเหนียวนุ่ม เช่น บะหมี่ยี่ห้อนิชชิน และร้านฮาจิบังราเมน

2. ประเด็นด้านความชอบในการบริโภคผลิตภัณฑ์บะหมี่ พบว่า ผู้เข้าร่วมสนทนาทันทีเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่มีการปรุงสำเร็จแล้ว เนื่องจากมีความเห็นตรงกันว่าใช้เวลานานในการปรุงประกอบด้วยตัวเอง ซึ่งผู้เข้าร่วมสนทนาส่วนใหญ่เลือกรับประทานบะหมี่เส้นสดที่เส้นมีลักษณะเล็ก เหนียว นุ่ม ปริมาณ 1 ก้อนครึ่ง ต่อการบริโภค 1 ครั้ง รับประทานคู่กับน้ำซุปร้อน เนื้อหมู และใส่ก๋วยเตี๋ยว และผู้เข้าร่วมสนทนาครึ่งหนึ่งรับประทานคู่กับผักสดรวมด้วย

3. ประเด็นด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่ ผู้เข้าร่วมสนทนาส่วนใหญ่ให้เหตุผลว่า บะหมี่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก ต้องการที่จะลดปริมาณคาร์โบไฮเดรตและเพิ่มโปรตีน เพื่อให้มีคุณค่าโภชนาการและเกิดประโยชน์สูงสุดในการบริโภค

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมีและลักษณะทางประสาทสัมผัส

วิเคราะห์ค่าทางกายภาพ

Table 3 Color and texture analysis of standard noodles

Formula	L*	a*	b*	hardness
1	67.11±0.71 ^b	8.53±0.18 ^a	32.10±1.30 ^a	37.03±3.88 ^a
2	73.10±0.71 ^a	3.56±0.18 ^b	29.60±0.80 ^b	29.30±4.62 ^b

^{a-b} The means with the different letter in column are significantly different ($p \leq 0.05$)

ในการศึกษาบะหมี่สูตรพื้นฐานที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์ด้านสีของบะหมี่ไขสูตรพื้นฐาน แสดงดัง Table 3 พบว่าในไข่ไก่มีลูทีน (lutein) และซีแซนทีน (zeaxanthin) ซึ่งเป็นรงควัตถุในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Cecilia, 2020) ทำให้เกิดความแตกต่างด้านสี พบว่าบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มีค่าความสว่าง (L*) น้อยกว่าสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 เนื่องจากปริมาณไข่ในสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มากกว่า จึงทำให้ ค่า a* (ทิศทางสีแดง) และค่า b* (ทิศทางสีเหลือง) ของสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มากกว่าสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

การศึกษาความต้านทานของเส้นบะหมี่ต่อการกัดของผู้บริโภค โดยการวิเคราะห์ค่า hardness แสดงดัง Table 3 เนื่องจากส่วนประกอบหลักของบะหมี่คือแป้งโมลิน่าซึ่งแป้งชนิดนี้มีปริมาณโปรตีนมากถึง 13–14% (ศิริพรและคณะ, 2558) ซึ่งโปรตีนมีสมบัติ คือ ช่วยในการจับกับน้ำ (water holding capacity) และช่วยในการเกิดเจล ที่ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย สามารถจับกับน้ำได้ (ณัฐมล, 2560) จากผลการทดลองพบว่าบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 มีค่า hardness น้อยกว่าสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 และความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

วิเคราะห์ค่าทางเคมี

Table 4 Proximate composition (%) of standard noodles

Formula	Protein (%) ^{ns}	Moisture (%)	Ash (%)	Fat (%)	Fiber (%) ^{ns}	Carbohydrate (%)
1	13.21±0.17	19.01±1.62 ^b	1.44±0.08 ^a	4.52±0.05 ^a	4.36±0.00	57.53±1.07 ^b
2	9.48±0.15	22.69±0.61 ^a	1.10±0.04 ^b	1.05±0.04 ^b	3.58±0.00	62.11±0.44 ^a

^{a-b} The means with the different letter in column are significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} Means sharing the same letter in a column are not significantly different ($p > 0.05$)

การศึกษาองค์ประกอบด้านเคมี แสดงดัง Table 4 เนื่องจากบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มีปริมาณไขมันที่มากกว่าซึ่งในส่วนประกอบของไข่ไก่ทั้งฟองพบว่า มีปริมาณไขมันอยู่ที่ 8–9% และมีปริมาณเถ้าอยู่ที่ 0.8–0.9% (ศิริพร และคณะ, 2558) จึงทำให้ %เถ้า และ %ไขมัน ของบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มากกว่า สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 และบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มี %ความชื้น และ %คาร์โบไฮเดรต น้อยกว่า สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$) เนื่องจากบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 มีอัตราส่วนน้ำมากกว่า แต่ %โปรตีน และ %ไฟเบอร์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากแป้งเซโมลิน่า มีโปรตีน 13–14% (ศิริพรและคณะ, 2558) และไฟเบอร์ 7% (Cecilia, 2020) เป็นองค์ประกอบซึ่งสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตร มีปริมาณเซโมลิน่าในอัตราส่วนที่เท่ากันจึงทำให้ %โปรตีน และ %ไฟเบอร์ ไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$)

วิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ทดสอบวิธีการทดสอบความชอบแบบตัวอย่างคู่ (pair preference test) กับผู้ทดสอบไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน ทดสอบความชอบของบะหมี่สูตรพื้นฐาน 2 สูตร โดยการวางกลมรหัสตัวอย่างบะหมี่สูตรพื้นฐานที่ชอบมากที่สุด แสดงดัง Table 5

Table 5 Result of the number of people liking noodle

Formula	Number (people)
1	25
2	5

จากการทดสอบความชอบโดยรวมจำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่า ผู้บริโภคเลือกบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 (สูตรไข่ 34.5%) จำนวน 25 คน และมีผู้เลือกสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 (สูตรไข่ 2%) จำนวน 5 คน สรุปได้ว่า มีผู้ที่ชอบสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มากกว่าสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สรุปผลการทดลอง

ผลิตภัณฑ์บะหมี่เป็นที่สนใจของผู้บริโภคอย่างมาก จากการสำรวจตลาดออนไลน์ โดยเฉพาะยอดการขาย ผลิตภัณฑ์บะหมี่ในปี 2563 (ยอดขาย 25.3%) เพิ่มขึ้น 2 เท่าจากปี 2562 (ยอดขาย 12.6%) และตลาดออฟไลน์ พบว่า มีผลิตภัณฑ์บะหมี่วางจำหน่ายในตลาดขนาดใหญ่และตลาดขนาดกลาง เมื่อศึกษาตัวแทนกลุ่มผู้บริโภคที่ชอบรับประทานบะหมี่โดยการสนทนากลุ่ม จำนวน 2 กลุ่ม กลุ่มละ 8 คน พบว่า ตัวแทนกลุ่มผู้บริโภคต้องการบริโภคบะหมี่ที่ลดปริมาณคาร์โบไฮเดรตและเพิ่มโปรตีน จึงทำการศึกษาและคัดเลือกบะหมี่สูตรพื้นฐาน โดยได้ทำการทดลองบะหมี่สูตรพื้นฐานจำนวน 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ สูตรที่ 1 (สูตรไข่ 34.5%) และสูตรที่ 2 (สูตรไข่ 2%) พบว่าความชอบของผู้บริโภคชอบบะหมี่ที่มีลักษณะแข็งมากกว่าซึ่งสอดคล้องกับค่า Hardness ของสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 น้อยกว่า สูตรมาตรฐานสูตรที่ 1 และความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากการศึกษาส่วนประกอบของบะหมี่สูตรพื้นฐานพบว่า ปริมาณไข่ในบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มากกว่า สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 ซึ่งส่งผลให้ ค่า L^* a^* และค่า b^* ของบะหมี่สูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มีความสว่างน้อยกว่า แต่มีสีแดงและสีเหลืองมากกว่าบะหมี่สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 และปริมาณไข่ของสูตรพื้นฐานที่แตกต่างกันทำให้องค์ประกอบทางเคมีมีความแตกต่างกันคือ %เถ้า และ %ไขมัน ของบะหมี่สูตรที่ 1 มากกว่า สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 และสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มี %ความชื้น และ %คาร์โบไฮเดรต น้อยกว่า แต่ %โปรตีน และ %ไฟเบอร์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p > 0.05$) และเมื่อวิเคราะห์ความชอบโดยวิธี pair preference test พบว่ามีผู้ที่ชอบสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 (สูตรไข่ 34.5%) มากกว่า สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 (สูตรไข่ 3%) และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จไปด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทานตะวัน พิทักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิจัย ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ และสนับสนุนทุนนำเสนองานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐมล จินดาพรรณ. 2549. องค์ประกอบและสมบัติในการทำหน้าที่ของไข่แดง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 49: 14–21.
- ศิริพร ต้นจ้อ, ตริรัตน์ สายวรรณ, ประภาศรี ภูเวสเสียร, อังคารศิริ ดีอ่วม, ครรชิต จุดประสงค์. 2558. คุณค่าทางโภชนาการของไข่ที่นิยมบริโภค และผลของการประกอบอาหาร. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 58: 652–666.
- สุภาภรณ์ เพ็ชรรี่, ศิริพร ศิริอังคนากุล. 2557. การใช้แป้งมันต่อเผือกทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์บะหมี่. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, พิษณุโลก
- อริษา เนตรบุตร. 2560. การพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่สดเสริมโคเอนไซม์คิวเทน. มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- AOAC. 1990. Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemistry (15th Ed.), the Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- AOAC. 2000. Official Method of Analysis of AOAC International (17th Ed.), the Association of Official Analytical Chemists, Virginia.
- Arora, B., Kamal, S., Sharma, V. 2017. Nutritional and quality characteristics of instant noodles supplemented with oyster mushroom (*P. ostreatus*). Wiley Periodicals, Inc., United States
- Cecilia, S. 2020. Duck Eggs vs. Chicken Eggs: Nutrition, Benefits, and More. <https://www.healthline.com/nutrition/duck-eggs-vs-chicken-eggs#basic-differences>, 14 August 2021
- Hester, K. 2017. The Ultimate Vegan Cookbook for Your Instant Pot. <https://www.amazon.com/Ultimate-Vegan-Cookbook-Your's-Instant/dp/1624143385/>, 14 August 2021
- Schofield, E. 2018. Plant protein ingredients (Mintel). <http://Plant%20protein%20ingredients%20%20Mintel.html>, 14 March 2021

การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพรด้วยวิธีอบแห้งพ่นฝอยโดยใช้มอลโตเดกซ์ทรีน และกัมอราบิก

Encapsulation of herbal essential oils by spray drying using Maltodextrin and Gum Arabic

ณพรชสร ทองพิมพ์ใหญ่, วรณี จิรภาคย์กุล*

Napathsorn Thongpimyai, Wannee Jirapakkul*

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: wannee.ch@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเอนแคปซูลชันโดยวิธีอบแห้งพ่นฝอยเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มอลโตเดกซ์ทรีน (MD) เป็นสารห่อหุ้มที่หาง่ายและราคาถูก แต่มีประสิทธิภาพในการห่อหุ้มน้ำมันต่ำ จึงมีการนำมาใช้ร่วมกับกัมอราบิก (GA) ซึ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่มีความหนืดต่ำ และมีคุณสมบัติกักเก็บไขมัน ช่วยให้ง่ายต่อการเก็บน้ำมันได้ดี การศึกษาการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยผสมจากสมุนไพรที่ใช้เป็นเครื่องต้มยำโดยใช้มอลโตเดกซ์ทรีนและกัมอราบิกในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (MD:GA เท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3) โดยการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญให้กลิ่นรสต้มยำ ค่าสี และปริมาณน้ำอิสระของผงกลิ่นพบว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรีนเพียงชนิดเดียวเป็นสารห่อหุ้มให้ปริมาณผลผลิตสูงที่สุด (58.99%) ส่วนการเพิ่มกัมอราบิก (MD:GA) เป็น 1:2 และ 1:3 ให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกักเก็บสาร Caryophyllene และ Geranial ได้สูงที่สุด นอกจากนี้ผงกลิ่นที่ได้มีค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น และผงกลิ่นที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอยทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.2

คำสำคัญ: กระบวนการห่อหุ้ม, กัมอราบิก, ประสิทธิภาพการกักเก็บ, มอลโตเดกซ์ทรีน, สารให้กลิ่นรสต้มยำ

Abstract

Encapsulation by spray drying is commonly used in the food industry. Maltodextrin is a wall material that is available and cheap. Maltodextrin has a limitation on oil retention therefore It can be used in combination with Gum Arabic, which is a low viscosity hydrocolloid with emulsifying properties and retain oil well. The encapsulation of mixed herbal essential oils for Tom-Yum soup with different proportions of Maltodextrin and Gum Arabic (MD:GA = 1:0, 1:1, 1:2 and 1:3) was studied. The yield, the encapsulation efficiency of selected Tom-Yum flavor compounds, the color and the water activity were analyzed. The highest yield (58.99%) was obtained when using only Maltodextrin. The addition of Gum Arabic (MD:GA) to 1:2 and 1:3 showed the highest of encapsulation efficiency of Caryophyllene and Geranial. In addition, the flavor powder had an increase in yellowness (b^*). The water activity values of all treated flavor powder were less than 0.2.

Keywords: Encapsulation, Encapsulation efficiency, Gum Arabic, Maltodextrin, Tom-Yum flavor compounds

คำนำ

สมุนไพรไทยเป็นผลผลิตธรรมชาติ บางชนิดเหมาะสำหรับนำมาปรุงอาหารเพื่อดับกลิ่นคาว เพื่มนรสชาติ ความกลมกล่อม และช่วยส่งเสริมสุขภาพ ต้มยำเป็นอาหารไทยที่มีชื่อเสียงโด่งดังไปทั่วโลก จากเอกลักษณ์ด้านกลิ่นรสของสมุนไพรไทยที่ใช้เป็นเครื่องต้มยำ ได้แก่ ข่า ตะไคร้ ใบมะกรูด และมะนาว ซึ่งสามารถสกัดออกมาอยู่ในรูปน้ำมันหอมระเหย (Essential oil) เป็นของเหลวที่มีข้อจำกัดคือ ความไม่คงตัวจากแสง ความร้อน อากาศ ความชื้น และสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิห้อง (Turek and Stintzing, 2013) โดยน้ำมันหอมระเหยมีสารที่เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีคือสารในกลุ่มเทอร์พีน (Terpenes) (Dhifi et al., 2016)

การกักเก็บสารให้กลิ่นรสต้มยำจากสมุนไพรไทยให้อยู่ในรูปผงแห้งโดยการทำให้แคปซูลเลชัน (Encapsulation) เป็นกระบวนการห่อหุ้มสารให้กลิ่นรสต้มยำจากน้ำมันหอมระเหยด้วยพอลิเมอร์ให้อยู่ในรูปแคปซูล ป้องกันการระเหย การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การถูกทำลายโดยความร้อน แสง ความชื้นและอากาศ (Nikkola, 2016) รวมทั้งเป็นการเปลี่ยนสถานะน้ำมันหอมระเหยจากของเหลวเป็นผงแห้งซึ่งเป็นของแข็ง ส่งผลช่วยเพิ่มความคงตัว ความสะดวกในการขนส่ง ยืดระยะเวลาการเก็บรักษา และยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสต้มยำได้อีกด้วย เช่น การละลายในน้ำร้อนเพื่อปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสที่ถูกห่อหุ้มไว้ (Porzio, 2004) การทำให้แคปซูลเลชันโดยวิธีการอบแห้งพ่นฝอย (Spray drying) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากที่สุดเนื่องจาก ต้นทุนการผลิตต่ำ หาเครื่องมือได้ง่ายวิธีการไม่ยุ่งยาก ผลิตได้ครั้งละมากๆ และได้แคปซูลที่มีคุณภาพ (Mohammed et al., 2020) สารห่อหุ้มที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือ มอลโตเดกซ์ทริน (Maltodextrin, MD) ซึ่งเกิดจากการดัดแปลงโครงสร้างของแป้งบางส่วนด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสได้สารที่มีความหนืดต่ำ สามารถละลายน้ำได้ดีขึ้นและไม่มีรสชาติ นอกจากนี้มอลโตเดกซ์ทรินยังมีราคาถูกและหาได้ง่าย (ธีรวัฒน์ และเอกชัย, 2561) แต่มีข้อจำกัดคือขาดสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) จึงมีประสิทธิภาพในการกักเก็บสารระเหยได้ต่ำ (Reineccius, 1991) สามารถนำมาใช้ร่วมกับกัมอาราบิก (Gum Arabic, GA) ซึ่งเป็นสารที่นิยมใช้ห่อหุ้มสารให้กลิ่นรส เนื่องจากละลายน้ำได้ง่าย ให้ความหนืดต่ำ มีสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และสามารถกักเก็บสารระเหยได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือราคาแพงกว่ามอลโตเดกซ์ทริน (Madene et al., 2006) จึงสามารถนำมอลโตเดกซ์ทรินและกัมอาราบิกมาใช้ร่วมกันเพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและการกักเก็บสารระเหยได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำแคปซูลเลชันน้ำมันหอมระเหยกลิ่นต้มยำโดยใช้มอลโตเดกซ์ทรินและกัมอาราบิกเป็นสารห่อหุ้มในสัดส่วนที่ต่างกัน (MD:GA เท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3) ด้วยวิธีการอบแห้งพ่นฝอยได้เป็นผงแห้งกลิ่นต้มยำ นำไปวัดวิเคราะห์ปริมาณผลผลิต (%Yield), ประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญให้กลิ่นรสต้มยำ (Encapsulation efficiency, %EE), ค่าสี (ระบบ $L^* a^* b^*$) และค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, A_w) เพื่อเพิ่มรูปแบบและแนวทางการใช้วัตถุดิบปรุงแต่งกลิ่นรสซึ่งผลิตจากน้ำมันหอมระเหยที่สกัดจากวัตถุดิบธรรมชาติ สามารถนำไปเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างผงแห้งกลิ่นต้มยำที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอย

การเตรียมอิมัลชัน

เตรียมอิมัลชันปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยมีสัดส่วนระหว่างน้ำมันหอมระเหยกลิ่นต้มยำกับสารห่อหุ้มเท่ากับ 1:4 (w/w) สารห่อหุ้มที่ใช้ ได้แก่ มอลโตเดกซ์ทริน (Maltodextrin, MD) DE10 และกัมอาราบิก (Gum Arabic, GA) ในสัดส่วนที่ต่างกัน MD:GA เท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3 ทำการละลายสารห่อหุ้ม 40 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 160 มิลลิลิตร

เตรียมน้ำมันหอมระเหยกลั่นต้มยำ โดยการผสมน้ำมันข่า น้ำมันตะไคร้ น้ำมันใบมะกรูด และน้ำมันมะนาว ชนิดละเท่าๆ กัน ปริมาณรวม 10 กรัม ค่อยๆ เติมลงในสารละลายสารห่อหุ้ม และทำให้เป็นอิมัลชันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer) รุ่น T25 Ultra-Turrax (IKA, ประเทศเยอรมนี) ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที (ดัดแปลงจาก de Barros Fernandes et al., 2016)

การอบแห้งพ่นฝอย

นำอิมัลชันที่ได้เข้าสู่กระบวนการอบแห้งพ่นฝอย โดยใช้เครื่องทำแห้งพ่นฝอย รุ่น B-290 Mini Spray Dryer (Buchi, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) หัวฉีดแบบ two-fluid nozzle ตั้งค่าอุณหภูมิขาเข้า 170 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาออก 90-110 องศาเซลเซียส Pump 25%, Aspirator 100% และ Nozzle cleaner เท่ากับ 4 (ดัดแปลงจาก de Barros Fernandes et al., 2016) ได้เป็นผงแห้งกลั่นต้มยำ

การวิเคราะห์ผงแห้งกลั่นต้มยำที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอย

การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิต (%Yield)

ชั่งน้ำหนักผงแห้งกลั่นต้มยำที่ได้จากข้อ 1.2 และคำนวณปริมาณผลผลิตตามสมการ (Equation 1)

$$\%Yield = \frac{\text{Weight of Tom-Yum powder obtained from spray drying (g)}}{\text{Total solids (g)}} \times 100 \quad (1)$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญให้กลิ่นรสต้มยำ (Encapsulation efficiency, %EE)

1.) การวิเคราะห์สารระเหยทั้งหมด (Total volatile content) ของผงแห้งกลั่นต้มยำ

ชั่งผงแห้งกลั่นต้มยำที่ได้จากข้อ 1.2 ปริมาณ 0.01 กรัม เติม deodorized water 50 มิลลิลิตร จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กให้ละลาย ดูดสารละลายตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร ใส่ขวดแก้วปริมาตร 20 มิลลิลิตร เติม deodorized water เพื่อปรับปริมาตรเป็น 5 มิลลิลิตร และเติม internal standard (2-Methyl-3-heptanone 0.0575 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในเมทานอล) 10 ไมโครลิตร ทำการปิดผนึกด้วยฝาชนิด PTFE/Silicone septa เพื่อให้เกิดระบบปิดวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Headspace-Solid Phase Microextraction (HS-SPME) โดยนำตัวอย่างข้างต้นมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างสารตัวอย่างกับไอของสารในบริเวณ headspace แล้วทำการ adsorption ด้วยไฟเบอร์ชนิด DVB/CAR/PDMS เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไป desorption ที่เครื่อง Gas Chromatography รุ่น 7890A (Agilent Technology Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ประกอบเข้ากับ Time-of-Flight Mass Spectrometry (GC-TOFMS) รุ่น Pegasus 4D (Leco Corporation, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ด้วยความร้อนที่ injection port 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ใช้แก๊สฮีเลียมบริสุทธิ์ 99.9999% เป็น carrier gas ที่อัตราการไหลคงที่ 1 มิลลิลิตร/นาที แยกสารโดยใช้คอลัมน์ Stabilwax-MS ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร ชั้นเคลือบหนา 0.25 ไมโครเมตร ตั้งอุณหภูมิตู้อบเริ่มต้น 35 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา 4 องศาเซลเซียส/นาที จนถึงอุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส จากนั้นระบุชนิดของสารระเหยโดยคำนวณค่า retention index (RI) จาก retention time (RT) ของสารมาตรฐานอัลเคน และเปรียบเทียบกับค่า RI ที่ได้กับฐานข้อมูลอื่นที่ใช้คอลัมน์ชนิดเดียวกัน และคำนวณหาปริมาณสารระเหยแต่ละชนิด โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคของสารนั้นๆ กับพื้นที่ใต้พีคของ internal standard ที่ทราบ

ความเข้มข้นแน่นอน รายงานเป็นความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารระเหยชนิดนั้นๆ ต่อน้ำหนักตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อกรัม; ppm)

2.) การวิเคราะห์สารระเหยที่ถูกกักเก็บ (Entrapped volatile content) และประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญให้กลิ่นรสตั้มยำ (Encapsulation efficiency, %EE) ของผงแห้งกลิ่นตั้มยำ

ล้างผิวของผงแห้งกลิ่นตั้มยำได้จากจากข้อ 1.2 ด้วยเฮกเซน เพื่อกำจัดสารระเหยที่อยู่บริเวณผิวภายนอก โดยใช้สัดส่วนเฮกเซนต่อผงแห้งกลิ่นตั้มยำเท่ากับ 40 มิลลิลิตร:1 กรัม กวนด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก แล้วระเหยตัวทำละลายออกภายในตู้ดูดควัน จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ตามวิธีเดียวกับการวิเคราะห์สารระเหยทั้งหมดของผงแห้งกลิ่นตั้มยำ

คำนวณประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญให้กลิ่นรสตั้มยำแต่ละชนิดตามสมการ (Equation 2) (ดัดแปลงจาก Jafari et al., 2007):

$$\text{Encapsulation efficiency, \%EE} = \frac{\text{Entrapped volatile content (ppm)}}{\text{Total volatile content (ppm)}} \times 100 \quad (2)$$

การวิเคราะห์ค่าสี (ระบบ $L^* a^* b^*$) ของผงแห้งกลิ่นตั้มยำ

นำผงแห้งกลิ่นตั้มยำจากข้อ 1.2 มาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) รุ่น UltraScan Pro Color Measurement Spectrophotometer (Hunter Lab, ประเทศสหรัฐอเมริกา) รายงานผลค่าสีในระบบ $L^* a^* b^*$

การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, A_w) ของผงแห้งกลิ่นตั้มยำ

นำผงแห้งกลิ่นตั้มยำจากข้อ 1.2 มาวัดค่าปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter) รุ่น 4TE (Aqualab, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS (Statistical package for social science)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการใช้มอลโตเดกซ์ทรีนและกัมอราบิกในสัดส่วนที่แตกต่างกันต่อผงแห้งกลิ่นตั้มยำที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอย

ปริมาณผลผลิต (%Yield)

การใช้มอลโตเดกซ์ทรีนเป็นสารห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยตั้มยำ ให้ปริมาณผลผลิตเฉลี่ย (%Yield) สูงที่สุดแตกต่างจากการใช้มอลโตเดกซ์ทรีนร่วมกับกัมอราบิกเป็นสารห่อหุ้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบ

ระหว่างการใช้สัดส่วนมอลโตเดกซ์ทรินร่วมกับกัมอราบิกแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ MD:GA เท่ากับ 1:1, 1:2 และ 1:3 พบว่าหากใช้ปริมาณสัดส่วน MD:GA เท่ากับ 1:1 จะให้ปริมาณผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่า MD:GA เท่ากับ 1:2 และ 1:3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนของกัมอราบิกทำให้มีมัลชันที่ถูกนำเข้าเครื่องทำแห้งพ่นฝอย เกิดเป็นฟิล์มติดโดยรอบห้องอบแห้ง (Drying chamber) ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้อยลง (Table 1)

Table 1 The average yield (%) of encapsulated Tom-Yum powder produced by spray drying using different wall material proportions (MD:GA = 1:0, 1:1, 1:2 and 1:3)

Yield (%)			
MD:GA = 1:0	MD:GA = 1:1	MD:GA = 1:2	MD:GA = 1:3
58.99 ^a ±2.48	50.84 ^b ±3.90	44.48 ^c ±1.60	42.95 ^c ±2.81

* Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

ประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญให้กลิ่นรสตั้มยำ (Encapsulation efficiency, %EE)

เกณฑ์การคัดเลือกสารสำคัญให้กลิ่นรสตั้มยำ (Selected Tom-Yum flavor compounds) คือ สารนั้นต้องเป็นสารให้กลิ่นสำคัญของวัตถุดิบหลักชนิดใดชนิดหนึ่งในการทำตั้มยำ (Kubota et al., 1999; พิชามญชุ์ และวรรณี, 2550; Jirapakkul et al., 2013; นัทธมน, 2559) และต้องเป็นองค์ประกอบหลักตามข้อกำหนดคุณภาพสินค้า (Specification) ของน้ำมันหอมระเหยชา, ตะไคร้, ใบมะกรูด และมะนาว ที่ใช้ในการผลิตผงแห้งกลิ่นตั้มยำ หรือเป็นสารระเหยให้กลิ่นสำคัญของสารสกัดให้กลิ่นรสตั้มยำในระดับสูง (Odor activity value, OAV = 7,000-100,000) (สุมิตรา, 2549) โดยพบสารสำคัญให้กลิ่นรสตั้มยำ 5 ชนิด ได้แก่ Eucalyptol, Caryophyllene, Geranial, Citronellal และ Linalool ที่สอดคล้องตามเกณฑ์ดังกล่าว

จาก Fig.1 แสดงประสิทธิภาพการห่อหุ้มโดยเฉลี่ย (%Encapsulation efficiency, %EE) ของสารสำคัญให้กลิ่นรสตั้มยำ 5 ชนิด ได้แก่ Eucalyptol, Caryophyllene, Geranial, Citronellal และ Linalool จากผงแห้งกลิ่นตั้มยำที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอยโดยใช้สัดส่วนสารห่อหุ้มที่แตกต่างกัน (MD:GA เท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-TOFMS พบว่า Eucalyptol, Citronellal และ Linalool มีประสิทธิภาพการห่อหุ้มโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อใช้สัดส่วนสารห่อหุ้มที่แตกต่างกัน ในขณะที่ Caryophyllene และ Geranial มีประสิทธิภาพการห่อหุ้มโดยเฉลี่ยสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้สารห่อหุ้มสัดส่วน MD:GA เท่ากับ 1:2 และ 1:3 และพบว่ามีค่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มโดยเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อใช้สารห่อหุ้มสัดส่วน MD:GA เท่ากับ 1:0 แสดงให้เห็นว่าหากนำมอลโตเดกซ์ทรินมาใช้ร่วมกับกัมอราบิกในสัดส่วนที่เหมาะสม จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการห่อหุ้มสารสำคัญจากน้ำมันหอมระเหยกลิ่นตั้มยำได้ดีขึ้น นอกจากนี้มอลโตเดกซ์ทรินยังช่วยลดต้นทุนการผลิต และยังมีส่วนช่วยไม่ให้อิมัลชันมีความเหนียวมากเกินไป ซึ่งอาจจะมีผลทำให้ติดค้างในสายยางระหว่างการนำเข้าตัวอย่างของเครื่องทำแห้งพ่นฝอยได้อีกด้วย

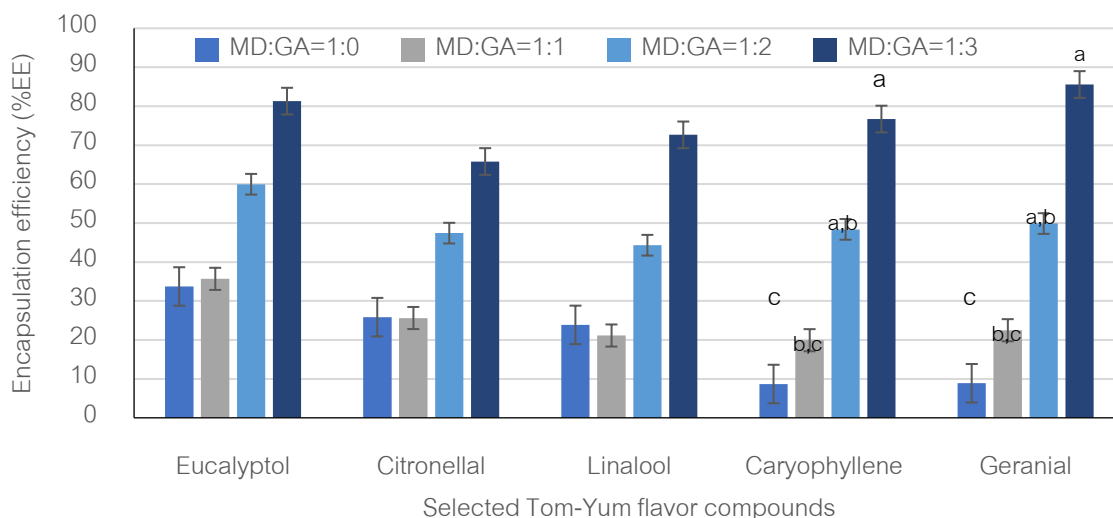


Fig.1 The average encapsulation efficiency (%EE) of selected Tom-Yum flavor compounds of Tom-Yum powder produced by spray drying using different wall material proportions (MD:GA = 1:0, 1:1, 1:2 and 1:3)

ค่าสี (ระบบ $L^* a^* b^*$) ของผงแห้งกลั่นต้มยำ

การศึกษาสีของผงแห้งกลั่นต้มยำที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอยโดยใช้สัดส่วนสารห่อหุ้มที่แตกต่างกัน (MD:GA เท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3) พบว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินเพียงชนิดเดียวเป็นสารห่อหุ้ม ผงแห้งกลั่นต้มยำจะมีสีขาวสว่าง สังเกตจากค่า L^* สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สูงกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินร่วมกับกัมอราบิก และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการใช้มอลโตเดกซ์ทรินร่วมกับกัมอราบิกในสัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 พบว่าผงแห้งกลั่นต้มยำมีสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น สังเกตจากค่า b^* สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของกัมอราบิกตามลำดับ โดยสีของผงแห้งกลั่นต้มยำอาจเป็นผลมาจากสีของสารห่อหุ้มที่ใช้ (Table 2)

Table 2 The average L^* , a^* and b^* values of encapsulated Tom-Yum powder produced by spray drying using different wall material proportions (MD:GA = 1:0, 1:1, 1:2 and 1:3)

Color	Treatments			
	MD:GA = 1:0	MD:GA = 1:1	MD:GA = 1:2	MD:GA = 1:3
L^*	97.71 ^a ±0.54	93.92 ^b ±0.35	93.38 ^c ±0.43	93.13 ^c ±0.74
a^*	-0.10 ^b ±0.07	0.13 ^a ±0.05	0.10 ^a ±0.03	0.12 ^a ±0.02
b^*	0.77 ^d ±0.10	3.71 ^c ±0.11	4.56 ^b ±0.08	4.88 ^a ±0.08

*Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, A_w) ของผงแห้งกลั่นต้มยำ

การศึกษาค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, A_w) ของผงแห้งกลั่นต้มยำที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอยโดยใช้สัดส่วนสารห่อหุ้มที่แตกต่างกัน (MD:GA เท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3) พบว่าสัดส่วนการใช้สารห่อหุ้มที่แตกต่างกันไม่ทำให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำอิสระของผงแห้งกลั่นต้มยำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผงแห้งกลั่นต้มยำมีค่าเฉลี่ย

ปริมาณน้ำอิสระอยู่ระหว่าง 0.110-0.137 โดยค่าปริมาณน้ำอิสระที่ต่ำกว่า 0.2 สามารถป้องกันการเกาะตัวของอนุภาคผงแห้ง และมีโอกาสเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาต่ำ (Alves et al., 2014) (Table 3)

Table 3 The average water activity (A_w) values of encapsulated Tom-Yum powder produced by spray drying using different wall material proportions (MD:GA = 1:0, 1:1, 1:2 and 1:3)

Water activity, A_w			
MD:GA = 1:0	MD:GA = 1:1	MD:GA = 1:2	MD:GA = 1:3
0.137 ±0.027	0.110 ±0.029	0.137 ±0.020	0.131±0.026

สรุป

การศึกษาผงแห้งกลั่นตั้มยำจากการอบแห้งพ่นฝอยโดยใช้มอลโตเดกซ์ทริน (MD) และกัมอราบิก (GA) เป็นสารห่อหุ้มในสัดส่วนที่ต่างกัน MD:GA เท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3 พบว่าผงแห้งกลั่นตั้มยำที่ใช้ MD:GA เท่ากับ 1:2 มีประสิทธิภาพการกักเก็บสารสำคัญให้กลั่นรสตั้มยำ (Encapsulation efficiency, %EE) สูงที่สุด โดยใช้สัดส่วนกัมอราบิกน้อยกว่า จึงประหยัดกว่าผงแห้งกลั่นตั้มยำที่ใช้ MD:GA เท่ากับ 1:3 การเพิ่มสัดส่วนกัมอราบิกทำให้ได้ปริมาณผลผลิต (%Yield) ของผงแห้งกลั่นตั้มยำลดลง โดยผงแห้งกลั่นตั้มยำที่ใช้ MD:GA เท่ากับ 1:2 และ 1:3 ได้ปริมาณผลผลิตไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้เพิ่มสัดส่วนกัมอราบิก ทำให้ผงแห้งกลั่นตั้มยำเป็นสีเหลืองมากขึ้น และผงแห้งกลั่นตั้มยำที่ได้จากการอบแห้งพ่นฝอยทั้งหมดมีค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, A_w) ต่ำกว่า 0.2

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และทุนนำเสนองานในการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 60 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- ธีรวัฒน์ บุญโสม, เอกชัย ดำเกลี้ยง. 2561. การทำไมโครเอนแคปซูเลชันน้ำมันหอมระเหยโดยการพ่นแห้ง: ผลของส่วนประกอบของสารห่อหุ้มและสภาวะการเตรียม. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 12: 48–62.
- นัทธมน สุวรรณพรหม. 2559. การเปรียบเทียบสารระเหยง่ายในน้ำมะนาวคั้นสด 4 พันธุ์ โดยใช้เทคนิคเฮดสเปซ-แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรีและเคโมเมทริก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิชามณู สุว่างสุข, วรณี จิรภาคย์กุล. 2550. สารระเหยอิสระและสารระเหยที่ถูกยึดจับในตะไคร้สด. ใน: เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45: สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 484–491.
- สุมิตรา บุญบำรุง. 2549. การศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของกลิ่นหอมจากสารสกัดกลั่นรสตั้มยำ. รายงานวิจัยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). 17 หน้า

- Alves, S.F., Borges, L.L., dos Santos, T.O., de Paula, J.R., Conceição, E.C., Bara, M.T. 2014. Microencapsulation of essential oil from fruits of *Pterodon emarginatus* using gum arabic and maltodextrin as wall materials: composition and stability. *Dry Technol.* 32: 96–105. doi: 10.1080/07373937.2013.816315
- de Barros Fernandes, R.V., Borges, S.V., Silva, E.K., et al. 2016. Study of ultrasound-assisted emulsions on microencapsulation of ginger essential oil by spray drying. *Ind Crops Prod.* 94: 413–423. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.09.010
- Dhifi, W., Bellili, S., Jazi, S., Bahloul, N., Mnif, W. 2016. Essential oils' chemical characterization and investigation of some biological activities: A critical review. *Medicines (Basel)*. 3: 25. doi: 10.3390/medicines3040025
- Jafari, S.M., He, Y., Bhandari, B. 2007. Encapsulation of nanoparticles of d-limonene by spray drying: role of emulsifiers and emulsifying techniques. *Dry Technol.* 25: 1069–1079. doi: 10.1080/073739370701396758
- Jirapakkul, W., Tinchan, P., Chaiseri, S. 2013. Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (*Citrus hystrix* D.C., Rutaceae) leaves. *Int. J. Food Sci. Technol.* 48: 143-149. doi: 10.1111/j.1365-2621.2012.03170.x
- Kubota, K., Someya, Y., Kurobayashi, Y., Kobayashi, A. 1999. Flavor characteristics and stereochemistry of the volatile constituents of greater galangal (*Alpinia galanga* Willd.). In: Shahidi, F., Ho, C.T. (Eds.). *Flavor Chemistry of Ethnic Foods*. Springer. Boston, MA, USA. pp. 97–104.
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., Desobry, S. 2006. Flavour encapsulation and controlled release-a review. *Int. J. Food Sci. Technol.* 41: 1–21. doi: 10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x
- Mohammed, N.K., Tan, C.P., Manap, Y.A., Muhiadin, B.J., Hussin, A.S.M. 2020. Spray drying for the encapsulation of oils-A review. *Molecules.* 25: 3873. doi: 10.3390/molecules25173873
- Nikkola, J. 2016. Smart multifunctional hybrid coatings with adjustable permeability for migration barriers. In: Montemor, M.F. (Ed.). *Smart Composite Coatings and Membranes*. Woodhead Publishing. Cambridge, UK. pp. 351–370.
- Porzio, M. 2004. Flavor encapsulation: a convergence of science and art. *Food Technol.* 58: 40–47.
- Reineccius, G.A. 1991. Carbohydrates for flavor encapsulation. *Food Technol.* 45: 144–146.
- Turek, C., Stintzing, F.C. 2013. Stability of essential oils: a review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 12: 40–53. doi: 10.1111/1541-4337.12006

การพัฒนาวัสดุปลูกธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร Development of natural growing media from agricultural waste materials for consumers in Bangkok

ชลิดา ตาน้อย*, หทัยรัตน์ ริมคีรี, อูศมา Soontrunnarudrungsri

Chalida Tanoi*, Hathairat Rimkeeree, Aussama Soontrunnarudrungsri

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chalida.tan@ku.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันความต้องการการปลูกพืชผักสวนครัวมากขึ้น การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุปลูกจากธรรมชาติสำหรับผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร โดยใช้แบบสอบถามเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 200 คน ซึ่งเป็นกลุ่มผู้บริโภคที่เลือกซื้อสินค้าในเขตกรุงเทพมหานครเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ SWOT จากนั้นศึกษาวัสดุปลูก 4 ตำรับ คือ ตำรับที่ 1 (ขุยมะพร้าว 9 ส่วน : ชั่งข้าวโพด 1 ส่วน : ขาน้อย 5 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ซี.พี.หมอดิน 1 ส่วน) ตำรับที่ 2 (ขุยมะพร้าว 9 ส่วน : ชั่งข้าวโพด 1 ส่วน : ต้นข้าวโพดสับ 3 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน 1 ส่วน) ตำรับที่ 3 (ขุยมะพร้าว 13 ส่วน : ชั่งข้าวโพด 1 ส่วน : ต้นข้าวโพดสับ 2 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน 1 ส่วน) และใช้วัสดุเพาะกล้าของบริษัท เจียไต๋โปรดัคส์ จำกัด เป็นตัวเปรียบเทียบ วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) จำนวน 3 ซ้ำ พบว่า ตำรับที่ 2 มีความเหมาะสมในการเพาะปลูกมากที่สุด โดยให้เปอร์เซ็นต์การงอก จำนวนใบต่อต้น น้ำหนักรากสดและน้ำหนักรากแห้ง น้ำหนักใบลำต้นสดและน้ำหนักใบลำต้นแห้งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับอื่น

คำสำคัญ: พืชผักสวนครัว, วัสดุปลูกจากธรรมชาติ, วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

Abstract

Today, the demand for vegetable growing of consumers is highly increasing. The aim of this research was to develop natural growing media for consumers in Bangkok. The data was collected by using the questionnaire with 200 respondents of consumers in Bangkok and was used for SWOT analysis. In Prototype development, 4 natural media soil for seeding growth, were studied: media mixture 1 (coconut fiber 9: corn cob 1: organic fertilizer C.P. 5: corn stalk fiber 1) mixture 2 (coconut fiber 9: corn cob 1: corn stalk fiber 3: Organic fertilizer C.P.1) mixture 3 (coconut fiber 13: corn cob 1: corn stalk fiber 1: Organic fertilizer C.P.) and control (peat moss). The experimental design used in this study was completely randomized design (CRD) with 3 replications. The results indicated that seedling applied with media mixture 2 gave the highest germination percentage, leave number, fresh and Dry weight of root and fresh and dry weight of plant compared with other treatments.

Keywords: Agricultural waste materials, Home-grown vegetable, Natural growing media

คำนำ

ในปัจจุบันคนไทยและคนทั่วโลกหันมาดูแลสุขภาพมากขึ้นเนื่องจากสถานการณ์โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) ระบาดไปทั่วโลก แต่ละประเทศทั่วโลกได้มีมาตรการงดการเดินทางงดกิจกรรมนอกบ้าน เนื่องจากแต่ละพื้นที่มีความเสี่ยงในการติดเชื้อ ผลจากการเกิดโรคระบาดโควิด (COVID-19) ทำให้เกิดเทรนด์การใช้ชีวิตของผู้บริโภคในยุคชีวิตวิถีใหม่พฤติกรรมผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับการดูแลสุขภาพมากขึ้น เลือกซื้อสินค้าที่มีคุณภาพรับประทานอาหารที่สะอาดมีความปลอดภัยของอาหาร ต้องการรับประทานอาหารที่มีประโยชน์และลดการรับประทานข้าวนอกบ้านทำให้ผู้คนได้ใช้เวลาอยู่บ้านมากขึ้นเนื่องจากการเดินทางที่จำกัดเวลา ทำให้มีกิจกรรมยามว่างมากขึ้น กิจกรรมที่ได้รับความนิยม เช่น การออกกำลังกาย ฝึกทำขนมและอาหาร จัดเก็บบ้าน ทำสวน ปลูกต้นไม้ โดยเฉพาะการปลูกไว้รับประทานเองภายในครัวเรือนมากขึ้นเพราะมั่นใจในความปลอดภัยและลดรายจ่ายซื้อกับข้าว ได้รับประทานผักสดๆ เช่น การปลูกผักปลอดสารเคมีในพื้นที่จำกัดจะเห็นได้ว่าธุรกิจเมล็ดพันธุ์และวัสดุปลูกทั่วโลกในช่วงโรคระบาดโควิด (COVID-19) มียอดขายเติบโตสูงขึ้นในสถานการณ์โควิด (COVID-19) ระบาด ภาคธุรกิจเกษตรเป็นธุรกิจที่ได้รับความสนใจจากคนรุ่นใหม่มากขึ้น สอดคล้องกับความต้องการซื้อเมล็ดพันธุ์และวัสดุปลูกพืชเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในการปลูกผักปัญหาที่พบส่วนมากคือปลูกไม่ขึ้น เนื่องจากขาดความอุดมสมบูรณ์ของดินในวัสดุปลูก การใช้วัสดุต่างๆ ที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น ขุยมะพร้าว กาบมะพร้าวสับ แกลบดิน แกลบเผา ใบไม้แห้ง และปุ๋ยคอกมาใช้เป็นวัสดุปลูกอาจเป็นทางเลือก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุมชนเมืองที่ไม่มีพื้นที่ในการปลูกผัก สามารถใช้วัสดุปลูกสำหรับปลูกผักในกระถางตามอาคารบ้านเรือนไว้บริโภคได้ (สุทิน และคณะ, 2556) วัสดุปลูกหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าดินผสมพร้อมปลูก เป็นวัสดุซึ่งมีจำหน่ายตามร้านขายไม้ดอกไม้ประดับและร้านค้าโมเดิร์นเทรดผลิตโดยใช้ส่วนผสมที่ต่างกัน เป็นวัสดุที่คนส่วนใหญ่นำไปปลูกต้นไม้ปลูกพืชผักเป็นดินที่ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมต่อการปลูกพืช ประโยชน์ของวัสดุปลูกพร้อมปลูกคือเพิ่มปริมาณความชื้นและอินทรีย์วัตถุในดิน โดยทั่วไปมักจะมีส่วนผสมแกลบดำและขุยมะพร้าว ส่วนผสมอื่นๆ ขณะเดียวกันวัสดุปลูกพืชที่มีคุณภาพสูงแต่ราคาแพงจะนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น พีทมอส ผลิตจากซากมอสที่ทับถมเป็นเวลานานหลายพันปีในสภาพกดทับได้ความเย็นของหิมะพบได้เฉพาะภูมิภาคประเทศหนาวจัดเท่านั้นต้นทุนการผลิตสูง การเลือกผลิตภัณฑ์วัสดุปลูกสำเร็จรูปจากวัสดุราคาไม่แพงจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาวัสดุปลูกจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมในการเพาะปลูกพืชสำหรับผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครหรือผู้ที่อาศัยในเขตเมือง

อุปกรณ์และวิธีการ

รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านการตลาดและผลิตภัณฑ์เพื่อนำมาใช้กำหนดแนวทางในการพัฒนาวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมจากธรรมชาติ มีการศึกษากลุ่มตัวอย่างก่อนการวิจัยโดยใช้แบบสอบถามเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 200 คน ซึ่งเป็นกลุ่มผู้บริโภคที่เลือกซื้อสินค้าในเขตกรุงเทพมหานคร ดำเนินการทดลองวัสดุปลูก ณ โรงเรือนของบริษัท เจริญโภคภัณฑ์โปรดิ๊วส์ จำกัด

อุปกรณ์และวัสดุ

อุปกรณ์

- 1) Hot air oven
- 2) Combustion
- 3) Spectrometer
- 4) Flame photometer

- 5) pH meter
- 6) Conductivity meter
- 7) เครื่องวัดอุณหภูมิ (เครื่องวัดอุณหภูมิ รุ่น SK-1110)
วัสดุ
 - 1) เมล็ดพันธุ์กรีนไคค รอยัล ของบริษัทเจียไต๋ โปรดิวิชั่น จำกัด
 - 2) ขุยมะพร้าว (อายุ > 6 เดือน, %MC < 60)
 - 3) ชั่งข้าวโพด (ขนาด 1-3.335 mm, %MC 15-20)
 - 4) ต้นข้าวโพดสับ (ต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อายุ 90 วัน)
 - 5) ขาน้อยสับ (%MC < 60, ขนาดสับให้ได้ชั้นเล็ก ๆ)
 - 6) ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน (ผ่านการหมักสมบูรณ์ %MC 25-45%)
 - 7) วัสดุเพาะกล้าพืชมอส ของบริษัท เจียไต๋ โปรดิวิชั่น จำกัด (วัสดุเพาะปลูกที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ)

วิธีการ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) กำหนดกรรมวิธี คือ ดำรับของวัสดุปลูกจำนวน 4 ดำรับ จำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

ดำรับควบคุม (วัสดุเพาะกล้าพืชมอสของบริษัท เจียไต๋ โปรดิวิชั่น)

ดำรับที่ 1 (ขุยมะพร้าว 9 ส่วน : ชั่งข้าวโพด 1 ส่วน : ขาน้อย 5 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน 1 ส่วน)

ดำรับที่ 2 (ขุยมะพร้าว 9 ส่วน : ชั่งข้าวโพด 1 ส่วน : ต้นข้าวโพดสับ 3 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน 1 ส่วน)

ดำรับที่ 3 (ขุยมะพร้าว 13 ส่วน : ชั่งข้าวโพด 1 ส่วน : ต้นข้าวโพดสับ 2 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน 1 ส่วน)

ดำรับที่ 4 (ชุดเปรียบเทียบ วัสดุเพาะกล้าพืชมอส ของบริษัท เจียไต๋ โปรดิวิชั่น จำกัด)

จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปลูก ทั้ง 4 ดำรับ ดังนี้

- สี
- ความนุ่ม
- ขนาด (%ฝุ่นผง)
- เปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ
- ความหนาแน่น (g/cm^3)
- เปอร์เซ็นต์ความโปร่งพรุน

จากนั้นนำเมล็ดพันธุ์กรีนไคค ปลูกในวัสดุปลูกทั้ง 4 ดำรับ จำนวน 3 ซ้ำ หลังจากนั้นปฏิบัติและดูแลรักษาพร้อมทั้งให้น้ำวันละ 2 ครั้ง คือ ช่วงเช้า และช่วงบ่าย และบันทึกข้อมูลดังนี้

- เปอร์เซ็นต์ความงอก (%) เปอร์เซ็นต์การงอกโดยตรวจนับจำนวนต้นอ่อนปกตินับครั้งแรก (First count) ในวันที่ 7 หลังจาก เพาะเมล็ดและนับครั้งสุดท้าย (Final count) ในวันที่ 16 หลังเพาะเมล็ดจากนั้น

คำนวณความงอกของเมล็ดพันธุ์เป็นเปอร์เซ็นต์ตามสมการ (Equation 1):

$$\text{การงอก (\%)} = \frac{\text{จำนวนต้นอ่อนปกติที่งอก} \times 100}{\text{จำนวนเมล็ดที่เพาะ}} \quad (1)$$

- ความหนาแน่น (g/cm^3) คำนวณตามสมการ (Equation 2):

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{X}{Y} \quad (2)$$

โดย X คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g), Y คือ ปริมาตรของตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

- ความโปร่งพรุน คำนวณตามสมการ (Equation 3):

$$\text{ความโปร่งพรุน} = \frac{((\text{น้ำหนักวัตถุเปียก} + \text{น้ำ}) - \text{น้ำหนักวัตถุแห้ง})) \times 100}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง}} \quad (3)$$

- การชั่งน้ำหนักสดและหาน้ำหนักแห้ง (กรัม)

หาได้จากการชั่งน้ำหนักของส่วนลำต้น ใบ และราก ของกล้าสลัดเมื่ออายุครบ 21 วันทำโดยตัดต้นกล้าทั้งหมดไปชั่งน้ำหนักสดและหาน้ำหนักแห้งโดยทำการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านการตลาดและผลิตภัณฑ์เพื่อนำมาใช้กำหนดแนวทางในการพัฒนาวัสดุปลูกธรรมชาติที่มีส่วนผสมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากธรรมชาติ การศึกษาการตัดสินใจซื้อวัสดุปลูกของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครโดยใช้แบบสอบถามเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 200 คน ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงมากกว่าเพศชาย โดยมีเพศหญิงคิดเป็นร้อยละ 62.9 และเพศชายคิดเป็น ร้อยละ 37.1 ส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 21-30 ปี คิดเป็นร้อยละ 44.6 มีอาชีพพนักงานเอกชน คิดเป็นร้อยละ 51.5 ส่วนใหญ่มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนมากกว่า 40,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 32.2 มีการศึกษาระดับปริญญาตรี คิดเป็นร้อยละ 62.9 มีสถานภาพโสด คิดเป็นร้อยละ 63.9 ผลต่อการตัดสินใจซื้อวัสดุปลูกในร้านค้าแบบโมเดิร์นเทรดของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร พบว่า ราคา โปรโมชัน/ของแถม โฆษณา สถานที่จัดจำหน่ายรูปแบบบรรยากาศ ตราสินค้า สีส้น และสัญลักษณ์รับรองคุณภาพมีผลต่อการตัดสินใจซื้อวัสดุปลูกในร้านค้าแบบโมเดิร์นเทรดของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค (SWOT Analysis) ในช่วงแรกก่อนที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์วัสดุปลูกธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร พบว่า จุดแข็งหรือข้อได้เปรียบ (Strengths) คือ บรรรยากาศสามารถดึงดูดความน่าสนใจในการเลือกซื้อ วัสดุปลูกเป็นสินค้าผลิตจากวัสดุปลูกจากธรรมชาติปราศจากสารเคมี จุดอ่อนหรือข้อเสียเปรียบ (Weaknesses) คือ ธุรกิจเพิ่งเริ่มต้นทำตลาดวัสดุปลูกหรือดินปลูก อำนาจการต่อรองจากลูกค้าลดลงเนื่องจากต้นทุนราคาสูง โอกาสที่จะดำเนินการได้ (Opportunities) คือ เทรนด์การรักสุขภาพเพิ่มมากขึ้น สถานการณ์โรคโควิด (COVID-19) ทำให้คนอยู่บ้านมากขึ้น ทดแทนการนำเข้าวัสดุปลูก Peat moss ที่มีราคาสูง อุปสรรค (Threats) คือ ผู้บริโภคยังไม่มั่นใจในการซื้อสินค้าและการแข่งขันทางการตลาดค่อนข้างสูง ผลการศึกษาสูตรวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชอายุสั้น โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปลูกจากธรรมชาติเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การงอกของผักสลัดจากการเพาะเมล็ดสลัดในวัสดุปลูกแตกต่างกันทั้ง 4 ชนิด พบว่าในลำดับที่ 1 ตำรับที่มีเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุด (92.85%) คือ ตำรับที่ 4 เป็นวัสดุปลูกพีทมอสเจียใต้ และตำรับที่ 2 ได้เปอร์เซ็นต์การงอกที่เท่ากันโดยเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำที่มากจะส่งผลให้ผักสลัดสามารถดูดซับธาตุอาหารได้มากกว่าวัสดุที่มีเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำน้อย เพราะส่งผลให้เกิดการระคายน้ำมากการดูดซับธาตุอาหารจึงมีน้อยพืชจะเกิดการเจริญเติบโตที่ต่ำที่สุด สอดคล้องกับรายงานของ อภิรักษ์ (2540) กล่าวว่าหากอุ้มน้ำได้ดีและเกิดการระเหยของน้ำได้เร็วเนื่องจากมีช่องว่างขนาดใหญ่ทำให้พืชอุ้มน้ำได้น้อยจำนวนมากพืชปลูกจึงแสดงอาการขาดน้ำได้เร็วกว่าวัสดุปลูกอื่นๆ จำนวนใบจาก (Fig.1) จะเห็นได้ว่าเมื่อต้นกล้าผักสลัดอายุ 21 วัน พีทมอสเจียใต้ มีจำนวน 6 ใบ ตำรับที่ 2 มีจำนวนใบ 6 ใบ

สี ดำรับที่ 3 มีจำนวนใบ 6 ใบ และดำรับที่ 1 จำนวน 5 ใบเป็นดำรับที่ให้จำนวนใบที่น้อยสุด ด้านของสีใบทั้ง 4 ดำรับมีสีเขียวเข้มเหลืองใกล้เคียงกัน จากการศึกษาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี (Table 2) ดำรับที่ 1 มีธาตุไนโตรเจน (N) น้อยที่สุด ไนโตรเจน (N) ช่วยให้มีสีเขียวเร่งการเจริญเติบโตทางใบและลำต้น กระตุ้นให้พืชเจริญเติบโตแข็งแรง หากพืชได้รับไนโตรเจนมากตั้งแต่ระยะแรกนั้นส่วนเหนือดินจะเจริญเร็ว ไนโตรเจนที่อยู่ใบประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์จะอยู่ในคลอโรพลาสต์เป็นองค์ประกอบของโปรตีนซึ่งมีหน้าที่สำคัญมากในเซลล์ เป็นธาตุที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืชและคลอโรฟิลล์เป็นส่วนที่ทำให้พืชมีสีเขียวและมีความสำคัญในการสังเคราะห์แสง (ยงยุทธ, 2543)

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุปลูก (Physical properties)

Table 1 Physical properties of 4 growing media mixture

Treatment	Physical properties					
	color	softness	Size (% of dust)	Water Holding Capacity	Density (g/cm ³)	% Porosity
1	2	2	24.28	82.87	0.46	22.32
2	2	2	24.96	83.62	0.43	26.13
3	2	2	22.48	83.71	0.43	24.09
4	1	1	28.90	85.79	0.49	28.52

Note: Color (1 = black, 2 = dark brown, 3 = brown) softness (1 = high, 2 = moderate, 3 = low)

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

Table 2 Chemical properties of 4 growing media mixture

Treatment	Chemical properties						
	MC (%)	Total N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	OM (%)	pH	EC
1	57.54 ²	0.29 ⁴	0.14 ¹	0.48 ³	19.40 ²	7.12 ³	1.14 ³
2	56.67 ³	0.33 ²	0.13 ²	0.57 ¹	18.85 ⁴	7.30 ¹	1.39 ¹
3	54.12 ⁴	0.35 ¹	0.12 ³	0.52 ²	19.15 ³	7.28 ²	1.27 ²
4	80.00 ¹	0.31 ³	0.07 ⁴	0.14 ⁴	23.63 ¹	6.76 ⁴	0.27 ⁴

Note: Numbers show the scores in order from highest to lowest

Table 3 Germination percentage and leave number of Green Oak seedling in 4 growing media mixture

Treatment	Germination (%)		
	Week 1	Week 2	Leave number
1	78.57 ^c	78.57 ^c	5 ^b
2	92.85 ^a	92.85 ^b	6 ^a
3	89.28 ^b	89.28 ^b	6 ^a
4	92.85 ^a	96.42 ^a	6 ^a

* Means in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

พบว่าน้ำหนักสดของรากมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยดำรับที่ 4 วัสดุพีทมอสเจียไต้ซุดเปรียบเทียบให้น้ำหนักสดรากมากที่สุด (0.44 กรัม) จาก (Table 2) พบว่าวัสดุพีทมอสมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากที่สุดซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างดิน มีจุลินทรีย์ขนาดเล็กเป็นส่วนเสริมสารอาหารในดินแก่พืชรองลงมาคือดำรับที่ 2 (0.39 กรัม) ดำรับที่ 3 (0.29 กรัม) ดำรับที่ 1 (0.19 กรัม) ตามลำดับ ดังแสดงใน (Table 4) พบว่าน้ำหนักสดใบและลำต้นสดค้ำคล้องกับน้ำหนักสดของราก โดยดำรับที่ 4 วัสดุพีทมอสเจียไต้ซุดเปรียบเทียบให้น้ำหนักสดใบและลำต้นใบมากที่สุด (3.07 กรัม)

น้ำหนักแห้งรากและน้ำหนักแห้งของใบและลำต้น พบว่าดำรับที่ 2 ดำรับที่ 3 และดำรับที่ 4 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ดำรับที่ 1 ขุยมะพร้าว 9 ส่วน : ช้างข้าวโพด 1 ส่วน : ชานอ้อย 5 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ซี.พี. หมอดิน 1 ส่วน ให้น้ำหนักสดของราก (0.01 กรัม) ให้น้ำหนักสดของรากน้อยที่สุดจากส่วนผสมพบว่า ดำรับที่ 1 มีส่วนผสมชานอ้อย 5 ส่วนซึ่งมากกว่าดำรับทดลองอื่นและจาก (Table 1) ดำรับที่ 1 ความโปร่งพรุนน้อยทำให้มีช่องว่างอากาศในวัสดุน้อยเป็นผลทำให้รากพืชดูดซับธาตุอาหารได้น้อย ไนโตรเจนรวม มีค่าน้อย (Table 2) ทำให้การเจริญเติบโตของพืชในช่วงเพาะกล้า พืชที่ได้รับไนโตรเจน (N) ไม่เพียงพอพืชเมื่อขาดไนโตรเจน (N) จะแคะแกร็น โตช้า (Fig.1)



Fig. 1 Green Oak seedling at 21 days in 4 growing media mixture

Table 4 Fresh and Dry weight of root and plant of Green Oak seedling at 21 days in 4 growing media mixture

Treatment	Fresh weight root (g)	Fresh weight plant (g)	Dry weight root (g)	Dry weight plant (g)
1	0.19 ^c	0.74 ^c	0.01 ^b	0.06 ^b
2	0.39 ^a	3.04 ^a	0.02 ^a	0.2 ^a
3	0.29 ^b	2.71 ^b	0.02 ^a	0.19 ^a
4	0.44 ^a	3.07 ^a	0.02 ^a	0.21 ^a

* Means in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

การศึกษาผลของวัสดุต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าสลัดที่ปลูกในวัสดุกรีนไฮค ในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ โดยใช้วัสดุปลูกพีทมอสของบริษัทเจียไต้โปรดิวิจ จำกัด ซุดเปรียบเทียบ พบว่าต้นกล้าดำรับที่ 2 ให้ผลใกล้เคียงกับวัสดุปลูกพีทมอสมากในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมี รองลงมาคือดำรับที่ 3 เนื่องจากดำรับที่ 2 และดำรับที่ 3 มีส่วนผสมของต้นข้าวโพดสับจะช่วยดูดซับธาตุอาหารพืชเพิ่มสูงขึ้น และทำให้เนื้อวัสดุปลูกละเอียดร่วนซุยเกิดการแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างรากพืชกับช่องว่างรอบๆ วัสดุปลูกคล้ายพีทมอสที่มีเนื้อสัมผัสละเอียดให้คุณสมบัติกักเก็บน้ำและธาตุอาหารเพื่อเป็นประโยชน์ต่อพืชส่วนดำรับที่ 1 ให้ผลที่เจริญเติบโตต้นกล้าที่ต่ำที่สุด เนื่องจากดำรับที่ 1 มี

องค์ประกอบของชานอ้อยมีขนาดเนื้อวัสดุหยาบทำให้เมล็ดมีความสามารถในการแทงยอดอ่อนขึ้นมาลดลงและสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำที่น้อยกว่าตัวรับทดลองอื่นๆ ส่งผลในเกิดการระบายน้ำมากการดูดซับธาตุอาหารจึงมีน้อยพืชจะเกิดการเจริญเติบโตที่ต่ำที่สุด ดังแสดงใน (Table 1) และเนื่องด้วยผักสลัดเป็นพืชใบกว้างต้องการน้ำมากจึงแสดงอาการขาดน้ำได้เร็วกว่าวัสดุอื่นๆ (Fig.1) ส่วนวัสดุปลูกอื่นๆ มีส่วนผสมของขุยมะพร้าว ชังข้าวโพด ต้นข้าวโพดสับ ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน ทำให้มีการเจริญเติบโตได้ดี ดังนั้นวัสดุปลูกที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกพืช คือตัวรับที่ 2 และตัวรับที่ 3 ทั้งนี้การคัดเลือกวัสดุปลูกที่เหมาะสมที่สุดจากเปอร์เซ็นต์การงอก พบว่าในสัปดาห์ที่ 1 ตัวรับที่ 2 ให้ต้นกล้าที่มีเปอร์เซ็นต์การงอกสูง (92.85%) เท่ากับวัสดุปลูกที่ผสมสเลียมได้ ดังนั้นจึงใช้ ตัวรับที่ 2 ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์วัสดุปลูกจากส่วนผสมจากธรรมชาติต่อไป

สรุป

จากการศึกษากลุ่มตัวอย่าง 200 คน พบว่าราคา โปรโมชัน/ของแถม โฆษณา สถานที่จัดจำหน่ายรูปแบบบรรจุภัณฑ์ ตราสินค้า สีสินค้า และสัญลักษณ์รับรองคุณภาพมีผลต่อการตัดสินใจซื้อวัสดุปลูก จากการศึกษาวัสดุปลูก 4 ตัวรับพัฒนาวัสดุปลูกธรรมชาติโดยนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นวัสดุปลูกสำหรับพืชผักสวนครัว พบว่าตัวรับที่เหมาะสมในการเพาะปลูกพืชสำหรับผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครที่สุดในการเพาะปลูกคือ ตัวรับที่ 2 (ขุยมะพร้าว 9 ส่วน : ชังข้าวโพด 1 ส่วน : ต้นข้าวโพดสับ 3 ส่วน : ปุ๋ยอินทรีย์ ซี.พี.หมอดิน 1 ส่วน) สามารถทำให้พืชดูดซับธาตุอาหารส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและให้เปอร์เซ็นต์ความงอกสูง (92.85%) ใกล้เคียงกับวัสดุเพาะกล้าของบริษัทเจียไต๋โปรดิวซ์ จำกัด ซึ่งเป็นชุดเปรียบเทียบในการศึกษาทดลองในครั้งนี้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณบริษัท เจริญโภคภัณฑ์โปรดิวซ์ จำกัด ที่มีส่วนช่วยเหลือให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มอบทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

เอกสารอ้างอิง

- ขจรยศ ศิรินิล, อรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์. 2563. การพัฒนาวัสดุดินผสมเพื่อการเพาะปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค. แก่นเกษตร 48 : 990-1001.
- เจนจิรา ชุมภูคำ, สิริกาญจนดา ตาแก้ว. 2559. ผลของวัสดุปลูกต่อการงอกของเมล็ด การรอดชีวิต และการเจริญเติบโตของต้นกล้ามันเบอรี่พันธุ์เวียดนาม GQ2. TJST 5: 283-295. doi.org/10.14456/tjst.2016.28
- ยงยุทธ ใสตสสา. 2543. ธาตุอาหารพืช. ภาควิชาปฐพีวิทยา.การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กรุงเทพฯ. 135 หน้า.
- สุทิน ทวยหาญ และคณะ. 2556. การศึกษาวัสดุปลูกจากดินผสมที่เหมาะสมสำหรับผักคะน้า 5 อัตรา. วารสารเกษตรประจักษ์ 10: 117-124.
- เหนียวคำ มีนาที. 2555. ผลของวัสดุปลูกอินทรีย์และน้ำหมักชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า มะเขือเทศ. วิทยานพนธ์ปริญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อภิสิทธิ์ ชิตวงษ์, ปราโมทย์ พรสุริยา, ธนาวัฒน์ เยมอ. 2563. วัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด Red oak. แก่นเกษตร 48: 1093-1100

Brady, N. 1990. The nature and properties of soils. 10th Ed., Macmillan Publishing Company, Cranbury.

ผลของการเตรียมมะเขือเทศต่อคุณภาพเพียวแรมมะเขือเทศและแนวทางการใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่

Effects of pretreatment methods of tomato qualities of tomato puree and application guidelines for bakery product development

ศศิภรณ์ อ้นสีบสาย, เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล*

Sachiporn Onsuabsai, Saowanee Lertworasirikul*

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: saowanee.l@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมวัตถุดิบมะเขือเทศต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเพียวแรมมะเขือเทศ เพื่อใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เค้กเสริมเพียวแรมมะเขือเทศที่มีคุณภาพดี และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้ผู้บริโภค ในงานวิจัยนี้แบ่งการเตรียมมะเขือเทศเป็น 2 วิธี ได้แก่ มะเขือเทศที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที และมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการผลิตเป็นเพียวแรม ด้วยการปั่นบดที่ความเร็วรอบ 7500 rpm เป็นเวลา 5 นาที ผลทดลองแสดงว่าปริมาณไลโคปีน และเบต้าแคโรทีนมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในเพียวแรมมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก โดยมีค่าเฉลี่ยปริมาณไลโคปีน และเบต้าแคโรทีนอยู่ที่ 13158.34 ไมโครกรัม/100 กรัม และ 3311.53 ไมโครกรัม/100 กรัม จากการสำรวจผู้บริโภคทางออนไลน์จำนวน 107 ราย พบว่าผู้บริโภคสนใจการเสริมเพียวแรมมะเขือเทศในเค้กเนย มัฟฟิน เค้กชิฟฟอน และเค้กฟองน้ำ 45.8% 22.5% 22.4% และ 9.30% ตามลำดับ

คำสำคัญ: เบเกอรี่, เบต้าแคโรทีน, ไลโคปีน, เพียวแรมมะเขือเทศ

Abstract

This research aimed to study the effects of preparation methods of tomatoes on physical and chemical qualities of tomato puree, which was used to produce the product of tomato puree cake with good qualities and increased nutritional values for consumers. In this research, tomato pretreatments were divided into 2 methods; tomatoes that were blanched at 95°C for 8 minutes and tomatoes that were not blanched. Ground at 7500 rpm for 5 minutes. The results showed that the average contents of lycopene and beta-carotene were highest in the unblanched tomato puree, with average lycopene and beta-carotene content at 13158.34 µg/100g and 3311.53 µg/100g, respectively, which were significantly higher than those with blanching. From the online survey of 107 consumers, it was found that consumers were interested adding tomato puree in butter cake, muffin, chiffon cake, and sponge cake with 45.80%, 22.45%, 22.45% and 9.30%, respectively.

Keywords: Bakery, Beta-carotene, Lycopene, Tomato puree

คำนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิจัยมุ่งเป้าไปที่การจัดการกับโรคที่เกี่ยวข้องกับอาหารผ่านการส่งเสริมการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารอุดมด้วยโปรตีนวิตามินแร่ธาตุ และใยอาหารสูงจากวัตถุดิบที่หาได้ในท้องถิ่น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมเพียวเร่มะเขือเทศ เพื่อนำไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์จากเพียวเร่มะเขือเทศที่มีคุณค่าทางโภชนาการต่อไป

มะเขือเทศ (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Lycopersicon esculentum* Mill.) เป็นพืชชนิดหนึ่งที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร ผลมะเขือเทศมีสารที่สำคัญ ที่ชื่อว่า Lycopene ซึ่งเป็นสารสีแดงและ Beta-carotene (วูมิคักด์, 2548)

ไลโคปีน เป็นตัวช่วยป้องกันความเสียหายของไขมัน โปรตีน และดีเอ็นเอ ที่เกิดจากกระบวนการ Oxidative stress โดยสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (จากปฏิกิริยา reactive ของออกซิเจน) แสดงให้เห็น ได้ว่า ไลโคปีนจะมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ และมีงานวิจัยกล่าวว่าไลโคปีนมีศักยภาพ และมีความจำเพาะในการต้านการเพิ่มจำนวนของเซลล์มะเร็ง (Levy et al., 1995) ถ้าได้รับไลโคปีนในปริมาณสูงจะสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งกระเพาะอาหารและต่อมลูกหมากได้อีกด้วย (Tsubono et al., 1999)

เค้กเป็นหนึ่งในเบเกอรี่ที่เป็นที่ชื่นชอบและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดสำหรับผู้บริโภคทั่วโลก เค้กแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างๆ คุณภาพของเค้กที่ดีขึ้นอยู่กับการใช้ส่วนผสม หรือวัตถุดิบที่มีคุณภาพดี มีวิธีการผสมและการอบที่ถูกต้อง เค้กมักมีสารประเภทคาร์โบไฮเดรต และ ไขมันเป็นหลัก เพื่อเสริมคุณค่าทางโภชนาการ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจนำมะเขือเทศมาใช้ในการเสริมคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์ขนมอบ เพื่อมุ่งหวังให้ได้เค้กที่มีคุณภาพและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้ผู้บริโภคได้รับประทานสิ่งที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ขนมอบ และยังได้ผลิตภัณฑ์ที่แปลกใหม่ เป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้ผลผลิตทางการเกษตร

เพียวเร่ (Puree) คือ เนื้อผัก ผลไม้ หรือ ธัญพืช นำมาบดให้ละเอียดและกรอง หรือลดขนาดด้วยวิธีทางกลศาสตร์อื่นๆ จนได้เนื้อของวัตถุดิบที่เข้มข้น โดยวิธีการทำเพียวเร่เริ่มจากการคัดเลือกวัตถุดิบนำวัตถุดิบล้างทำความสะอาดบดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Yap et al., 2017)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมวัตถุดิบมะเขือเทศ

มะเขือเทศพันธุ์ราชินีซื้อจากห้างสรรพสินค้า Makro คัดเลือกขนาดผลที่มีขนาด 28–32 มิลลิเมตรด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ และมีสีอยู่ในช่วง 10R 4/10 – 10R 4/12 โดยเทียบกับ Munsell Book of Color Matte Edition ประเทศสหรัฐอเมริกา จากนั้นล้างทำความสะอาด และสะอาดให้นำไปทำการผ่าครึ่ง นำมะเขือเทศมาแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ทำการลวกมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Gheysena et al., 2019) ชุดที่ 2 ใช้เป็นผลสดที่ทำการผ่าครึ่งแล้วเตรียมนำไปทำเพียวเร่ จากนั้นแช่น้ำเย็นเป็นเวลา 3 นาที

2. การเตรียมเพียวเร่มะเขือเทศ

นำมะเขือเทศที่ผ่านกระบวนการเตรียมทั้ง 2 แบบ มาปั่นบดด้วยความเร็วรอบ 7,500 rpm เป็นเวลา 5 นาที ด้วยเครื่องปั่นบด รุ่น EM-44A ยี่ห้อ SHARP ประเทศไทย จนเป็นเพียวเร่มะเขือเทศ จากนั้นเก็บเพียวเร่มะเขือเทศไว้ในช่องแช่แข็งเพื่อเตรียมวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี

3. การวิเคราะห์คุณภาพของเพียวแรมะเชือกเทศ

3.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

3.1.1 การวัดค่าร้อยละ Brix

ใส่เพียวแรมะเชือกเทศหดยกลงบนปริซึมของเครื่องวัด °Brix (รุ่น Master-M ยี่ห้อ ATAGO ประเทศญี่ปุ่น) 1-2 หยด จากนั้นปิดแผ่นปิดใส สังเกตตัวอย่างต้องกระจายเต็มพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ ส่งดูสเกลทางช่องสำหรับดู อ่านสเกลตรงบริเวณรอย ต่อของแถบทึบและแถบสว่างขีดตัวอย่างออกจากปริซึมด้วยกระดาษทิชชูชุบน้ำหมาดๆ จนสะอาด วัดค่าทั้งหมด 5 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.1.2 วัดค่าสี $L^* a^* b^*$

นำเพียวแรมะเชือกเทศใส่ในคิวเวตแก้วทรงกระบอกปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของคิวเวต นำคิวเวตที่มีตัวอย่างไปวางที่ Reflectance ของเครื่องวัดค่าสี (รุ่น Hunter lab ยี่ห้อ Ultra scan PRO ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยให้ส่วนใสของคิวเวตอยู่ตรงช่องวัดค่าสี ปิดฝาครอบคิวเวต เพื่อไม่ให้แสงภายนอกมีผลต่อสีของตัวอย่าง เครื่องจะทำการวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างให้อัตโนมัติ วัดค่าทั้งหมด 5 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.1.3 วัดค่าความชื้นเหน็ด

เทเพียวแรมะเชือกเทศลงในช่องเก็บของเหลวบนเครื่องวัดความชื้นเหน็ด (Bostwick Consistometer ยี่ห้อ CSC Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา) จนของเหลวเต็มช่องใส่ตัวอย่างตรงบริเวณที่มีสะพานประตูล็อคกันไว้ ทิ้งไว้จนกว่าของเหลวที่อยู่ในช่องเก็บนิ่งดีแล้ว เริ่มเปิดล็อกสะพานประตูเพื่อให้ของเหลวค่อยๆ ไหล แบบแผ่กระจายไปตามทางของรางเท โดยให้จับเวลาในการไหลที่ระยะทางในการไหล ในเวลา 30 วินาทีที่อุณหภูมิห้อง โดยอ่านค่าจากระยะของเหลวตัวอย่างไหลไปได้กี่เซนติเมตร วัดค่าทั้งหมด 5 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

วิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนและเบต้าแคโรทีนในตัวอย่างเพียวแรมะเชือกเทศตามวิธีของ Anthon and Barrett (2007) โดยนำเพียวแรมะเชือกเทศซึ่งให้น้ำหนัก 0.6 กรัม เติม Hexane (ยี่ห้อ Qrec ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์) : Acetone (ยี่ห้อ Merck ประเทศ เยอรมันนี) : Ethanol (ยี่ห้อ Merck ประเทศ เยอรมันนี) (HAE) อัตราส่วน 2:1:1 ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่อง Homogenizer รุ่น SS3 ยี่ห้อ STUART ประเทศญี่ปุ่น ที่ 500 REV/MIN เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปิดฝาทิ้งไว้ 15 นาที แล้วเติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร และปิดฝาทิ้งไว้อีก 15 นาที ทำการดูดสารละลายด้านบนออกมาเพื่อวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 444 และ 503 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (รุ่น 160 A ยี่ห้อ SHIMADZU ประเทศญี่ปุ่น) โดยใช้ HAE เป็นตัวเปรียบเทียบ คำนวณหาปริมาณไลโคปีนและเบต้าแคโรทีนตามสมการ (Equation 1 และ 2)

$$\text{ปริมาณไลโคปีน (ไมโครกรัม/100กรัม)} = (6.95 \times \text{Abs. } 503) - (1.59 \times \text{Abs. } 444) \times 295.35 \times (V/W) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ปริมาณเบต้าแคโรทีน (ไมโครกรัม/100กรัม)} = (9.38 \times \text{Abs. } 444) - (6.70 \times \text{Abs. } 503) \times 295.35 \times (V/W) \times 100 \quad (2)$$

- เมื่อ Abs.503 คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 503 นาโนเมตร
Abs.444 คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 444 นาโนเมตร
V คือ ปริมาตรสารละลาย HAE (มิลลิลิตร)
W คือ น้ำหนักตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

4. การสำรวจตลาดเบเกอรี่ที่มีการเสริมเพียวเร่มะเขือเทศแบบออนไลน์

ในการศึกษาตลาดเกี่ยวกับการศึกษาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ทั่วโลกโดยการสำรวจผ่าน GNPD – Global New Products Database www.GNPD.com ใช้คำค้นหา tomato puree ใน Category Food Bakery ในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2564

5. การสำรวจผู้บริโภค

5.1 การสนทนากลุ่ม (Focus Group Discussion)

ทำการสนทนากลุ่มแบบออนไลน์โดยใช้ Application Line จำนวน 8 คน คำถามที่ใช้ดำเนินการสนทนาจะเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจในการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ความถี่ในการบริโภค ช่วงเวลาการบริโภค และแนวทางในการพัฒนาหรือความต้องการของผู้บริโภคที่อยากจะทำให้เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่

5.2 การใช้ Google Form

ทำการสำรวจความต้องการผู้บริโภคผ่าน Google Form จำนวน 107 คน โดยสอบถามเกี่ยวกับ อายุ เพศ อาชีพ ชนิดของเด็กที่ผู้บริโภคนิยมรับประทาน และความสนใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เค้กที่มีการเสริมเพียวเร่มะเขือเทศ

6. เครื่องมือวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ใช้วิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS Static Version 19 โดยใช้แผนการทดลองแบบ T-test ด้วยวิธี Paired Samples t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ ($p < 0.05$) ในคอมพิวเตอร์ Lenovo IdeaPad 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของสภาวะในการเตรียมมะเขือเทศต่อคุณภาพของเพียวเร่มะเขือเทศ

จากการศึกษาสภาวะในการเตรียมเพียวเร่มะเขือเทศ 2 แบบ ได้ผลคุณภาพดังนี้

Table 1 Physical values of blanched and non-blanched tomato puree.

Pretreatment	%Brix	Consistency (cm) in 30 min	L*	a*	b*
Blanch 95 °C,8 min.	6.02 ± 0.45 ^b	9.40 ± 0.34 ^a	46.04 ± 0.16 ^b	26.22 ± 0.24 ^b	25.87 ± 0.33 ^b
Non-blanch	7.24 ± 0.89 ^a	7.08 ± 0.19 ^b	47.26 ± 0.91 ^a	28.28 ± 0.38 ^a	32.51 ± 3.66 ^a

*Means±SD the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

จากผลการทดลอง พบว่าค่าร้อยละ Brix ค่าความข้นหนืด และค่าสี L* a* และ b* ของเพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการเตรียมทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวกมีค่าร้อยละ Brix และค่าสี L* a* และ b* ต่ำกว่าเพียวแรมมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากปริมาณน้ำที่หลงเหลือหลังจากการเตรียมตัวอย่างส่งผลให้ค่าไปเจือจางความหวานและค่าสีจะเห็นได้ว่า L* a* และ b* ของเพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวกมีค่าน้อยกว่าเพียวแรมมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวกเนื่องจากรงควัตถุที่ให้สีแดงจากไลโคปีนและสีเหลืองจากเบต้าแคโรทีนอาจมีการสูญเสียไปในระหว่างการเตรียมที่ส่งผลต่อค่าสีของเพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที เช่นเดียวกับรายงานของ Rachel and Kabelka (2009) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและปริมาณเบต้าแคโรทีนในเนื้อผักของแตงสารพันธุ์ พบว่าค่าสี L* มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับแคโรทีนอยด์ ในขณะที่ค่าสี a* มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับ carotenoids จากรายงานการวิจัยชี้ให้เห็นว่าค่าสี a* มีความสัมพันธ์กับ carotenoids เนื่องจาก carotenoids เป็นรงควัตถุ สีเหลือง สีส้ม และสีแดง ในส่วนของความข้นหนืด พบว่า ระยะทางในการไหลภายในเวลา 30 วินาที ของเพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวกมีค่ามากกว่าเพียวแรมมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก แสดงว่าความหนืดของเพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวก ค่าความข้นหนืดต่ำกว่าเพียวแรมมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากอาจมีการหลงเหลือของน้ำในขั้นตอนการลวก

Table 2 Chemical values of blanched and non-blanched tomato puree.

Pretreatment	pH	Lycopene (µg/100g)	Beta-carotene (µg/100g)
Blanch 95 °C,8 min.	4.25 ± 0.00 ^a	11670.09 ± 114.17 ^b	2777.77 ± 126.68 ^b
Non-blanch	4.22 ± 0.00 ^b	13158.34 ± 94.06 ^a	3311.53 ± 104.95 ^a

*Means±SD, the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณไลโคปีน และเบต้าแคโรทีน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวกมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงกว่าเพียวแรมมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากการหลงเหลือของน้ำในการเตรียมซึ่งน้ำที่มีสภาพเป็นด่างเล็กน้อย (pH 7-8) ส่งผลให้เพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวกมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของไลโคปีน และ เบต้าแคโรทีน พบว่าเพียวแรมมะเขือเทศที่ผ่านการลวกมีปริมาณของไลโคปีนและเบต้าแคโรทีนน้อยกว่าเพียวแรมมะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากเกิดการสูญเสียและการสลายในขั้นตอนการเตรียม ซึ่งการใช้ความร้อนเป็นสาเหตุของการสลายตัวของไลโคปีนและเบต้าแคโรทีน โดยความร้อนจะไปเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน ทำให้มะเขือเทศที่ผ่านการลวกมีปริมาณไลโคปีน และเบต้าแคโรทีนน้อยกว่ามะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Marijan (2007) ที่ศึกษาผลของผลิตภัณฑ์มะเขือเทศอบแห้ง พบว่าการใช้ความร้อนสูงเป็นสาเหตุของการสลายตัวของไลโคปีน และเบต้าแคโรทีน โดยความร้อนจะเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization)

2. การสำรวจตลาดผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีการเสริมเพียวเอร์มะเชื้อเทศจากฐานข้อมูล GNPD

ในการศึกษาตลาดเกี่ยวกับการศึกษาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ทั่วโลกโดยการสำรวจผ่าน GNPD – Global New Products Database (www.GNPD.com) ใช้คำค้นหา tomato puree ใน Category Food Bakery ระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา นับจากเดือนธันวาคม พุทธศักราช 2560 พบว่าได้มีผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีส่วนผสมของเพียวเอร์มะเชื้อเทศที่วางจำหน่ายทั่วโลก 47 ผลิตภัณฑ์ โดยประเทศที่ได้รับความนิยม ได้แก่ ยุโรป เอเชียแปซิฟิก อเมริกาเหนือ และ ลาตินอเมริกา ตามลำดับ และใน 1 ปีที่ผ่านมาได้มีผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีส่วนผสมของเพียวเอร์มะเชื้อเทศจำนวน 15 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ Bread 5 ผลิตภัณฑ์ Biscuits/Crackers 7 ผลิตภัณฑ์ Baking Ingredients & Mixes 3 ผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการสำรวจนี้พบว่ายังไม่มีผลิตภัณฑ์เค้กเสริมเพียวเอร์มะเชื้อเทศ

3. การสำรวจความต้องการของผู้บริโภค

3.1 การสนทนากลุ่ม (Focus group)

จากการศึกษาตัวแทนกลุ่มผู้บริโภคพบว่า เหตุผลการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรี่มี 2 กลุ่มหลัก คือ 1. ผู้ที่ใช้ชีวิตเร่งรีบไม่มีเวลาในการรับประทานอาหารจานหลัก ความถี่ในการบริโภค 2–3 ครั้งต่อสัปดาห์ 2. ผู้ที่ชื่นชอบการบริโภคของหวานหรือผลิตภัณฑ์เบเกอรี่อยู่แล้ว จากการเก็บข้อมูลผู้บริโภคมักรับประทานอาหารจานหลักเสร็จหรือรับประทานอาหารเป็นของว่าง เช่น คัพเค้ก ชิฟฟอนเค้ก บัตเตอร์เค้ก เค้กกล้วยหอม และ ขนมปังปอนด์ ความถี่ในการบริโภคจะอยู่ที่ 4–5 ครั้งต่อสัปดาห์ และยังพบว่าในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ผู้บริโภคต้องให้ลดพลังงานเพื่อให้สามารถรับประทานได้มากขึ้น ทั้งนี้ผู้บริโภคยังต้องการให้เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เช่น สารอาหาร กากใย และวิตามิน เพิ่มเติมด้วย

3.2 การใช้ Google Form

ผลการสำรวจความสนใจเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีการเสริมเพียวเอร์มะเชื้อเทศ และชนิดเค้กที่ผู้บริโภคสนใจจำนวน 107 คน ได้ผลจากการศึกษาพบว่า ประชากรที่ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 69.4 เพศชายคิดเป็นร้อยละ 30.6 โดยที่ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีอายุ 26–30 ปี รองลงมาคือ 20–25 ปี และ 31–35 ปี คิดเป็นร้อยละ 42.2, 19.3 และ 15.6 ตามลำดับ ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ มีระดับการศึกษาระดับปริญญาตรี/ปวส. รองลงมาคือ ระดับสูงกว่าปริญญาตรี และระดับมัธยมศึกษา/อาชีวศึกษา คิดเป็นร้อยละ 82.6, 12.8 และ 4.6 ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีอาชีพพนักงานบริษัทเอกชนคิดเป็นร้อยละ 78.7 รองลงมาคือธุรกิจส่วนตัว/ค้าขาย และอาชีพข้าราชการ โดยคิดเป็นร้อยละ 78.7, 8.3 และ 6.5 ตามลำดับ จากการทำการแบบสอบถามผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่นิยมบริโภคเค้กเนย/บัตเตอร์เค้ก รองลงมาคือชิฟฟอนเค้ก สปันจ์เค้ก/เค้กฟองน้ำ และมัทฟินเค้ก โดยคิดเป็นร้อยละ 47.7, 29.0, 17.8 และ 5.5 ตามลำดับ ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่สนใจผลิตภัณฑ์เค้กที่มีการเสริมมะเชื้อเทศเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ คิดเป็นร้อยละอยู่ที่ 74.5 และไม่สนใจอยู่ที่ 25.5 และจากการสำรวจ ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ต้องการให้เสริมเพียวเอร์มะเชื้อเทศในเค้กเนย/บัตเตอร์เค้กมากที่สุด รองลงมาคือชิฟฟอนเค้ก มัทฟินเค้ก และ สปันจ์เค้ก/เค้กฟองน้ำโดยคิดเป็นร้อยละ 45.8, 22.4, 22.5 และ 9.3 ตามลำดับ

สรุป

เมื่อสำรวจความต้องการของผู้บริโภคจากการทำการสนทนากลุ่มพบว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่มีพลังงานที่ลดลง และมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงขึ้น และจากแบบสอบถามทางออนไลน์จำนวนผู้บริโภคทั้งหมด 107

คน พบว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่สนใจการเสริมเพียวเร่มะเขือเทศในผลิตภัณฑ์เค้กเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการถึงร้อยละ 74.5 ผู้บริโภคสนใจเค้กเนย มีฟีน เค้กชิฟฟอน และเค้กฟองน้ำ 45.8%, 22.5%, 22.4% และ 9.30% ตามลำดับ เมื่อทำการสำรวจตลาดผ่านฐานข้อมูล GNPD พบว่าในตลาดทั่วโลกยังคงไม่มีเค้กที่มีส่วนผสมของเพียวเร่มะเขือเทศ มีเพียงผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเบเกอรี่อื่นที่มีส่วนผสมของเพียวเร่มะเขือเทศ ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์เค้กที่มีส่วนผสมของเพียวเร่มะเขือเทศจึงถือเป็นทางเลือกใหม่ให้กับกลุ่มผู้บริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ จึงทำการศึกษาและคัดเลือกเพียวเร่มะเขือเทศที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงที่สุดเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค โดยทำการทดลองเพียวเร่มะเขือเทศจำนวน 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดที่ 1 คือ เพียวเร่มะเขือเทศที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที และ ชุดที่ 2 คือ เพียวเร่มะเขือเทศที่ไม่ผ่านการลวก พบว่ามะเขือเทศเพียวเร่ชุดที่ 2 มีค่าเฉลี่ยปริมาณไลโคปีน (13158.34 ไมโครกรัม /100 กรัม) และเบต้าแคโรทีน (3311.53 ไมโครกรัม /100 กรัม) มากกว่าชุดที่ 1 ที่มีค่าเฉลี่ยปริมาณไลโคปีนเพียง (11670.09 ไมโครกรัม/100 กรัม) และเบต้าแคโรทีน (2777.77 ไมโครกรัม /100 กรัม) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และอุปกรณ์ในการทดลอง และขอขอบคุณทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 60 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

เอกสารอ้างอิง

- วุฒิสักดิ์ มาจำปา. 2548. การวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนในเนื้อมะเขือเทศด้วยเทคนิคไฮเพอร์ฟลูออเรสเซนซ์ลิควิดโครมาโตกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- Anthon, G., Barrett, D.M. 2007. Standardization of a rapid Spectrophotometric method for lycopene analysis. *Acta Hort.* 758: 111–127
- Gheysena, L., Demets, R., Devaere, J., Bernaerts, D., Goos, P., Loey, A.V., Cooman, L.D., Foubert, I. 2019. Impact of microalgal species on the oxidative stability of n-3 LC-PUFA enriched tomato Puree. *Algal Research* 40: 101502
- Levy, J., Bosin, E., Feldman, B. 1995. Lycopene is a more potent inhibitor of human cancer cell proliferation than either a-carotene or b-carotene. *Nutr. Cancer* 24: 257–267.
- Marijan, A. 2007. Fate of Lycopene in Dehydrated tomato product: carotenoid isomerization in food system. *Food Sci.* 44: 84–86. doi.org/10.1111/j.1365-2621.1979.tb10011.x
- Rachel, A.I., Kabelka, E.A. 2009. Correlation between L* a* b* color space values and c arotenoid content in pumpkins and squash (*Cucurbita* spp.). *HortScience* 44: 633–637.
- Tsubono Y., Tsugane, S., Gey, K.F. 1999. Plasma antioxidant vitamins and carotenoids in five Japanese populations with varied mortality from gastric cancer. *Nutr. Cancer* 34: 56–61
- Yap, M., Fernando, W.M.A.D.B., Brennan, C.S., Jayasena, V., Coorey, R. 2017. The effects of banana ripeness on quality indices for puree production. *Food Sci. Technol.* 80: 10–18.

Effects of compost obtained from food waste recycling system on lettuce's growth (*Lactuca sativa* var. *Crispa* L.)

Aunkamol Kumngen^a, Usmana Meehae^a, Pattamavadee Kunwadee^b, Siwapong Leunram^c, Noodchanath Kongchouy^d, Jutarut lewkittayakorn^{a*}

^aDivision of Biological Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

^bAgricultural Innovation and Management Division, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

^cBIOAXEL Co., Ltd. 6/9 Moo 3 Bophut Chaweng Beach Road, Koh Sa-mui, Surat Thani 84320, Thailand

^dDivision of Computation Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: jutarut.p@psu.ac.th

Abstract

In Thailand, food waste represents 64% of the total garbage. The wastes are disposed in the landfill leading to environmental pollution. To reduce the problem, the BIOAXEL company has developed a food waste recycling system to convert food waste into compost which was branded as BA compost. This study aims at testing the use of BA compost on the plant growth. To this aim a planting mix composed of BA compost, soil and coconut coir was tested on lettuces (0–70%). Planting mixes containing different ratios of BA compost were tested in pots in a layout designed to identify the optimal ratio. Lettuces were cultivated for 45 days in 8 single plant pots before measurement of growth parameters. The planting mix displaying the best results on the lettuce's growth (i.e. 10% BA compost) was later compared a commercial mix. Since the planting mix containing BA compost showed better results than the commercial mix, we recommend to use it as fertilizer for the growth of lettuces and other vegetables.

Keywords: Compost, Food waste, *Lactuca sativa* var. *Crispa* L., Organic soil, Pot plant systems

Introduction

One-third of the food produced in the world is thrown away as food waste (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020). In Thailand, 64% of total garbage is food waste, only 2% of it is recycled and the remaining waste is disposed in landfills, where hygiene is not a priority (Srisuwannaket and Liumpetch, 2019). Several methods have been used to reduce this waste such as selecting the safe past-date food in supermarkets and surplus food from hotels, and donating it instead of throwing it away. However, it still remains left outside, generating gas that causes environmental pollution that is averse to human health and also breeding ground for pathogens. The transformation of food wastes into a valuable compost could help to reduce the negative impact of landfills on the environment. BIOAXEL Co., Ltd. has developed a food waste recycling system to change food waste to compost which has a commercial name as BA compost. The BA compost passed the test of quality standards approved by the Thai Department of Agriculture for compost. with nutrient total nitrogen content of 2.44% w/w, total phosphorus contents of 1.18% w/w, total potassium content of 1.69% w/w and carbon nitrogen ratio of 13:1.

Lactuca sativa var. *Crispa* L. (Green Oak lettuce) is in the *Asteraceae* family, native to Asia and Europe, is one of the most popular leafy vegetables for fresh consumption (Chiesa et al., 2009). Lettuce is an economically valuable crop that can generate income and greatly improve the quality of farmer's life. Lettuce is a plant that rich in many nutrients including vitamins A, C, calcium, potassium, magnesium, sodium, iron, antioxidants like quercetin, caffeic acid and lactupicrin which is anti-carcinogenic and manganese, copper, zinc and selenium (Kawashima and Valente, 2003). Suslow et. al. (2003) also reported that harvesting method has an effect on yield and the nutritional value of the plant. Salad vegetable is commonly grown in pots. Growing salads in pots uses a reduced planting area and makes it easy to move the plants when necessary and allows a better management of the growing conditions including the control of the weeds. Therefore, the main objective of this research was to study the effect of BA compost on *Lactuca sativa* var. *Crispa* L. cultivation. BA composts were mixed with topsoil and coconut coir at different ratios in order to find the optimal ratio for growing salad vegetable in a pot system then compared with the soil which is generally used in the area of the study. The growth parameters were measured in terms of root length, plant length, number of leaves, thickness of plant, width of bush, plant fresh weight and plant dry weight.

Material and Methods

Preparation of plant materials and seedlings

One hundred seeds of green oak lettuce were purchased from local market, Hat Yai, Songkhla, Thailand. The seeds were sown in the nursery under plastic pits (11 × 21 inches (200 wells)) for 14 days (Siringam, 2015) before transplantation to 8-inch pots (4L). (Jarsaing, 2012).

Effect of food waste compost on green oak lettuce growth

Food waste compost (BA compost) was obtained from BIOAXEL Co., Ltd., Koh Sa-mui, Surat Thani, Thailand. Planting material including soil (70% topsoil and 30% coconut coir) and BA compost were applied to samples of the planting soil at various adding ratios as shown in Table 1. After this, the soil-BA compost mixture was called "BA organic soil". The plants were grown under field conditions at the Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand from October to November 2020. 500 mL of tap water was provided for each pot per day for the 45 days planting period for all experiments, then harvested for plant growth measurements analyses. The treatment that gave the highest plant growth was repeated and was further compared with a commercial soil purchased from a local gardening shop, Hat Yai, Songkhla, Thailand. This second trial is described in described in Table 2. Plants were grown in the same location from January to February 2021. The green oak lettuces were watered regularly for 45 days, then harvested for plant growth measurements.

Table 1 Ratio of BA compost added in different treatments.

Treatment	Description (%v/v)
T1	100% Soil (control)
T2	95% Soil + 5% BA compost
T3	90% Soil + 10% BA compost
T4	70% Soil + 30% BA compost
T5	50% Soil + 50% BA compost
T6	30% Soil + 70% BA compost

Note: "Soil" designates a soil mixed with coconut coir at 70% topsoil by volume. BA compost designates the food waste compost from BIOAXEL Co., Ltd., Koh Sa-mui, Surat Thani, Thailand.

Table 2 Ratio of BA compost added in different treatments compared with commercial soil.

Treatment	Description (%v/v)
E1	100% Soil (control)
E2	90% Soil + 10% BA compost
E3	70% Soil + 30% BA compost
E4	100% Commercial soil

Note: "Soil" designates a soil mixed with coconut coir at 70% topsoil by volume. BA compost designates the food waste compost from BIOAXEL Co., Ltd., Koh Sa-mui, Surat Thani, Thailand.

Plant growth measurements

After transplanting for 45 days, the green oak lettuce plants were harvested in order to measure plant growth in terms of physiological parameters including plant length, root length, number of leaves, thickness of plant, width of bush, plant fresh weight and plant dry weight according to Deepika and MubarakAli (2020). The harvesting process of the lettuce was carried out by cutting at ground level to calculate its physiological parameters, except for dry weight. The plant dry weight was recorded after oven dried at 65°C for 3 days (Wongkrachang and Rattaneetoo, 2018).

Statistical analysis

The seven target traits (plant length, root length, number of leaves, and thickness of plant, width of bush, plant fresh weight and plant dry weight) were analyzed for statistical significance, the mean values and standard deviations were calculated. The homogeneity of the variance was assessed using the Levene test and the normal distribution of the samples with the Shapiro-Wilk test. The analysis of variance (ANOVA) combined with the Tukey honest significant difference (HSD) test was used to analyze parametric data. The Kruskal-Wallis test combined with the post-hoc test for the Kruskal-Wallis test is the Dunn test to analyze non-parametric data. The significance level was set at 5% ($p < 0.05$) in all tests. The statistical analyses were conducted using the R program 4.10.

Results and Discussion

Effect of different BA compost ratio on lettuce growth

The physical growth characteristics of green oak lettuce after planting for 45 days at different BA compost addition was shown in Fig.1. It was found that 5%, 10% and 30% BA compost had the better growth than that of planting without BA compost adding. The presence of the BA compost in the planting mix had a significant difference on all seven growth parameters. A one-way ANOVA revealed that there was a statistically significant difference in growth parameters between at least two groups (plant length: $F_{5,12} = 76.26$, $p < 0.000$, root length: $F_{5,12} = 79.31$, $p < 0.000$, number of leaves: $F_{5,12} = 25.50$, $p < 0.000$, thickness of plant: $F_{5,12} = 66.63$, $p < 0.000$, width of bush: $F_{5,12} = 76.63$, $p < 0.000$, plant fresh weight: $F_{5,12} = 491.15$, $p < 0.000$ and plant dry weight: $F_{5,12} = 132.42$, $p < 0.000$) of The *Lactuca sativa* var. *Crispa* L. Differences in parameters between the six groups of plants could be attributed to the differences in the composition of nutrient because each group of plants received different nutrients. This resulted in significantly different growth rates (Fig. 2). The highest plant length was found in T3 (10% of BA compost) compared to other treatments with the value of 30.00 ± 1.00 cm, however, this treatment presented the root length at the same value as the soil mixing with the 70% of coir with the value of 13.33 ± 0.58 cm. The treatments T2 (5% of BA) and T4 (30% of BA) also exhibited the high plant length compared to T1 (0% BA compost), T5 (50% BA compost) and T6 (70% BA compost) but less than T3. However, the root length of T2 and T4 and T5 were higher than T3. The lettuce grown in T1 and T6 presented

the smallest values for all parameters (plant length, root length, number of leave, width of bush, thickness of plant, plant fresh weight, plant dry weight). The number of leaves, the width of bush and the thickness of plant had the close value for T2, T3, T4, T5. The plant dry weight and the plant fresh weight followed the same tendency as the plant length with the highest value for T3. The observation of highest plant length, plant weight and decreasing of root length in T3 with 10% BA compost suggest that this treatment presented a high nutrient content in the pot. It was reported that plants tend to optimize their shoot biomass for photosynthesis and reduce their root biomass when the quantity of nutrient is not a limiting factor for growth Generally, plants increase their root biomass when the quantity of nutrient is limited for growth to increase the volume of soil exploration as observing in T2, T4, T5 in this study. The quantity of nutrient in the treatment T1 and T6 were insufficient for the lettuce growth suggest that only the soil mixing with coir or only the BA compost cannot provide a nutrient for plant growth. The results suggest that the mixture of both increase the mineralization rate and the mineralization is optimized when mixing of BA compost at 10% by volume. The treatment of 10% and 30% BA organic soils were selected for repeated experiment compared with commercial soil. This second trial is described in described in Table 2. Plants were grown in the same location from January to February 2021. The green oak lettuces were watered regularly for 45 days, then harvested for plant growth measurements.



Fig. 1 Growth of green oak lettuce after planting for 45 days at different BA compost addition: 0% (soil) - 70% BA compost respectively.

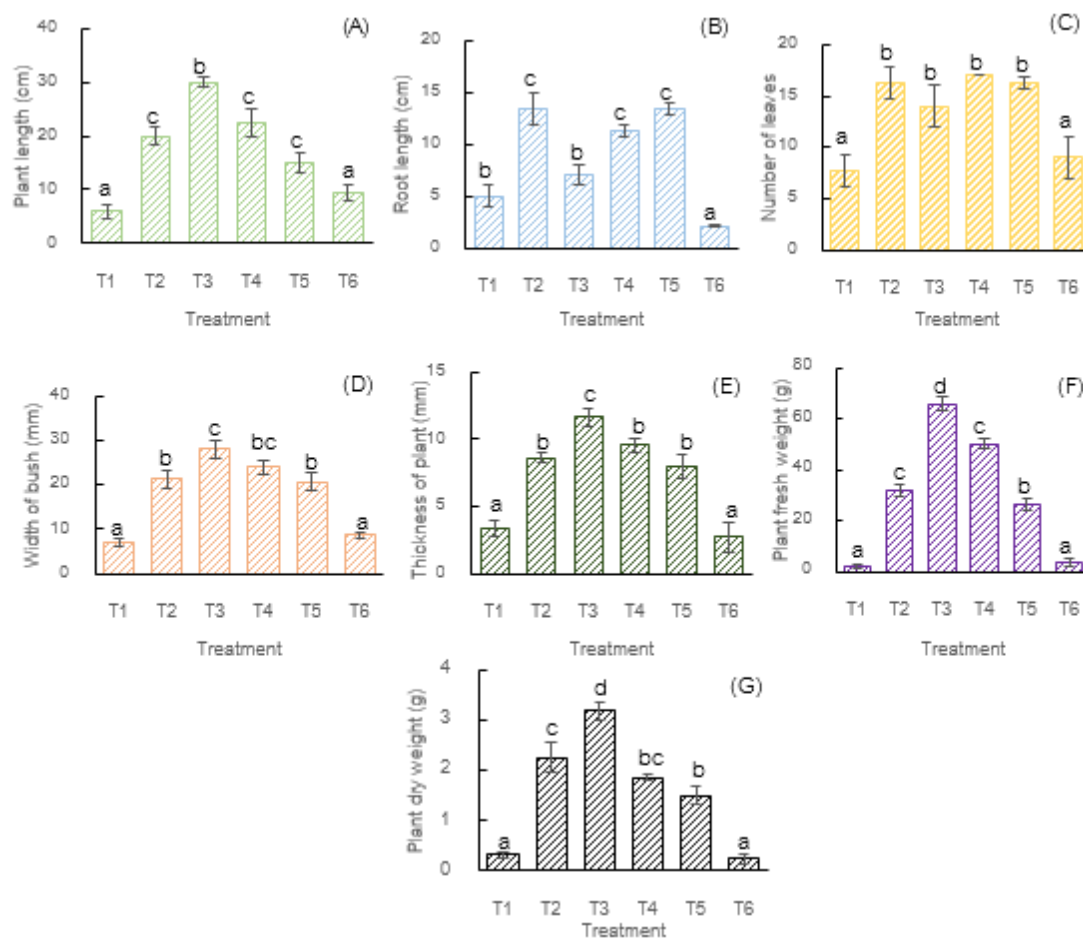


Fig.2 Growth parameters of green oak lettuce: plant length (A), root length (B), number of leaves per plant (C), width of bush (D), thickness of plant (E), plant fresh weight (F), and plant dry weight (G) of green oak. Vertical bars represent the standard deviation ($n = 3$). The letters are significantly different by Tukey's test ($p = 0.05$); T1: 100% soil (control), T2: 5% BA compost, T3: 10% BA compost, T4: 30% BA compost, T5: 50% BA compost, T6: 70% BA compost (ratio of BA compost and soil)

Effect of BA organic soil and commercial soil

The results showed that green oak lettuce grown in BA organic soil and commercial soil had significantly different ($p < 0.05$) plant length, root length, number of leaves, thickness of plant, width of bush, plant fresh weight and plant dry weight (Table 3), while differences in parameters between the four groups of plants had significantly different ($p < 0.05$). It was noted that green oak lettuce cultivated with soil, BA compost formula (10% and 30%) and commercial soil by volume at harvest time of 45 days found the largest early length at 16.50 ± 0.70 cm, while the maximum root length was 21.80 ± 0.76 cm, the maximum number of leaves at 23.00 ± 15 , maximum brush width at 26.33 ± 0.58 ml, maximum early thickness at 12.46 ± 0.56 mm, most live checked at 113.18 ± 1.28 g, and considering the plant dry weight at 4.58 ± 0.14 g, which is 10% BA organic soil formulation. Based on growth data, as a result, it is deemed that 10% BA compost planting material at the age of 45 days

has the best growth. When considering total nitrogen (N), total phosphorus(P) and total potassium (K) nutrients according to Thai Agriculture Standards for compost (TAS 9503, 2005), it was found that 10% BA compost (N:P:K:0.2:0.15:0.16 %w/w) and 30% BA compost (N:P:K:0.30:0.2:0.25 %w/w) have higher nutrients than commercial soil (N:P:K:0.1:0.1:0.1%w/w). These results supported the higher plant growth. The BA compost has potential as a fertilizer in mixing soil for growing plant.

Table 3 Growth parameters of green oak lettuce: plant length root length, number of leaves, width of bush, thickness of plant, plant fresh weight, and plant dry weight.

Treatment	Plant length (cm)	Root length (cm)	Number of leaves	Width of bush (cm)	Thickness of plant (mm)	Plant fresh weight	Plant dry weight
E1	12.00±1.00 ^{ab}	6.83±0.76 ^a	12.00±0.00 ^b	10.67±0.58 ^{ab}	6.65±0.13 ^b	9.95±1.19 ^b	0.69±0.10 ^b
E2	16.00±0.00 ^b	21.83±0.76 ^d	23.00±1.15 ^c	26.33±0.58 ^b	12.47±0.57 ^c	113.20±1.28 ^d	4.58±0.14 ^d
E3	13.33±0.57 ^{ab}	15.03±0.55 ^c	22.00±0.57 ^c	25.33±0.57 ^{ab}	8.27±0.27 ^b	90.50±1.32 ^c	3.17±0.08 ^c
E4	4.33±0.58 ^a	12.50±0.50 ^b	17.00±0.57 ^a	7.33±0.58 ^a	4.20±0.10 ^a	2.99±0.50 ^a	0.33±0.03 ^a
Test	10.30 ¹	269.80 ²	10.02 ¹	10.23 ¹	335.90 ²	7424.00 ²	1341.00 ²
<i>p</i> -value	0.016	<0.000	0.018	0.017	<0.000	<0.000	<0.000

Significant differences are indicated by different letters ($p < 0.05$). Mean values \pm standard deviation; E1: 100% soil (control), E2: 10% BA compost, E3: 30% BA compost, E4: commercial soil.

¹ Kruskal-Wallis chi-squared test and Dunn test Kruskal-Wallis multiple comparison.

p-values adjusted with the Benjamini-Hochberg method for performing multiple pairwise-comparison between the means of groups.

² ANOVA F-test, and Tukey HSD (Tukey Honest Significant Differences) for performing multiple pairwise-comparison between the means of groups.

Conclusion

The use of food waste compost was tested on the growth of green oak lettuces. Out of six treatments, a ratio of 10% and 30% BA compost exhibited the most desirable plant growth. The planting mix formulas containing BA compost displayed even better results when compared to a commercial mix. Our results indicate that the formula containing 10% of BA compost gives the best results for the cultivation of lettuces. BA compost could be used as a fertilizer and is an efficient utilization of food waste. In the future, the utilization of BA compost for vegetable growth can be used for many types of plants. The amount of fertilizer can be increased in case of larger plants.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

Financial support for this research was supported by Triple helix master degree integrated platform for research, development and innovation in industry under Program Management Unit – Brain Power (PMUB), Office of National Higher Education Science Research and Innovation Policy Council (Nxpo). The authors gratefully acknowledge the Division of Biological Science and the Center for Genomics and Bioinformatics Research, Faculty of Science, Prince of Songkla University (PSU), Hat Yai, Songkhla, Thailand.

References

- Chiesa, A., Mayorga, I., Leon, A. 2019. Quality of fresh cut lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by lettuce genotype, nitrogen fertilization and crop season. *Adv. Hortic. Sci.* 23: 143–149.
- Deepika, P., MubarakAli, D. 2020. Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 28: 101701.
- Jarsaing, K. 2012. Nitrate accumulation in green oak, Bachelor of science. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. Bangkok, Thailand.
- Kawashima, M.L., Soares, V.M.L. 2003. Mineral profile of raw and cooked leafy vegetables consumed in southern brazil. *J. Food Compost. Anal.* 16: 605–611.
- Siringam, K., Jirasutas, P., Sawaengmee, W. 2015. Effect of growing methods on growth and pigment concentrations of leaf lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.). *Phranakhon Rajabhat Research Journal* 10: 82–95.
- Srisuwannaket, T., Liumpetch, C. 2019. Tackling Thailand's food-waste crisis. Thailand Development Research Institute. <https://tdri.or.th/en/2019/10/tackling-thailands-food-waste-crisis/>, 15 February 2022
- Suslow, T.V., Oria M.P., Beuchat, L.R., Garrett, E.H., Parish, M.E., Harris, L.J., Farber, J.N., Busta, F.F. 2003. Production practices as risk factors in microbial food safety of freshand fresh-cut produce. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2: 38–77.
- Thai Agricultural Standard. TAS 9503. 2005. Compost. National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. Ministry of Agriculture and Cooperatives. Royal Gazette.122 Section 114D.
- Wongkrachang, S., Rattaneetoo, B. 2018. Effects of media mixed with local residues in Narathiwat Province for *lactuca sativa* var. *crispa* L. growth. *Khon Kaen Agr. J.* 46: 1156–1160.

Effect of drying temperature on physical and chemical properties of duckweed (*Wolffia globosa*)

Phattharaphum Inta, Saowanee Lertworasirikul*

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: saowanee.l@ku.ac.th

Abstract

This research aimed to study the effect of different drying temperatures (40, 50, 60, and 70 °C) by using a hot air dryer on drying time, water activity (a_w), color characteristics, and chlorophyll contents of duckweed (*Wolffia globosa*). The drying time was determined based on Thai community product standard of dried fruits and vegetables, in which the moisture content and a_w must be lower than 12% and 0.6 respectively. The drying time and a_w of the duckweed decreased significantly when using higher temperatures. The lowest a_w was found when using 70 °C ($a_w = 0.161$). The color characteristics for L^* , a^* , b^* , and ΔE were significantly different at different drying temperatures and times. L^* and b^* values were higher, a^* value was lower when using higher temperature and lower time. The lowest ΔE value (7.88%) of dried duckweed compared to fresh duckweed was found when using the lowest drying temperature (40 °C) and longest time (720 minutes). The content of chlorophyll a and b at 40, 50, 60 °C were not significant but at 70 °C was significant ($p > 0.05$) by the highest chlorophyll a was 1.37 mg/g at 50 °C of drying temperature and the highest content of chlorophyll b was 1.67 mg/g at 70 °C.

Keywords: Chlorophyll content, Color characteristics, Drying, Duckweed

Introduction

Duckweed is the aquatic floating vegetable that is fast growing and used as feed for the animals such as ducks, swans, or geese, and in several Asian countries serve as human food, and also in Thailand sold in the vegetable market in different regions of Thailand (Bhanthumnavin and McGarry, 1971). Duckweed contains high nutrients, i.e., 20–30% protein, 1–5% fat, starch 10–20%, and fiber around 25% per dry weight (Appenroth et al., 2018). Even though the high value of duckweed nutrients is valuable but the water content in fresh duckweed is very high and needs to be processed before using it as dry base duckweed.

Drying is the most common process for the preservation of agricultural ingredients, also there are various drying methods such as sun drying, high-temperature drying, microwave drying, and freeze-drying. But the well-known method to decrease the moisture content is high-temperature drying by using a tray dryer because the tray dryer can be used for uniform drying, any shape form of ingredient, the possibility to dry small batches, easy handling, and low electric energy consumption (Fellows, 2017). For dried duckweed, in Thailand, it is classified as dried fruits and vegetables under Thai community product standard (Ministry of Industry, 2558), so it must have a moisture content below 12% and water activity below 0.6. There is quite limited research about the drying of duckweed and its application, as Thongkham (2019) research found drying duckweed at 40, 50, 60, and 70 °C used drying time 30, 25, 20, and 15 hours respectively, also studied antioxidants and products as small rice noodles made from duckweed.

This research aimed to study the difference in the properties of dried product may contribute from the different moisture contents (2.6 to 10.8%) by considering the time of drying which reduce moisture content to lower 12% and water activity to lower 0.6, the color characteristic, and chlorophyll content.

Materials and Methods

Material

Duckweed (*Wolffia globosa*) was purchased from San Pa Tong district of Chiang Mai province and transported to Kasetsart University by refrigerated trucks. Acetone (Merck Co., Germany) was used for duckweed extraction of chlorophyll.

Drying of duckweed

One kilogram of fresh duckweed was cleaned by water and drained excess water. Fresh duckweed was put on a tray with non-stick baking parchment with the size of 40 cm in wide, 45 cm in length, and 3 cm in height of the tray and fresh duckweed was spreaded equally over the tray. Fresh duckweed was dried in the hot air dryer consisting of five wire-mesh trays, an air heater, a 0.18 kW fan motor, a timer, and a thermostat for temperature control. The fan speed in the tray dryer was constant. The sample was dried in the middle tray of the dryer. The temperatures used in this study were 40, 50, 60, and 70 °C. Fresh duckweed was flipped and spread equally every 1 hr during drying. During the drying process, the samples were collected periodically to

determine the average moisture content (% wb) to find the time, which reduced the moisture content and water activity (a_w) of fresh duckweed to lower 12% and 0.6, respectively based on the requirement of Thai community product standard of dried fruits and vegetables. Then, dried duckweed with the moisture content below 12% was mashed and passed through 100 mesh sieve to obtain a homogeneous particle size. Dried duckweed was kept in an aluminum bag and stored at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ until used.

Determination of physical and chemical characteristics

Moisture content was determined using hot air oven method at $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ until constant weight obtained (AOAC, 2000)

Water activity was measured using water activity meter (Aqua lab, CX3TE) at $25\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, calibrated with a standard solution with a_w of 0.760. For each sample, measurements of moisture content and a_w were performed in triplicate.

The color was measured using a colorimeter reflectance mode (CM3500D, Minolta Co., Japan). Dried duckweed was added to the Petri dish glass $90\times 15\text{ mm.}$, and color parameters was expressed in CIE (L^* - black at 0 to white at 100, a^* - red when positive and green when negative, b^* - yellow when positive and blue when negative) value, ten replicate measurements were performed and results were averaged. In additional, total color difference (ΔE) was calculated using Equation 1: where L_0 , a_0 , and b_0 are the control values for fresh duckweed.

$$\Delta E = \sqrt{(a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2 + (L^* - L_0)^2} \quad (1)$$

Determination of chlorophyll content

Chlorophyll content was measured using a spectrophotometer (Model 160A, Shimadzu, Japan) by modified method from Roshanak et al., 2016. Dried duckweed 100mg was added in a falcon tube and added 10 ml of 80% acetone. The falcons were kept in an ice and a dark environment for 30 minutes. The samples were centrifuged at 1119 RCF (Rotina 380R, Hettich, Germany) for 10 min at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. After centrifugation, the falcons were immediately transferred to ice before rapid measurement with a spectrophotometer. The absorbance of the solution was read at two wavelengths 663.2 and 646.8. Chlorophyll concentrations were calculated in mg/g of acetone according to Equations 2–5: where Abs is absorbance values between 0.100 and 0.900, V(ml) is final adjustment volume, and weight(g) is weight of the sample.

$$\text{Chl a (mg/l)} = (12.25 \times \text{Abs}_{663.2}) - (2.79 \times \text{Abs}_{646.8}) \quad (2)$$

$$\text{Chl b (mg/l)} = (21.50 \times \text{Abs}_{646.8}) - (5.10 \times \text{Abs}_{663.2}) \quad (3)$$

$$\text{Chl a (mg/g)} = \text{Chl a (mg/l)} \times \left[\frac{V(\text{ml})}{1000} \right] \times \frac{1}{\text{weight(g)}} \quad (4)$$

$$\text{Chl b (mg/g)} = \text{Chl b (mg/l)} \times \left[\frac{V(\text{ml})}{1000} \right] \times \frac{1}{\text{weight(g)}} \quad (5)$$

Statistical analysis

All experiments were performed in duplicate. The results were reported as the mean \pm standard deviation and subjected to analysis of variance (ANOVA). Differences among the means were determined using Duncan's multiple range test (DMRT) and significance was defined at $p < 0.05$.

Results and Discussion

Drying time, moisture content and water activity of duckweed in different temperature

As shown in Fig. 1, the moisture at Time 0 minute (40, 50, 60, and 70°C) was 97.33 ± 0.05 %wb. At a drying temperature of 40 °C, it was found that before 480 minutes the moisture content showed a slightly slow decrease because of the behavior of the constant rate phase of duckweed. The heat is transferred convectively from the warm air to the cooler wet surface through the boundary layer at the interface and induces some evaporation. The water vapor formed is transported by convection from the moisture saturated surface to the drier air. As long as the wet surface is saturated with water, the behavior will show the same until the wet surface is not saturated anymore. Then the phase will become a falling phase and show fast decreasing behavior (Berk, 2018). After 480 minutes at 40 °C, the moisture content decreased sharply until it reached the equilibrium point at time 740 minutes. In this case, the time required to reduce the moisture content below 12% was 720 minutes. Also, at 50 °C, the moisture content was decreased slowly before 300 minutes and reached the equilibrium point at time 500 minutes. However, at time 460 minutes, the moisture content was lower than 12%. At 60 °C and 70 °C, the moisture content showed the same behavior as 40 and 50 °C by decreasing slowly at first until 180 and 120 minutes, respectively, and reached the equilibrium points at 360 minutes for drying at 60 °C and 320 minutes for drying at 70 °C. In addition, it took 320 and 280 minutes at 60 °C and 70 °C drying temperatures, respectively, to make the moisture content lower than 12%.

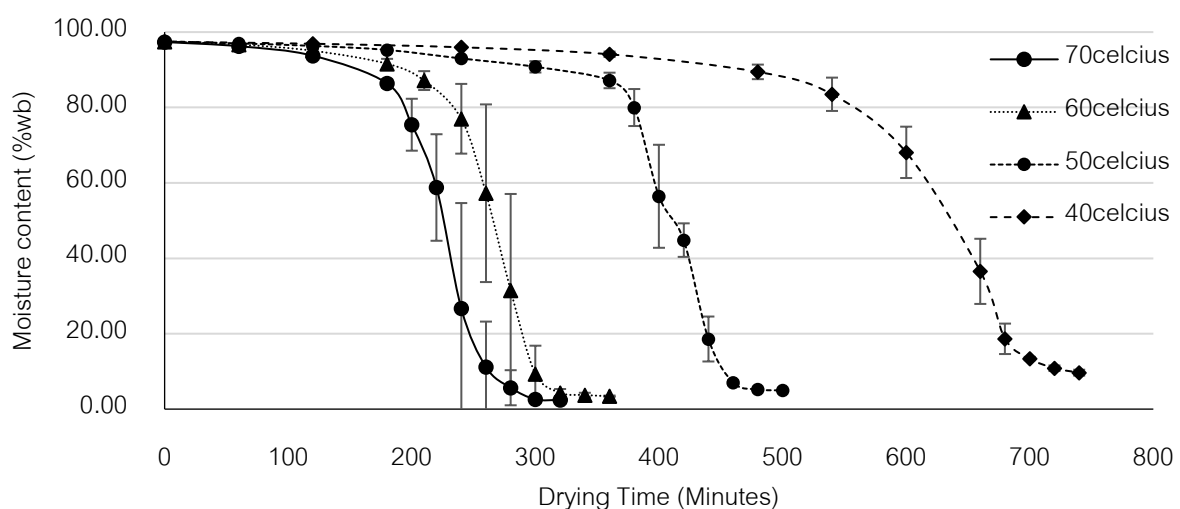


Fig. 1 The moisture content of duckweed at different drying air temperatures at 40, 50, 60, and 70 °C

As shown in Table 1, the water activities and final moisture content at below 12% wb showed significantly difference at all temperatures, while at 70 °C (using times 280 minutes) had the lowest moisture content and water activity (2.56 ± 0.23 , 0.161 ± 0.018) and at 40 °C (using times 720 minutes) had the highest moisture content and water activity (10.84 ± 0.81 , 0.299 ± 0.004). Because using higher temperature can decrease the amount of moisture lost from material more than using a lower temperature, and using higher temperature can reduce much more free water in the material better than using the lower temperature before the material gets to the equilibrium state.

Table 1 Drying time, final moisture content and water activity of different drying temperatures

Parameters	Temperatures			
	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Time (minutes)	720	460	320	280
Final moisture content (%wb)	10.84 ± 0.81^a	7.04 ± 0.55^b	4.34 ± 0.79^c	2.56 ± 0.23^d
Water activity	0.299 ± 0.004^a	0.232 ± 0.004^b	0.200 ± 0.002^c	0.161 ± 0.018^d

*Means \pm SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

Color characteristic and ΔE

The color characteristic at different temperature (40, 50, 60, 70 °C) was compared with fresh duckweed by using L^* , a^* , b^* , and ΔE parameters. In table 2, all color parameters at different temperatures were significantly different compared to fresh duckweed. L^* at 60°C and 70 °C showed the highest lightness (48.84 ± 0.12 and 49.16 ± 0.28), while fresh duckweed showed the lowest lightness (37.86 ± 1.09). a^* at 70 °C showed the highest greenest (-9.56 ± 0.07), while a^* at 40 °C showed the lowest greenest (-7.46 ± 0.03). b^* at 70 °C showed the highest yellowness (31.42 ± 0.50) and at 40 °C showed the lowest yellowness (27.46 ± 0.20). Also, the ΔE at different temperatures was significantly different, by the highest difference was at 70 °C (11.59) and the lowest difference was at 40 °C (7.88).

Table 2 The effect of different drying temperatures and times on color parameters and chlorophyll content

Parameters	Temperatures / Times				
	Fresh	40°C / 720 min	50°C / 460 min	60°C / 320 min	70°C / 280 min
L^*	37.86 ± 1.09^d	45.50 ± 0.09^c	48.30 ± 0.20^b	48.84 ± 0.12^a	49.16 ± 0.28^a
a^*	-8.20 ± 0.16^b	-7.46 ± 0.03^a	-8.56 ± 0.67^c	-8.78 ± 0.15^d	-9.56 ± 0.07^e
b^*	29.26 ± 0.55^d	27.46 ± 0.20^e	29.63 ± 0.19^c	30.23 ± 0.29^b	31.42 ± 0.50^a
ΔE	0 ^e	7.88 ^d	10.46 ^c	11.04 ^b	11.59 ^a
Chlorophyll a (mg/g)	–	1.35 ± 0.10^a	1.37 ± 0.71^a	1.34 ± 0.29^{ab}	1.29 ± 0.15^b
Chlorophyll b (mg/g)	–	1.60 ± 0.20^b	1.59 ± 0.20^b	1.58 ± 0.01^b	1.67 ± 0.33^a

*Means \pm SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

Chlorophyll content of duckweed at different temperature

As shown in Table 2, the chlorophyll a content at 70 °C temperature was significantly different from those at 40°C and 50 °C, while it was not statistically different from chlorophyll a at 60°C. Chlorophyll a found at 70 °C had the lowest content (1.29±0.15 mg/g) and at 50 °C had the highest content (1.37±0.71) but the content of chlorophyll a at 40 °C, 50 °C, and 60 °C were not significantly different. Chlorophyll b found at 70 °C had the highest content (1.67±0.33 mg/g) and at 60 °C had the lowest content (1.58±0.01) but there were not significantly different at 40, 50, and 60 °C. Because using the higher temperatures and using more time can lead to degradation of chlorophyll a and b content, and chlorophyll is sensitive to heat. This is why at 70 °C there was the lowest chlorophyll compared to at other temperatures. Also, from Table 2, it was clearly shown that the chlorophyll a was more heat sensitive than chlorophyll b (Rahimmalek and Goli, 2013; Weemaes et al, 1999). Furthermore, during drying treatment, the color transformation to undesired color could be as a result of the magnesium of chlorophyll which is readily replaced by two hydrogen atoms in the presence of mild acids such as oxalic or acetic acid, or longer thermal processing to produce a compound called pheophytin thus affect the color during heating (Arslan and Özcan, 2012).

Conclusion

In conclusion, to select the best drying condition for dried duckweed, different criteria should be considered such as drying time, final moisture content, water activity, color characteristics, and chlorophyll content. The results showed that the best drying condition based on the lowest moisture content, water activity, and time with high chlorophyll b content was at 70 °C and it was in good condition for the stored product because of the lowest moisture content and water activity.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, through an e-Proceedings scholarship.

Reference

- Appenroth, K.J., Sree, K.S., Bog, M., et al. 2018. Nutritional Value of the Duckweed Species of the Genus *Wolffia* (Lemnaceae) as Human Food. *Front Chem.* 6: 1–13.
- Arslan, D., Özcan, M.M. 2012. Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content, and color characteristics of savory leaves. *Food Bioproc. Tech.* 5: 983–991.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 2000. *Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemists.* Gaithersburg, MD, USA.

- Berk, Z. 2018. Dehydration. Food Process Engineering and Technology, 3rd ed. Academic Press. Cambridge, Massachusetts, USA.
- Bhanthumnavin, K., McGarry, M.G. 1971. *Wolffia arrhiza* as a possible source of inexpensive protein. Nature 232: 495.
- Fellows, P.J. 2017. Dehydration. Food Processing Technology, 4th ed. Woodhead Publishing. Cambridge, UK.
- Ministry of Industry. 2558. Thai community product standard, Dried fruits and vegetables. Bangkok, Thailand.
- Rahimmalek, M., Goli, S.A.H. 2013. Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of *Thymys daenensis* subsp. *daenensis*. Ind. Crops. Prod. 42: 613–619.
- Roshanak, S., Rahimmalek, M., Goli, S.A. 2016. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves. J. Food Sci. Technol. 53: 721–729.
- Thongkham, P. 2019. Effect of Temperature on Antioxidant Activity in Dried Water meal (*Wolffia arrhizal* (L.) *Wimm*) and Application in Food Products. M.Sc. thesis, Faculty of Home Economic Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. Pathum Thani, Thailand.
- Weemaes, C.A., Ooms, V., Van Loey, A.M., Hendrickx, M.E. 1999. Kinetics of chlorophyll degradation and color loss in heated broccoli juice. J. Agric. Food Chem. 47: 2404–2409.

การย้อมจิวรผ้าฝ้ายจากแก่นขนุนด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

Dyeing Buddhist monk cotton rope with Jackfruit wood by using Cetyltrimethyl ammonium bromide

พชรพล ศิริสุนทร, คริสดา ผลคิมหันต์, จุฑามาศ ม่วยแดง, ปวีณส์สุดา ขุนนุ้ย, ขนิษฐา วัชรารณณ์*

Pacharapol Sirisoontorn, Chrisda Pholkimhant, Juthamas Muidaeng, Paweesuda Khunnui, Kanitta Watcharaporn*

ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยพัฒนากระบวนการย้อมจิวรผ้าฝ้ายโดยการปรับสภาพผ้าฝ้ายด้วยเทคนิคการเพิ่มสารแคตไอออนิกให้กับโครงสร้างโมเลกุลผ้าฝ้าย โดยใช้สารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เพื่อให้ย้อมสีย้อมจากแก่นขนุนมีค่าการติดสีเพิ่มขึ้น วิธีการปรับสภาพผ้าฝ้ายโดย CTAB 2 ความเข้มข้นคือ 1% ร้อยละโดยน้ำหนัก และ 3% ร้อยละโดยน้ำหนัก และใช้วิธีการปรับสภาพ 4 วิธีดังนี้ วิธีจุ่มแช่, วิธีจุ่มแช่แล้วผึ่ง, วิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์แล้วอบแห้ง และวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์อบแห้งแล้วอบผึ่ง จากการศึกษาพบว่า กระบวนการเตรียมผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB ที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นของสาร CTAB อยู่ที่ 1% ร้อยละโดยน้ำหนัก เพราะเป็นค่าความเข้มข้นที่ให้ค่าความเข้มของสีที่สูงที่สุด และเลือกวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์อบแห้งแล้วอบผึ่ง เนื่องจากให้ค่าการติดสีสูงกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านกระบวนการอบผึ่ง และได้ความคงทนต่อการซักประเมินด้วยเกรย์สเกลที่คะแนน 3 จาก 5

คำสำคัญ: การอัดผึ่ง, แก่นขนุน, เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์, สารให้ประจุบวก, สีย้อมธรรมชาติ

Abstract

This research aims to develop the cotton rope dyeing process by pre-treating cotton with the cationic substance in order to improve the colour fastness of the cotton dyed fabric with Jackfruit wood. The cotton fabrics were pre-treated by two different concentrations of Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) "The pretreat cotton fabric using two different concentrations, 1%w/w and 3%w/w, and four pretreatment methods: exhaustion method, exhaustion cure method, Pad dry method, and pad dry cure method. It was found the optimal condition was carried out by using 1%w/w of CTAB and pad-dry cure method because the resulted fabric from this condition showed the highest colour strength (K/S) value. The washing fastness was graded on a grayscale with a 3 out of 5 ratings.

Keywords: Cationic pretreatment method, Cetyltrimethylammonium bromide, Jackfruit wood, Natural dye, Padding

คำนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากสีย้อมธรรมชาติได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีผลการพิสูจน์พบว่า การใช้สีย้อมสังเคราะห์จากสารเคมี นั้นก่อให้เกิดมลภาวะต่อสภาพแวดล้อม และส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภค ในด้านทางพระพุทธศาสนาได้มีการนำสีย้อมธรรมชาติเข้ามาใช้งานเช่นกันโดยทางกรรมวิธีการย้อมผ้าจีวรของพระภิกษุสงฆ์ในงานบุญทอดกฐินนั้นได้มีการนำเอาสีย้อมธรรมชาติกลับมาใช้งานแทนสีย้อมสังเคราะห์จากเคมี ซึ่งสีย้อมธรรมชาติที่นำมาใช้คือสีย้อมธรรมชาติจากแก่นขนุน โดยการใช้สีย้อมแก่นขนุนในการย้อมผ้าจีวรมีมาแต่อดีตกาล การย้อมผ้าจีวรด้วยสีย้อมแก่นขนุนเป็นจีวรที่พระสงฆ์ฝ่ายอรัญวาสีที่เน้นในการปฏิบัติแบบธุดงค์วัตร โดยจะนุ่งห่มการครองผ้า 3 ชั้น ได้แก่ สบง จีวร และสังฆาฏิ (สัตตบุษย์, 2555) และยังถือเป็นการอนุรักษ์สืบสานวัฒนธรรมไทยเพื่อทำนุบำรุงพระพุทธศาสนาให้เหล่าคนรุ่นหลังได้เรียนรู้และสืบต่อไป โดยปกติผลการย้อมผ้าฝ้ายด้วยแก่นขนุนจะได้เฉดสีที่อ่อน วิธีแก้ไขคือการย้อมทับซ้ำเพื่อให้เฉดสีมีเฉดที่เข้มขึ้นโดยลำดับทำให้การย้อมยุ่งยาก และระยะเวลาที่ใช้ในการย้อมผ้าจีวรมาก

แก่นขนุน เป็นส่วนที่ได้จากแก่นลำต้นของต้นขนุน โดยบางพื้นที่เรียกไม้แก่นขนุนว่ากรัก แก่นขนุนมีคุณสมบัติเป็นสมุนไพร ต้านแบคทีเรีย และสามารถป้องกันปลวกได้จึงนิยมถูกนำไปใช้ในการทำเฟอร์นิเจอร์ไม้พ่าย และเครื่องมือชนิดต่างๆ สารให้สีที่สกัดได้จากแก่นขนุนคือสารมอร์ริน (morin) โดยมอร์รินจะให้สีเป็นสีเหลืองเข้มและมีโครงสร้างโมเลกุลดังแสดงใน Fig. 1 (หทัยรัตน์, 2546)

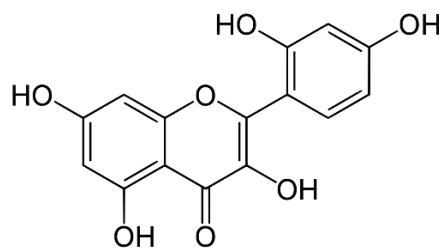


Fig. 1 Chemical structure of morin. (PubChem, 2014)

ในการย้อมสีแก่นขนุนมักจะต้องทำการย้อมทับซ้ำๆ หลายครั้งเพื่อให้ได้เฉดสีที่ต้องการ จากการวิจัยก่อนหน้าพบว่าต้องย้อมทับจำนวน 4 ครั้ง เพื่อให้ได้เฉดสีที่ต้องการ (พชรพล และคณะ, 2564) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ช่วยในการย้อมทำให้ย้อมได้สีเข้มขึ้น นอกจากนี้มีการนำสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ดังแสดงโครงสร้างใน Fig. 2 มาใช้ในการย้อมโดยให้ CTAB นั้นทำหน้าที่เป็น สารให้ประจุบวก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมสีบนผ้าฝ้าย เนื่องจากสาร CTAB มีโครงสร้างแบบ Tertiary amine มีผลทำให้ผ้าฝ้ายมีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น จึงยึดจับกับโมเลกุลของสีย้อมที่เป็นประจุลบได้มากขึ้น ส่งผลให้เฉดสีมีความเข้มขึ้น (คริสตา และคณะ, 2563)

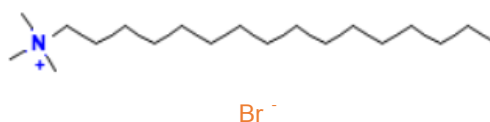


Fig. 2 Chemical structure of Cetyltrimethylammonium bromide. (PubChem, 2021)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการย้อมผ้าจีวรด้วยแก่นขนุนโดยใช้สาร CTAB เข้ามาใช้เป็น สารให้ประจุบวก โดยเปรียบเทียบผลการย้อมระหว่างการเตรียมผ้าด้วยกระบวนการแบบจุ่มแช่ และกระบวนการแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ เพื่อหากระบวนการ เตรียมผ้าก่อนการย้อม ที่มีประสิทธิภาพในการให้ผ้าฝ้ายติดสีมากที่สุดโดยค่าการติดสีของผ้าฝ้ายจะวัด

ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Spectrophotometer) วัดค่าความเข้มสี และค่าสีระบบ $L^* a^* b^*$ และประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักด้วยมาตรฐาน ISO 105 - C10

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือ วัสดุ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แกนขนุน
2. ผ้าฝ้ายซัลฟอไรท์ (sanforized fabric) ที่ผ่านการทำความสะอาด (scouring) ขนาดชิ้นละ 5 กรัม ความหนาแน่นของผ้าเท่ากับ 55.22 กรัมต่อตารางเมตร
3. เครื่อง Shaking water Bath (Model DL-2003)
4. เครื่อง Spectrophotometer (Datacolor 550)
5. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดสำหรับห้องทดลอง (AR)
6. Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) เกรดสำหรับห้องทดลอง (AR)
7. เครื่อง Padder machine (DL-2005V)
8. เครื่องอบผืน
9. สบู่มาตรฐาน ISO (standard soap) ISO 105 C01-C05/C07
10. ผ้ามาตรฐานสำหรับการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (multifiber) มาตรฐาน ISO 105 F10 ชนิด DW
11. เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (Rotawash)
12. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV/Vis-Spectrophotometer)

A: วิธีการทดลอง

การเตรียมน้ำย้อมแกนขนุน

เตรียมน้ำย้อมแกนขนุนขึ้นขนาดประมาณ 1 ลิตร จากนั้นนำไปแช่น้ำไว้ 24 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนน้ำหนักแกนขนุนต่อน้ำเท่ากับ 1:10 จากนั้นนำมาต้มเดือดเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบตามระยะเวลาแล้วให้นำแกนขนุนออกแล้วเคี่ยวด้วยไฟอ่อนต่อเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง (พชรพล และคณะ, 2564)

B: การเตรียมผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 วิธีดังนี้

1. การเตรียมผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มแช่ (Exhaustion method)
การปรับสภาพผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1% ร้อยละโดยน้ำหนัก และ 3% ร้อยละโดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อสารละลายเท่ากับ 1:20 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 45 นาที
2. การเตรียมผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มแช่แล้วผึ่ง (Exhaustion cure method)
กระทำการเหมือนการเตรียมผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มแช่ โดยเพิ่มการนำผ้าไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 วินาที และ นำไปอบผึ่งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 วินาที
3. การเตรียมผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ แล้วอบแห้ง (Pad dry method)
การปรับสภาพผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1% ร้อยละโดยน้ำหนัก และ 3% ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการ Pad dry อัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อสารละลายเท่ากับ 1:20 โดยแช่ผ้าลงในละลายเป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปผ่านเครื่องจุ่มบีบอัดสารเคมี และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 วินาที
4. การเตรียมผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบผึ่ง (Pad dry cure method)
กระทำการเหมือนการเตรียมผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ แล้วอบแห้ง โดยเพิ่มการนำไปอบผึ่งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 วินาที

C: การย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมแก่นขนุน

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร CTAB ทั้ง 4 วิธี ใช้อัตราส่วนน้ำหนักของผ้าฝ้ายต่อน้ำสกัดจากแก่นขนุน เท่ากับ 1:20 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 60 กรัมต่อลิตร ย้อมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที อุณหภูมิแบบเขย่า

D: การวัดค่าสี

เปรียบเทียบผลการย้อม และการศึกษาคุณสมบัติค่าความคงทนของสีย้อม โดยทำการวัดค่าความเข้มสี Kubelka-Munk (K/S) และค่าสีระบบ $L^* a^* b^*$ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer รุ่น Datacolor 550

E: การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก กระทำตามวิธีมาตรฐาน ISO 105 – C10: 2006 Textile – Tests for colour fastness – Part C10: Colour fastness to washing with soap or soap and soda วิธี A1 ตัดผ้าทดลองขนาด 4x10 เซนติเมตร ปรอบผ้ามัดตีไฟเบอร์ ขนาด 4x10 เซนติเมตร เย็บผ้าทดลองและผ้ามัดตีไฟเบอร์ติดกันทางด้านกว้างของผ้า แล้วนำมาซักในสารละลายสารซักฟอก อัตราส่วนสารละลายสารซักฟอกต่อผ้าเท่ากับ 50:1 (โดยน้ำหนัก) ซักที่อุณหภูมิ 40 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที (ไม่ใช้ลูกเหล็กขัดถู) ในเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (Rotawash) จากนั้นล้างผ้าให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นสองครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำซึ่งไหลตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 10 นาที ตากผ้าให้แห้งโดยแขวนผ้ามัดตีไฟเบอร์อยู่ด้านบน เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของสีที่อยู่บนชิ้นทดสอบ ประเมินความคงทนของสีต่อการซักโดยใช้เกรย์สเกล ซึ่งระดับความคงทนของสีต่อการซักมีค่าตั้งแต่ระดับ 1 ถึง 5

F: ร้อยละของการดูดซึมสี (%E)

วัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำย้อมก่อนและหลังย้อม ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV/Vis-Spectrophotometer) เพื่อนำมาคำนวณหาร้อยละของการดูดซึมสี (%E) บนผ้า ตามสมการ (Equation 1) นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับการย้อมปกติ

$$\%E = \left(\frac{A1 - A0}{A1} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำย้อมก่อนย้อม

A1 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำย้อมหลังย้อม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลค่าสีจากการย้อมแก่นขนุนด้วยความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 60 กรัมต่อลิตร ด้วยผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสาร CTAB ความเข้มข้น 1% ร้อยละโดยน้ำหนัก และ 3% ร้อยละโดยน้ำหนัก ทั้งในแบบกระบวนการจุ่มแช่, จุ่มแช่แล้วผืนี้สี แสดงใน Table 1 และผลการย้อมจากกระบวนการ Padding method แสดงใน Table 2 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมผ้าฝ้ายจะมีค่าความเข้มของสี ต่ำกว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านกระบวนการเตรียมผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB ทั้งในกระบวนการเตรียมแบบจุ่มแช่ และ กระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์

นอกจากนั้นผลการย้อมจากทั้ง 2 กระบวนการพบว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการอบผืน (curing) จะมีค่าความเข้มของสีที่สูงกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านกระบวนการอบผืนซึ่งน่าจะเป็นผลมาจาก ผ้าฝ้ายที่ผ่านการอบผืน ทำให้สาร CTAB เกิดปฏิกิริยาสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกับเส้นใยที่แข็งแรงขึ้นจึงทำให้มีค่าความเข้มของสี ที่สูงกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านกระบวนการอบผืน นอกจากนั้นผลการย้อมเปรียบเทียบกระบวนการจุ่มแช่ และ กระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ พบว่าค่าการติดสี ของวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบผืนสี มีค่าการติดสีที่สูงที่สุด โดยความเข้มข้นของ CTAB ที่ให้ค่าการ

ติดสีที่ต่ำที่สุดคือ 1% โดยน้ำหนัก เนื่องจากกระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ และเตรียมแบบวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบผนึกสี ให้ค่าการติดสีสูงกว่ากระบวนการจุ่มแช่ เนื่องด้วยกระบวนการจุ่มแช่ เป็นการย้อมแบบจุ่มแช่สาร CTAB ทำให้สาร CTAB เคลื่อนตัวเข้าสู่เส้นใย แต่การดูดซึมของสาร CTAB เข้าสู่เส้นใยมีปริมาณน้อยกว่ากระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ เมื่อปริมาณสาร CTAB ในกระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ สูงกว่าจึงทำให้การย้อมแบบ วิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบผนึกสี ให้ค่าการติดสีสูงกว่าเพราะกระบวนการจุ่มอัด ลูกกลิ้งจะนำพาสาร CTAB เข้าสู่เส้นใย แล้วทำให้แห้งด้วยความร้อนทำให้สาร CTAB ที่ติดบนผืนผ้าสม่ำเสมอ ไม่เคลื่อนตัวออก แล้วจึงทำการอบผนึกด้วยความร้อนสูง ทำให้สาร CTAB เกิดปฏิกิริยาส่งพันธะยึดเหนี่ยวกับเส้นใย (อภิชาติ, 2545)

Table 1 Exhaustion method and Exhaustion cure method

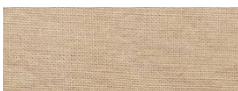


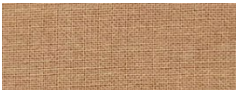






Conditions		K/S	L*	a*	b*	Fabric
Blank		2.56	69.03	7.72	29.43	
CTAB 1%	uncure	3.46	64.25	10.08	29.41	
	cure	4.89	59.08	12.22	30.99	
CTAB 3%	uncure	4.10	62.49	10.41	30.94	
	cure	5.47	58.86	13.04	32.51	

Table 2 Pad dry method and Pad dry cure method

Conditions		K/S	L*	a*	b*	Fabric
Blank		2.93	67.29	7.77	30.15	
CTAB 1%	uncure	6.27	56.27	13.75	33.20	
	cure	6.54	57.44	13.77	33.59	
CTAB 3%	uncure	5.53	57.91	13.56	31.38	
	cure	6.20	57.23	15.06	32.52	

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักของผ้าฝ้ายย้อมแก่นขนุนที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB โดยผ่านกระบวนการจุ่มแช่ แสดงใน Table 3 และผลการทดสอบความคงทนต่อการซักของ ผ้าฝ้ายย้อมแก่น

ขนุนที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB โดยผ่านกระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ แสดงใน Table 4 พบว่า ผ้าฝ้ายที่ผ่านกระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ จะมีค่าความคงทนต่อการซักที่ดีกว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ เนื่องจากกระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ มีปริมาณของสาร CTAB ที่สูงกว่ากระบวนการจุ่มแช่ จึงเกิดปฏิกิริยาสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกับเส้นใยได้ดีกว่า เมื่อนำไปย้อมสีแก่นขนุน สาร CTAB ในเส้นใยที่เป็นประจุบวกทำการยึดจับกับตัวสีแก่นขนุนที่เป็นประจุลบ จึงเกิดพันธะระหว่างสาร CTAB ที่อยู่ในเส้นใยกับสีของแก่นขนุนที่แข็งแรงและมากกว่าแบบกระบวนการจุ่มแช่ โดยค่าความคงทนต่อการซักของกระบวนการเตรียมแบบจุ่มแช่มีคะแนน 2 จาก 5 ทั้งใน CTAB 1% และ CTAB 3% เช่นเดียวกันในกระบวนการเตรียมแบบจุ่มแช่ วิธีจุ่มแช่แล้วอบแห้ง มีคะแนน 2 จาก 5 ทั้งใน CTAB 1% และ CTAB 3% ส่วนในกระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ วิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์แล้วอบแห้ง มีคะแนน 2 จาก 5 ทั้งใน CTAB 1% และ CTAB 3% แต่ในวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบผนึกสี มีคะแนน 2-3 จาก 5 ใน CTAB 1% และมีคะแนน 3 จาก 5 ใน CTAB 3% ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีที่ให้ค่าความคงทนต่อการซักสูงที่สุดคือวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบผนึกสี

Table 3 Colour fastness to washing with soap (Exhaustion method)

	Blank	CTAB 1%	Cure CTAB 1%	CTAB 3%	Cure CTAB 3%
Colour change	1-2	2	2	2	2
Colour staining					
- Acetate	5	5	5	5	5
- Cotton	5	5	5	5	5
- Nylon	5	5	5	5	5
- Polyester	5	5	5	5	5
- Acrylic	5	5	5	5	5
- Wool	5	5	5	5	5

Table 4 Colour fastness to washing with soap (Padding method)

	Blank	CTAB 1%	Cure CTAB 1%	CTAB 3%	Cure CTAB 3%
Colour change	1-2	2	2-3	2	3
Colour staining					
- Acetate	5	5	5	5	5
- Cotton	5	5	5	5	5
- Nylon	5	5	5	5	5
- Polyester	5	5	5	5	5
- Acrylic	5	5	5	5	5
- Wool	5	5	5	5	5

ผลการทดลองการย้อมสีผ้าฝ้ายจากแก่นขนุนมีค่าร้อยละการดูดซึมอยู่ที่ 4.87% ซึ่งการเตรียมผ้าฝ้ายโดยใช้สาร CTAB ในกระบวนการเตรียมแบบจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ วิธี จุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบผนึกสี ที่ CTAB 1%จะมีค่าร้อยละการดูดซึมอยู่ที่ 65.34% ซึ่งเป็นค่าการดูดซึมที่สูงที่สุดจากวิธีการทั้งหมด 4 วิธี แสดงใน Fig. 3

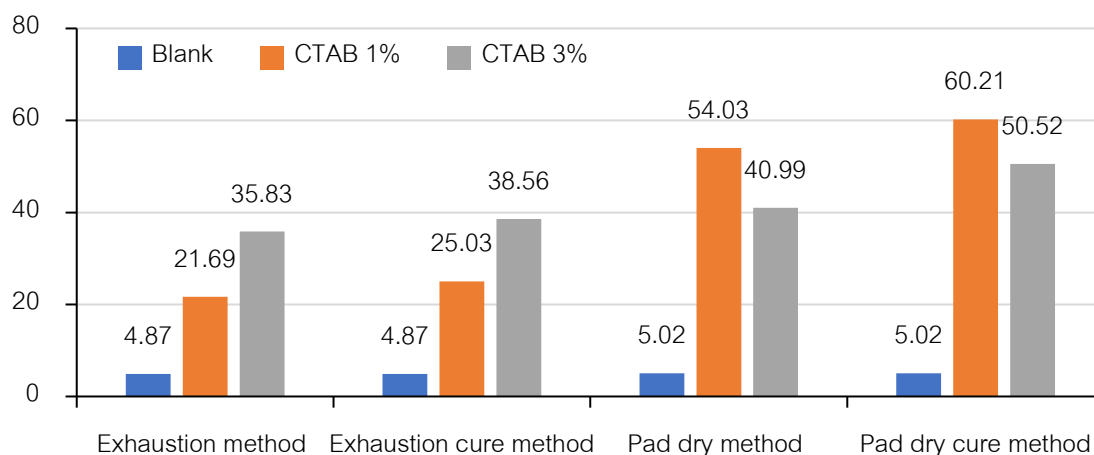


Fig. 3 %Exhaustion

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัย พบว่ากระบวนการเตรียมผ้าฝ้ายด้วยสาร CTAB ที่เหมาะสมในการให้ค่าความเข้มข้นของสี คือ ใช้ความเข้มข้นของสาร CTAB อยู่ที่ 1% ร้อยละโดยน้ำหนัก เพราะเป็นค่าความเข้มข้นที่ให้ค่าความเข้มข้นของสี ที่สูงที่สุด และเลือกวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบฟีนิกสีเนื่องจากในกระบวนการเตรียมผ้าฝ้ายแบบวิธีจุ่มอัดด้วยโรลเลอร์ อบแห้งแล้วอบฟีนิกสี นั้นมีการอบฟีนิกจะทำให้สาร CTAB ทำปฏิกิริยายึดเหนี่ยวเข้ากับเส้นใยได้มากกว่า หากพบว่าความคงทนต่อการซักจากวิธีนี้ได้คะแนนระดับ 3 จาก 5 จึงควรพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นโดยสามารถเสริมความคงทนต่อการซักได้โดยการใช้มอร์แดนท์เพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขนิษฐา วัชรภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและการดำเนินการศึกษาวิจัยจนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

คริสตา ผลคิมหันต์, จุฑามาศ มุ่ยแดง, ปวีณ์สุดา ชุนนุ้ย. 2563. การพัฒนาการย้อมสีผ้าฝ้ายด้วยสารสกัดจากแก่นขนุน.

ปริญญาานิพนธ์ : สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พชรพล ศิริสุนทร, ขนิษฐา วัชรภรณ์, กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล, ดวงรัตน์ หิรัญญะศิริ. 2564. การพัฒนาจิว

พระจากผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมจากแก่นขนุน. ใน: งานประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59.

กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 972–978.

สัตตบุษย์ ผ้าไตร. 2555. ที่มาของการตัดเย็บจิว. <http://www.phatri.com/>, 28 พฤศจิกายน 2564.

หทัยรัตน์ กองศิริเรือง. 2546. การสกัดสีย้อมจากดอกคำฝอยและแก่นขนุนสำหรับย้อมผ้าฝ้าย. ปริญญาานิพนธ์วิทยา

ศาสตรบัณฑิต, สาขาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

อภิชาติ สนธิสมบัติ. 2545. กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ. <http://www.ttcexpert.com/lesson4.html>, 28 พฤศจิกายน 2564.

PubChem. 2021. Cetrimonium bromide. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cetrimonium-bromide>,

28 November 2564.

PubChem. 2014. Morin. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Morin/>, 28 November 2564.

การตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายโดยการเคลือบสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้มีความแข็งและคงรูปสำหรับการผลิตกระเป๋า

The finishing of cotton fabrics by cellulose-titanium dioxide coating to provide stiffness and shape retention for bag manufacturing

ธีร์จุฑา อินทรสร, ขนิษฐา วัชรารภณ์*

Teejutha Intarasorn, Kanitta Watcharaporn*

ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมบัติความแข็งและคงรูปของผ้าฝ้ายด้วยการตกแต่งสำเร็จด้วยเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จมีความแข็งและคงรูปดีขึ้น โดยใช้สารละลายเซลลูโลสเป็นตัวช่วยให้ไททาเนียมไดออกไซด์ยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเซลลูโลส ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นสารไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อความแข็งของผ้าฝ้ายเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์กระเป๋า โดยการทดลองตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้นของสารไททาเนียมไดออกไซด์ 0, 1, 3, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าผ้าที่ได้รับการตกแต่งด้วยเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ 10% มีค่าการคืนตัวดีที่สุด ค่าความทนต่อแรงขัดในสภาวะแห้งและสภาวะเปียกต่ำลงเมื่อปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ผ้าที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จด้วยเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการทนแรงดึงลดลง ยกเว้นตัวอย่างที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ 5 และ 10% สรุปได้ว่าการตกแต่งสำเร็จเพื่อ การคงรูปนั้นควรเลือกใช้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 5% โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: การคงรูปของผ้า, การตกแต่งสำเร็จเพื่อคงรูปผ้า, ความแข็ง, เซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์, ผ้าฝ้าย

Abstract

This research aimed to develop the stiffness and shape retention properties by finishing the cotton fabric with cellulose-titanium dioxide. To make fabrics stiffer, smoother and better shape retention. Cellulose solution helps TiO_2 stronger adhesion to cellulose fibre molecules. To study the influence of TiO_2 concentration on the stiffness of cotton fabric for the development of bag products. The experiment was done by finishing cotton fabrics with the cellulose- TiO_2 solution at the different concentrations of TiO_2 as follows: 0, 1, 3, 5, 10% w/w. The results showed that cotton fabric finished with 10% w/w cellulose- TiO_2 has the best crease recovery value. Abrasion resistance both dry and wet were decreased as TiO_2 increased. Cellulose- TiO_2 finished fabric have reduced tensile strength, excepted the sample with titanium dioxide 5 and 10%. It can be concluded that 5% w/w TiO_2 is an efficient solution for shape retention finishing.

Keywords: Cellulose-Titanium dioxide, Cotton fabric, Fabric finishing, Shape retention, Stiffness

คำนำ

ผ้าฝ้ายเป็นผ้าที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในการนำมาเป็นเครื่องนุ่งห่มเนื่องจากสวมใส่สบาย ผ้าฝ้ายมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนและความชื้นได้ดี อย่างไรก็ตามผ้าฝ้ายมีข้อเสียคือ ยับง่าย เสียทรงง่าย และไม่คืนตัวหากถูกแรงกดทับนานๆ (Singh et al., 2008) อย่างไรก็ตามผ้าฝ้ายยังคงเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมผ้าที่ต้องการความคงทนหรือผ้าฝ้ายที่มีเนื้อแข็ง เช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทผ้าปูที่นอน ผ้าเบาะเก้าอี้ จนกระทั่งผ้าฝ้ายที่จะนำมาผลิตกระเป๋ากอล์ฟ (Xu et al., 2015) ดังนั้น มีงานวิจัยที่ทำการตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการทำให้ผ้าแข็งเป็นการตกแต่งผ้าโดยใช้สารที่ผลิตจากแป้งหรือสารประกอบไวโนลในการทำให้ผ้าแข็ง ผิดเรียบ มีความเป็นเงาและคงรูปมากขึ้น พบว่าไม่ว่าจะเป็นสารผลิตจากการสกัดพืชหรือสารเคมีมักจะเกิดของเสียตามมาด้วย (Slater, 2003) การตกแต่งสำเร็จโดยใช้แป้งเป็นวิธีดั้งเดิมที่ช่วยให้ผ้าฝ้ายมีความเรียบและแข็งคงรูปมากขึ้น แต่แป้งไม่สามารถ ติดอยู่บนผิวผ้าได้ถาวร แป้งจะหลุดออกทุกครั้งที่ผ่านมาการซักและต้องมีการลงแป้งทุกครั้งหลังการซัก เพื่อช่วยให้ผ้าเรียบและอยู่ทรงมากขึ้น นอกจากนี้ แป้งยังเป็นอาหารของเชื้อราที่ส่งผลเสียต่อผิวหนังและผิวผ้า (Kumar and Choudhury, 2017)

ต่อมาได้มีการนำสารไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือสารสีขาวไม่มีกลิ่น ไททาเนียมไดออกไซด์ช่วยให้ผ้าแข็งคงรูปได้อย่างถาวร เป็นสารที่ใช้ทั่วไปในเครื่องสำอางและครีมกันแดดเนื่องจากมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ต มีความสามารถในการสะท้อนน้ำ มีการนำไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำและอากาศเสียเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับและทำความสะอาดสิ่งสกปรกได้ อีกทั้งยังไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและผิวหนัง (Prof. Robert Schiestl, 2009) อย่างไรก็ตามไททาเนียมไดออกไซด์เป็นเพียงเม็ดสีไม่สามารถเกาะบนผ้าได้จึงต้องใช้สารอื่นมาช่วยเป็นตัวยึดเกาะ เพื่อให้ไททาเนียมไดออกไซด์เกาะติดบนผิวผ้าได้อย่างถาวร

สารละลายเซลลูโลสหรือสารที่ได้จากการสกัดจากเส้นใยธรรมชาติ ได้จากการละลายเส้นใยธรรมชาติในกรดซัลฟิวริก 60% เซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรสูงและมีความคงตัวสูง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุล (Klemm et al., 2005) โดยสารละลายนี้มีความสามารถในการยึดเกาะผิวผ้าทำให้ผ้ามีลักษณะแข็ง และคงรูปถาวร สารชนิดนี้เป็นตัวนิยให้ไททาเนียมไดออกไซด์ติดอยู่บนผ้าได้อย่างถาวรโดยไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนังจึง มีการทดลองนำสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์มาเคลือบบนผ้าฝ้ายและทำให้ผ้าฝ้ายแข็งขึ้น (Kale et al., 2016)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติผ้าฝ้ายให้มีความแข็ง เรียบ และคงรูปมากขึ้น โดยการเคลือบผ้าฝ้ายด้วยสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์การศึกษาใช้เซลลูโลสละลายในกรดซัลฟิวริก 60% ที่มีปริมาณสารไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณต่างๆ และทำการทดสอบสมบัติการคืนตัวของผ้า (Crease Resistant property) ก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จ ทดสอบการทนต่อการขัดถู (Crocking Resistant property) ในสภาวะแห้งและเปียก และทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของผ้าขึ้นทดลองก่อนและหลังการตกแต่งสำเร็จ เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการเคลือบสารไททาเนียมไดออกไซด์

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จากบริษัท Guangdong Guenghua Chemical Factory Co., Ltd, โซเดียม คาร์บอเนต (Na_2CO_3) จากบริษัท Labo Chemie Pvt. Ltd, น้ำกลั่น

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

1. ผ้าวิสโคส
2. ผ้าฝ้าย 100%
3. เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัล
4. เครื่อง Roller Padding รุ่น DL-2500V
5. Oven จากบริษัท Heshan Perfect Dyeing Equipment Factory Ltd
6. เตารีดไฟฟ้า
7. เครื่องทดสอบ "Shirley" Crease recovery tester และ Loading device รุ่น M003a
8. เครื่องทดสอบ Abrasion-resistant แบบ Electronic Crockmeter รุ่น GJS 042
9. เครื่องทดสอบ Tensile Testing Machine จากบริษัท Instron series 2701

การเตรียมสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์

เตรียมสารละลายเซลลูโลส 10% โดยน้ำหนักจากผ้าวิสโคสในกรดซัลฟิวริก 60% โดยน้ำหนัก แล้วใส่สารไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 10% โดยน้ำหนักลงในสารละลายเซลลูโลส คนให้เข้ากัน 5 นาที

การเคลือบสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์บนผ้าฝ้าย

นำผ้าขนาด 4 กรัม แช่ในสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์จับเวลา 30 วินาที นำเข้าเครื่อง Roller Padding 20 วินาที จากนั้นทำซ้ำในการแช่ผ้าในสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ 30 วินาทีอีกครั้ง นำเข้าเครื่อง Roller Padding ล้างผ้าด้วยสารละลายสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 100 กรัม/ลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ตามด้วยน้ำกลั่น อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที รีดด้วยเตารีด นำผ้าที่ตกแต่งสำเร็จเรียบร้อยแล้วไปผ่าน กระบวนการทดสอบผ้า

การทดสอบผ้าฝ้ายที่ได้จากการตกแต่ง

การทดสอบการคืนตัว

นำผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ขนาด 40*150 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการคืนตัวผ้า ที่น้ำหนัก 2000 กรัม เป็นเวลา 5 นาที นำมาวัดดวงค่าที่ผ้าคืนตัวกลับมาเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ค่าองศาที่ผ้าคืนตัวกลับในการทดสอบความสามารถในการคืนตัวของผ้าแสดงให้เห็นถึงความแข็งของผ้าแต่ละชั้นทดสอบ และผ้าที่มีสมบัติการคืนตัวได้ดีจะมีการกางมูมออกหลังจากถูกน้ำหนักกดทับได้มากขึ้น

การทดสอบการทนต่อการขัดถู

นำที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1,3,5,10% โดยน้ำหนัก มาทำการทดสอบความคงทนทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง เพื่อทดสอบความสามารถในการยึดเกาะของไททาเนียมไดออกไซด์บนสารพนักสารละลายเซลลูโลส ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) 121 เล่ม 5-2552 โดยทดสอบการขัดถูไป-กลับ 10 รอบ ที่แรงกด 9 นิวตัน หลังจากนั้นนำผ้าที่ผ่านการทดสอบไปวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนสีบนผ้า ทดสอบเกรย์สเกล (Gray scale of colour change) โดยมีระดับการประเมินดังนี้ ระดับ 5 ดีที่สุด ระดับ 4-5 ดีถึงดีที่สุด ระดับ 4 ดี ระดับ 3-4 ปานกลางถึงดี ระดับ 3 ปานกลาง ระดับ 2-3 แย่ถึงปานกลาง ระดับ 2 แย่ ระดับ 1-2 แย่ถึงแย่มาก ระดับ 1 แย่ที่สุด

การทดสอบความคงทนต่อแรงดึงในแนวตั้ง

นำที่ผ่านการตกแต่งด้วยเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) 121 เล่ม 9-2552

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

Table 1 แสดงให้เห็นผลการทดสอบการคืนตัวของผ้าที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของสารไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้าย ดังนี้

Table 1 The results of the crease recovery test

Crease recovery angle (°)	Non-finishing Cotton fabric	The concentration of TiO ₂ in Cellulose-Titanium dioxide (%)				
		0	1	3	5	10
Before	98°	87°	102°	105°	94°	96°
After	104°	100°	112°	114°	103°	107°
Recovery angle (%)	4%	14.94%	9.8%	8.5%	9.57%	11.45%

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นการคืนตัวของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้รับการตกแต่งมีการคืนตัวเพิ่มจาก 98° เป็น 104° หรือเพิ่มขึ้น 4% ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ได้รับการตกแต่งด้วยเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์สูตร 10% มีค่าการคืนตัวเพิ่มจาก 96° เป็น 107° หรือเพิ่มขึ้น 11.45% ซึ่งมีความมากที่สุดสำหรับผ้าฝ้ายที่ได้รับการตกแต่งด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ ตามด้วย TiO₂ 1% เพิ่มขึ้น 9.8%, TiO₂ 5% เพิ่มขึ้นและ 9.57% แต่ผ้าฝ้ายที่ได้รับการตกแต่งสารละลายเซลลูโลสอย่างเดียวมีค่าการคืนตัวเพิ่มจาก 87° เป็น 100° หรือเพิ่มขึ้น 14.94% ซึ่งมากกว่าผ้าฝ้ายที่ได้รับการตกแต่งด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kale et al. (2016) ที่กล่าวไว้ว่าความแข็งแรงของผ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อผ้าฝ้ายถูกเคลือบด้วยสารละลายเซลลูโลส แต่ความแข็งแรงจะค่อยๆลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ลงในสารละลายเซลลูโลส ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความหนืดของสารละลาย เซลลูโลสลดลงหลังจากผสมไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ช่วยลดการพันกันของสายโซ่โพลีเมอร์ (Xu et al., 2013) จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของผ้าลดลง ในช่วงแรก และหลังจากเพิ่ม ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ต่อไปความแข็งแรงของผ้าจะค่อยๆเพิ่มขึ้น การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของผ้าฝ้าย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์สอดคล้องกับการทดลองของ Kale et al. (2016)

จากการทดสอบความคงทนต่อการขัดถูของผ้าฝ้ายที่ได้รับการตกแต่งด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงใน Table 2

Table 2 The result of an abrasion-resistant test, rating by color changed of tested.

Sample	Non-finishing Cotton fabric	The concentration of TiO ₂ in Cellulose-Titanium dioxide (%)				
		0	1	3	5	10
Dry testing	5	5	5	5	4/5	4/5
Wet testing	5	5	4	4	3/4	2/3

*5=best, 4-5=Good to Best, 4=good, 3-4=Moderate to Good, 3=Moderate, 2-3=Poor to Moderate, 2=Poor, 1-2=Worst to Worst, 1=worst

ผลการทดสอบความทนต่อการขีดถูใน Table 2 แสดงให้เห็นว่าในสภาวะแห่งความคงทนต่อการขีดถู ของผ้าที่ ตกแต่ง สำเร็จด้วยสารไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ในระดับ 5 ถึงระดับ 4-5 (ค่าความคงทนต่อการขีดถูลดลง เล็กน้อย) และค่า ความ คงทนต่อการขีดถูของผ้าที่ตกแต่งสำเร็จด้วยสารไททาเนียมไดออกไซด์ในสภาวะเปียก ลดลงอยู่ในระดับ 4, 3/4 และ 2/3 เมื่อมีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ผ้าชิ้นตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักมีความคงทนต่อการขีดถูอยู่ในระดับ 2/3 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด สอดคล้องกับการทดลองของ Kale et.al. (2016) นั่นคือ ผ้าตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ 1, 3 และ 5% มีความคงทนต่อการขีดถูดีถึงดี มาก ตัวอย่างที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ 10% มีความคงทนต่อการขีดถูต่ำเนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ กระจาย อย่างเป็นเนื้อเดียวกันในสารละลายเซลลูโลสเนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้น ทำให้การยึดเกาะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ การ ศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์สูตร 1 และ 3% มีความคงทนต่อการขีด ถูดีที่สุด รองลงมาคือ 5% และต่ำสุดในตัวอย่างที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ 10%

ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดึงของผ้าฝ้ายที่ได้รับการตกแต่งด้วยสารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงใน Fig 1

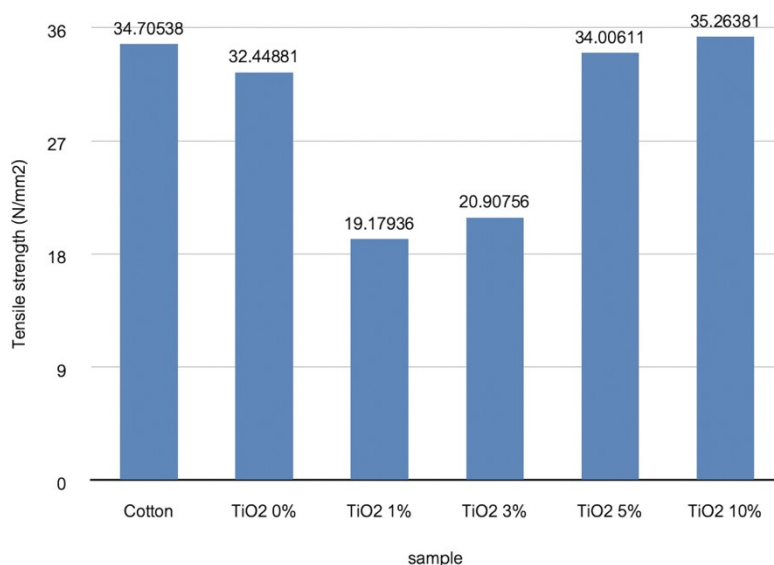


Fig. 1 The results of tensile strength on cotton fabric.

ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดึงของผ้าฝ้ายตัวอย่างทั้ง 5 เมื่อเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ในช่วงต้น ความแข็งแรงของผ้าจะลดลง ซึ่งน่าจะเป็นผลจากค่าความเป็นกรดของสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีตัว ทำละลายเป็นกรดซัลฟิวริก ดังนั้นในผ้าตัวอย่างที่มีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 0, 1 และ 3% จึงอาจโดนกรดทำ ละลายเส้นใยเซลลูโลส ทำให้ผ้าตัวอย่างมีความคงทนต่อแรงดึงลดลง หากเมื่อไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นจนทำให้เกิด การเคลือบบนผิวผ้าได้ดีขึ้นจนกรดไม่สามารถทำลายเส้นใยได้ ความคงทนต่อแรงดึงของตัวอย่างที่มีไททาเนียมได ออกไซด์ 5 และ 10% จึงมีค่าความคงทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกับผ้าตัวอย่างที่ไม่มีสารเคลือบ ซึ่งแตกต่างจากการทดลอง ของ Kale et.al. (2016) ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 0, 1% ความคงทนต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้น หลังจาก เคลือบเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของ ผ้าฝ้าย มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากตัวแปรการทดลองที่ ต่างกัน นั่นคือ ชนิดของสารไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองของ Kale et.al. (2016) ใช้นาโนไททาเนียมได

ออกไซด์ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณทำให้ความแข็งแรงของผ้าฝ้ายเพิ่มขึ้น หากเมื่อไททาเนียมไดออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้นมีผลทำให้ความแข็งแรงลดลงในช่วงต้น

สรุป

ผ้าฝ้ายที่ได้รับการตกแต่งสำเร็จด้วยสารละลายเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์มีการคืนตัวที่ดีขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 5 และ 10% ความคงทนของผ้าต่อการขัดถูดีมากในสภาวะแห้งแต่ไม่คงทนมากนักในสภาวะเปียกโดยเฉพาะอย่างยิ่งผ้าที่ตกแต่งด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10% ส่วนความแข็งแรงของผ้าฝ้ายเมื่อตกแต่งด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 และ 10% มีความต่างเพียงเล็กน้อยจากผ้าฝ้ายที่ไม่ตกแต่งสำเร็จ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารเซลลูโลส-ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5% มาใช้ในการพัฒนาผ้าฝ้าย เพื่อทดลองผลิตเป็นผลิตภัณฑ์กระดาษต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชรภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนการปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือในการเอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง งานวิจัยสำเร็จลุล่วงมาได้ ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Singh, A., Mishra, N., Tuteja, S., Grover, E. 2008. Development of stiffening process for coloured cotton fabric. *Development of stiffening process for coloured cotton fabric. Colour.* 12: 73–76.
- Kumar, A., Choudhury, R. 2017. *Principles of Textile Finishing.* Woodhead Publishing. Serampore. India.
- Kale, B.M., Wiener, J., Militky, J., Rwawiire, S., Mishra, R., Jacob, K.I., Wang, Y. 2016. Coating of Cellulose-TiO₂ nanoparticles on cotton. *Carbohydr. Polym.* 107–113. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.05.006.
- Kale, B.M., Wiener, J., Militky, J., Rwawiire, S., Mishra, R., Jabbar, A. 2016. Dyeing and stiffness characteristics of cellulose-coated. *Cellulose* 23: 981–992. doi: 10.1007/s10570-015-0847-0.
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.P., Bohn, A. 2005. Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. *Poly Sci.* 3358–3393. doi: 10.1002/anie.200460587.
- Xu, F., Yang, Y., Zhang, G., Zhang, F., Zhang, Y. 2015. A self-stiffness finishing for cotton fabric with N-methyl morpholine-N-oxide. *Cellulose*, 22: 2837–2844. doi: 10.1007/s10570-015-0686-z.
- Slater, K. 2003. *Environmental impact of textiles: Production, processes and protection.* Woodhead Publishing. Washington D.C. USA.
- Schiestl, R. 2009. Nanoparticles used in common household items cause genetic damage in mice. <https://www.sciencedaily.com/releases/2009/11/091116165739.htm>, 19 December 2021.

Effect of different pretreatments on drying characteristics, color and chlorophyll contents of duckweeds (*Wolffia globosa*)

Orayanee Pannuan, Saowanee Lertworasirikul*

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: saowanee.l@ku.ac.th

Abstract

The objective of this study was to determine the effect of hot-water blanching and steam blanching pretreatments before drying with a hot air dryer at 70°C on the drying time, color, and chlorophyll contents of duckweed. The results showed that pretreatments with hot-water blanching and steam blanching helped to decrease the drying time of duckweed. The color difference (ΔE) and lightness (L^*) values of steam blanching pretreatment were highest and significantly different from fresh duckweed and hot-water blanching duckweed. The highest chlorophyll a (1.63 ± 0.01 mg/g) and chlorophyll b (1.69 ± 0.01 mg/g) contents were found in dried duckweed using the steam blanching pretreatment. The findings of the research suggested that steam blanching pretreatment could be used to develop dried duckweed with high chlorophyll contents and help decrease the drying time.

Keywords: Chlorophyll, Color, Duckweed, Hot water blanching, Steam blanching

Introduction

Duckweed is a plant that grows in the clean river of the Northeastern and Northern parts of Thailand. The species of duckweed in Thailand is *Wolffia arrhizal* (L.) and *Wolffia globosa* (L.). Although the fresh duckweed has very high nutrition but needed to be pretreated before the drying process for optimal quality of duckweed powder. Duckweed is the organism that can give more nutrients instead of consuming meat because duckweed has high nutrients, its protein content is 50.89%, fat 6.07%, carbohydrate 31.33%, ash 11.71% of dry weight (Hu et al., 2022).

In this study, selecting blanching methods is the way to destroy enzymatic and microbial activity in vegetables and some fruits before further processing. The blanching in this study including the steam blanching and hot-water blanching. Steam blanching has advantages such as smaller losses of water-soluble components and better energy efficiency. The hot-water blanching has advantages such as more uniform product heating and uses less floor space (Fellows et al., 2017). Both processes were investigated for the drying process of duckweed. The suitable drying time was determined for the good quality of dried duckweed based on color and chlorophyll content. The objective of this study was to determine the effect of different pretreatments on the drying characteristics, color and chlorophyll contents of duckweeds.

Materials and Methods

Materials

Fresh duckweed was purchased from San Pa Tong district of Chiang Mai province and transported to Kasetsart university Bang Khen campus by cooling trucks. Acetone (AR grade, Merck Co., Germany) was purchased from T.S. Interlab limited partnership.

Pretreatment

Fresh duckweed in the quantity of 1 kg was washed in clean water and drained the water out, after that the sample was passed to two pretreatment methods including hot water blanching and steam blanching with 1 kg of duckweed and boil 2 kg of water with 98 ± 2 °C for 1 minute. Then the sample was cooled down by passing through clean water at room temperature for 30 seconds and drained excess water.

Drying of duckweed

After 1 kg of fresh duckweed was pretreated, it was spread on a tray with paper baking sheet with the size of 40 cm in width, 45 cm in length and 3 cm in height of the tray. The sample was dried in the hot air dryer (Assemble order, Thailand) consisting of a timer, a thermostat for temperature control, an air heater, a 0.18 kW fan motor, and five wire-mesh trays. The sample on a tray was placed in the middle of hot air dryer and the fan speed of the dryer was set constant during the drying process. The sample was dried at 70 °C for 5 hr. During the drying process, the sample was flipped and spread evenly every 1 hr. Dried duckweed was mashed for

30 seconds and passed through 100- mesh sieve to get homogeneous particle size of duckweed powder. Then the duckweed powder was kept in to an aluminum bag, and stored in refrigerator at -18 °C.

Measurement of moisture content

The duckweed sample was collected every 1 hr during the drying process for measurement of its moisture content. To measure the moisture content, the sample was heated using hot air oven method at 105 °C until constant weight obtained (AOAC, 2000). Weight loss of sample was used to calculate the moisture content of the sample (% , wb) using Equation 1. Measurement of moisture content was performed in triplicate.

$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100 \quad (1)$$

where

W1 = weight of container with lid;

W2 = weight of container with lid and sample before drying; and

W3 = weight of container with lid and sample after drying.

Measurement of color

The color of duckweed powder was measured using a spectrophotometer (CM3500D, Minolta Co., Japan). The duckweed powder was added in to the Petri dish then the color parameters was showed in CIE (L* - lightness, a* - redness-greenness, b* - yellowness-blueness) value. Measurement of color of duckweed powder with 10 replications and calculation in total color different (ΔE) were made using Equation 2, which L_0 , a_0 , and b_0 are the control values of fresh duckweed.

$$\Delta E = \sqrt{(a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2 + (L^* - L_0)^2} \quad (2)$$

Measurement of water activity

Measurement of water activity using water activity meter (CX3TE, Aqualab, USA) at 25±2 °C. Before measurement, it was calibrated with a standard solution with a_w of 0.760. For each sample, measurements of a_w was performed in triplicate.

Determination of chlorophyll content

Measurement of chlorophyll content was done by using a spectrophotometer (160A, Shimadzu, Japan). 100 mg of duckweed powder was added in a falcon tube, and then 10 ml of 80% acetone was added in the tube. The falcon tubes were kept with ice in the dark environment for 30 minutes and then the samples were centrifuged at 3000 rpm with Rotina 380R (Hettich, Germany) for 10 minutes at 4 °C before immediately putting in ice and then determining chlorophyll content by rapid measurement with a spectrophotometer. The absorbance of solution was read at two wavelengths 663.2 and 646.8 nm

(modified method from Roshanak et al., 2016). Calculation of chlorophyll concentrations in mg/l of acetone was done by Equations 3–6:

$$\text{Chl a (mg/l)} = (12.25 \times \text{Abs}_{663.2}) - (2.79 \times \text{Abs}_{646.8}) \quad (3)$$

$$\text{Chl b (mg/l)} = (21.50 \times \text{Abs}_{646.8}) - (5.10 \times \text{Abs}_{663.2}) \quad (4)$$

$$\text{Chl a (mg/g)} = \text{Chl a (mg/l)} \times \left[\frac{V(\text{ml})}{1000} \right] \times \frac{1}{\text{weight(g)}} \quad (5)$$

$$\text{Chl b (mg/g)} = \text{Chl b (mg/l)} \times \left[\frac{V(\text{ml})}{1000} \right] \times \frac{1}{\text{weight(g)}} \quad (6)$$

Statistical analysis

The results showed the mean \pm standard deviation and subjected to analysis of variance (ANOVA). The difference between the means was determined using Duncan's multiple range test (DMRT) and defined the significance at ($p < 0.05$).

Results and Discussion

Drying time, moisture content of duckweed in different pretreatment

From Fig.1, before 120 minutes it was found that the moisture content of 3 methods showed slowly decreased but after 120 minutes it showed that the moisture content during drying of the treatments with hot-water blanching and steam blanching pretreatments reduced faster than the method without pretreatment. As some researches showed pretreatments helped faster drying time possibly because of hydrolysis and breakdown of the cell wall (Zhao et al., 2015). And also, it was found that the moisture content and water activity of the dried duckweed in the 3 methods was below 12% and 0.6, respectively, which passed the Thai community product standard of dried fruits and vegetables, after drying for 220 minutes.

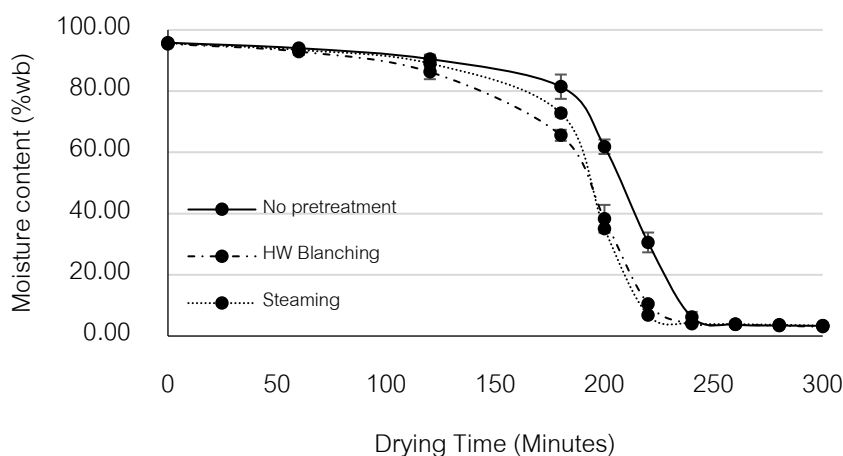


Fig.1 Changes in the moisture content (%) of different pretreatment method with without pretreatment, hot-water blanching method and steam blanching method.

As shown in Table 1, the water activity and final moisture content were not significantly different ($p > 0.05$), with moisture content below 12%wb and water activity below 0.6 following the requirement of Thai community product standard.

Table 1 Drying time, final moisture content and water activity of different pretreatment methods

Parameters	Pretreatment		
	Without	Hot-water blanching	Steam blanching
Final moisture content ^{ns} (%wb)	3.34±0.01 ^{ns}	3.04±0.17 ^{ns}	3.39±0.46 ^{ns}
Water activity ^{ns}	0.30±0.02 ^{ns}	0.34±0.08 ^{ns}	0.33±0.19 ^{ns}

*ns in the same row followed by different superscripts are not significantly different ($p > 0.05$)

Color of duckweed powder

In this study, the color of treatments were significantly different. The different L*, a*, and b* values of dried duckweed powder might be caused by the different pretreatments which destroyed the enzymatic browning reaction. The L* value was significantly different at $p < 0.05$ while the steam blanching method showed the highest L* value (45.17±2.15) and the lowest L* value (39.36±0.21) was the fresh duckweed. The a* value of the treatment with the steam blanching method was not significantly different from fresh duckweed but was different from other treatments, while the steam blanching method showed the lowest a* value (-8.43±0.47) and the highest a* value (-7.87±0.76) was the method without pretreatment. As (Janiszewska et al., 2021) said the pretreatments could influence color. The ΔE was significantly different in all methods compared to fresh duckweed and the highest ΔE was the steam blanching method (6.49) and the lowest was the hot-water blanching (5.43).

Table 2 color of duckweed powder in different pretreatment

Duckweed	Color parameter			
	L*	a*	b*	ΔE
Fresh	39.36±0.21 ^c	-7.94±0.82 ^{ab}	28.20±0.21 ^a	0.00 ^d
Without pretreatment	41.58±3.43 ^b	-7.87±0.76 ^a	25.42±1.99 ^c	5.78 ^b
Hot-water blanching	42.59±2.32 ^b	-7.94±0.44 ^a	25.67±1.69 ^c	5.43 ^c
Steam blanching	45.17±2.15 ^a	-8.43±0.47 ^b	27.67±2.14 ^b	6.49 ^a

*Means±SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

Chlorophyll content of duckweed powder in different pretreatment

As shown in Table 3, the chlorophyll content a and b of the steam blanching method showed significantly difference at $p < 0.05$ from the other methods while the steaming method showed the highest of both chlorophyll content a and b (1.63±0.01 and 1.69±0.01 mg/g respectively). While the lowest of chlorophyll A content was found in the duckweed without pretreatment (1.38±0.10 mg/g).and the lowest of chlorophyll b content was the hot-water blanching method (1.61±0.05 mg/g)

Table 3 Chlorophyll content of duckweed powder in different pretreatment

Pretreatment	Chlorophyll	
	Chlorophyll A	Chlorophyll B
Without	1.38±0.10 ^b	1.63±0.04 ^b
Hot-water blanching	1.40±0.10 ^b	1.61±0.05 ^b
Steam blanching	1.63±0.01 ^a	1.69±0.01 ^a

*Means±SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

Conclusions

In conclusion, the findings of this study indicated that the pretreatments by hot water blanching and steaming helped improve drying time but pretreatments affected color of duckweed powder because they destroyed structure of the samples. The ΔE of steaming treatment was highest and was significantly different from fresh duckweed than other treatments. The content of chlorophyll content was preserved the most by the steaming method. This study suggested that before drying duckweed, steaming pretreatment was recommended to help faster drying time and preserve chlorophyll contents of duckweed powder. Also, at this condition, other characteristics such as moisture content, water activity were not different from other methods and followed under Thai community product standard.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, through an e-Proceedings scholarship.

References

- Fellows, P.J. 2017. Dehydration. In: Food Processing Technology, Woodhead Publishing. Cambridge, UK, pp. 661–716.
- Hu, Z., Fang, Y., Yi, Z., et al. 2022. Determining the nutritional value and antioxidant capacity of duckweed (*Wolffia arrhiza*) under artificial conditions. LWT, 153, p.112477.
- Janiszewska-Turak, E., Rybak, K., Grzybowska, E., Konopka, E., Witrowa-Rajchert, D. 2021. The influence of different pretreatment methods on color and pigment change in beetroot products. Molecules 26: 3683. doi: 10.3390/molecules26123683.
- Roshanak, S., Rahimmalek, M., Goli, S.A. 2016. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves. J. Food Sci. Technol. 53: 721–729.
- Zhao, X., Moates, G.K., Wilson, D.R., Ghogare, R.J., Coleman, M.J., Waldron, K.W. 2015. Steam explosion pretreatment and enzymatic saccharification of duckweed (*Lemna minor*) biomass. Biomass Bioenergy 72: 206–215.

การพัฒนาชุดสำหรับสุนัขที่มีภาวะผิปกดที่ผิวหนัง

Development of dog suit for dogs with skin diseases

ดวงรัตน์ บุญคำภา^{a,*}, ศุภสิริวีร์ เจิมประไพ^b, พรรณภัทร พรหมเพ็ญ^a, ปวริน ตันตริยานนท์^aTuangrat Boonkampa^{a,*}, Suttiwee Chermprapai^b, Pannapat Phromphen^a, Pawarin Tuntariyanond^a^aภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900^aDepartment of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand^bภาควิชาเวชศาสตร์คลินิกสัตว์เลี้ยง คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900^bDepartment of Companion Animal Clinical Sciences, Faculty of Veterinary Medicine, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: tuangrat.bo@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาชุดสำหรับสุนัขที่มีภาวะผิปกดที่ผิวหนัง โดยศึกษาปัญหาและความต้องการใช้งานผลิตภัณฑ์จากกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานและผู้ที่เกี่ยวข้อง ด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึกกลุ่มตัวอย่างสัตวแพทย์ที่มีความเชี่ยวชาญ จำนวน 4 คน และผู้เลี้ยงสุนัข จำนวน 9 คน ผลการสัมภาษณ์พบว่าสุนัขที่มีอาการผิปกดที่ผิวหนังจะมีการติดเชื้อบริเวณลำตัวและขาหนีบ ส่งผลให้การรักษาดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ยาเพื่อลดอาการและจำเป็นต้องใส่ชุดสุนัขเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดบริเวณที่คันจนเกิดแผลติดเชื้อ ดังนั้นการศึกษาสมบัติของผ้าตัวอย่าง 4 ชนิด ได้แก่ ผ้าถักที่มีส่วนผสมของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ฝ้าย และสเปนเด็กซ์ ผลการศึกษาพบว่า ผ้าที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำไปพัฒนาต้นแบบชุดสุนัข คือผ้าถักที่มีส่วนผสมของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 100% มีความหนาแน่นจำนวนห่วงสูงจะทำให้มีการระบายอากาศและมีสมบัติการดูดน้ำในแนวดิ่งและแนวนอนที่ดี

คำสำคัญ: การแพร่ผ่านของน้ำ, การระบายอากาศ, การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์, ชุดสุนัข, สุนัขที่มีภาวะผิปกดที่ผิวหนัง

Abstract

This research aimed to develop concept design of dog suit for dogs with skin diseases. Firstly, the problems and needs of dog suit from users and stakeholders were conducted by the in-depth interview with four veterinarians and nine dog owners. The interview's results found that most dogs with skin diseases were caused by infections of the trunk and groin. So the medications were used in order to reduce symptoms and the dogs were required to wear dog clothes because the dogs might bite the itchy area of their body. After that, the physical properties of four types of knitted fabrics; 100% had high loop density made polyester, polyester blended with cotton and polyester blended with cotton and spandex were investigated for selecting the optimal fabrics for developing dog suit prototypes. It was found that the 100% polyester knitted fabric showed the highest air permeability and highest wicking property for both vertical and horizontal direction.

Keywords: Air permeability, Design and development, Dog suit, Dogs with skin diseases, Wicking

คำนำ

สุนัขถือว่าเป็นสัตว์เลี้ยงยอดนิยมของคนส่วนใหญ่ สามารถนำมาเลี้ยงเป็นเพื่อนได้ ผู้เลี้ยงมีการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี หากพบว่ามีปัญหาการเป็นโรคผิวหนังและมีอาการคันมาก โรคผิวหนังที่พบในสุนัขจะมีลักษณะอาการที่ทำให้เกิดการอักเสบและขนร่วงเป็นวง สุนัขอาจมีอาการเกาหรือกัดและบริเวณผิวหนังอย่างรุนแรง ภาวะผดผกติของผิวหนังที่เกิดกับผิวหนังสุนัขมีสาเหตุมาจากหลายประการ ซึ่งอาจเกิดจากการติดเชื้อหรือไม่ติดเชื้อก็ได้ (กมล, 2555) การติดเชื้อแบคทีเรียในสุนัขเป็นโรคผิวหนังชนิดหนึ่งที่เกิดบ่อยครั้งเกิดจากการติดเชื้อแบคทีเรียจำพวก *Staphylococcus* โดยอาจมีพยาธิสภาพเนื้อเยื่อและลักษณะทางคลินิกแตกต่างกัน เช่น มีการติดเชื้อเฉพาะบริเวณผิวหนังชั้นนอก หรือมีการติดเชื้อของผิวหนังชั้นในลึกลงไป (สุลิตร์น, ม.ป.ป.) สุนัขที่มีภาวะผดผกติของผิวหนังจากการติดเชื้อรา เชื้อแบคทีเรีย และเชื้อยีสต์ นั้นจะมีลักษณะอาการที่เกิดบนผิวหนังแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการออกแบบเสื้อผ้าสำหรับสุนัขเหล่านี้ จะต้องคำนึงถึงวัสดุสิ่งทอที่มีสมบัติพิเศษ โดยการนำ “นาโนเทคโนโลยี” มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต หรือหลังจากการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสิ่งทอนั้นให้มีคุณสมบัติพิเศษเพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะมีอนุภาคนาโน (nanoparticles) หรือเส้นใยนาโน (nano-fiber) ปรากฏอยู่บนผิวหรือผสมอยู่ในเนื้อของเส้นใยผ้า หรือมีชั้นฟิล์มที่มีขนาดความบางในระดับนาโนเมตร (nano thin-film) เคลือบอยู่บนผิวของเส้นใยผ้า (อัฐพงษ์, 2556) โดยใช้อนุภาคนาโนซึ่งมีมาผสมบนเส้นใยผ้าเพื่อให้มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเป็นสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, ม.ป.ป.)

ความสบายในการสวมใส่เสื้อผ้าเป็นปัจจัยหลักในการเลือกใช้งานเสื้อผ้า โดยเสื้อผ้าเป็นส่วนสำคัญในการช่วยรักษาสมดุลของความชื้นระหว่างทำกิจกรรมต่างๆ ด้วยการควบคุมการแผ่รังสี การนำความร้อน และการพาความร้อนของร่างกาย มีการผลิตเนื้อผ้าที่มีสมบัติพิเศษที่ช่วยระบายอากาศ (Rossi, 2018) ดังนั้นการทดสอบสมบัติของผืนผ้าที่นำมาใช้ในการทำต้นแบบชุดสุนัขสำหรับสุนัขที่มีภาวะผดผกติของผิวหนังจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบความสบายในการสวมใส่ของผืนผ้า โดยการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การซึมผ่านของอากาศ (Air permeability) เป็นสมบัติของการระบายอากาศของผ้า ผ้าที่มีสมบัติการซึมผ่านของอากาศที่ดีจะทำให้รู้สึกสบายเมื่อสวมใส่ และการดูดน้ำของผ้าในแนวตั้งและแนวนอน (vertical and horizontal wicking) โดยผ้าที่มีอัตราการดูดน้ำสูง จะสามารถระบายเหงื่อจากร่างกายผ่านผืนผ้าออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็ว (Yanilmaz and Kalaoglu, 2012)

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบและพัฒนาชุดที่เหมาะสมสำหรับสุนัขที่มีภาวะผดผกติของผิวหนังโดยการศึกษาปัญหาและความต้องการใช้งานของผู้เลี้ยงสุนัข เพื่อนำมากำหนดแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์และการคัดเลือกผ้าจากผ้าถัก 4 ชนิดที่มีส่วนผสมของสารนาโนซิงค์และมีอัตราส่วนผสมของเส้นใยชนิดต่างๆ ได้แก่ ผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 100% ผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 67% และ ฝ้าย 30% ผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 45% และฝ้าย 55% และผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 43% ฝ้าย 52% สเปนเดกซ์ 5% โดยตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกันจึงนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพต่างๆ และนำมาทดสอบสมบัติในการระบายอากาศและการดูดน้ำเพื่อให้ได้ผ้าที่มีสมบัติที่ทำให้มีความสบายในการใช้งาน

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาปัญหาและความต้องการใช้งานชุดสุนัขสำหรับสุนัขที่มีภาวะผดผกติของผิวหนัง โดยการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview)

กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ สัตวแพทย์ที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านการบำบัดรักษาสุนัขที่มีภาวะผดผกติของผิวหนังจำนวน 4 คนและ ผู้เลี้ยงสุนัข จำนวน 9 คน ด้วยการสัมภาษณ์แบบกึ่งมีโครงสร้าง (Semi-Structure Interview) ในด้าน

ต่างๆ ดังนี้ อาการผดผื่นของผิวหนังที่พบในสุนัข, การรักษาภาวะผดผื่นที่ผิวหนังของสุนัข, รูปแบบการใช้งานชุดสุนัขสำหรับสุนัขที่มีภาวะผดผื่นของผิวหนัง ทำการสัมภาษณ์โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 45 นาที และนำผลการสัมภาษณ์มาวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) และสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบและพัฒนา

วัสดุ

ผ้าตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าถักเนื่องจากผ้าถักมีโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น โดยเลือกโครงสร้างแบบซิงเกิลเจอร์ซี โดยมี 4 ประเภทที่มีส่วนผสมของเส้นใยแตกต่างกัน ได้แก่ ผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 100% และตกแต่งสำเร็จด้วยนาโนซิงค์ ผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 67% ฝ้าย 30% และตกแต่งสำเร็จด้วยนาโนซิงค์ ผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 45% ฝ้าย 55% และตกแต่งสำเร็จด้วยนาโนซิงค์ ผ้าถักจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 43% ฝ้าย 52% สเปนเดกซ์ 5% และตกแต่งสำเร็จด้วยนาโนซิงค์

การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

1. ศึกษาน้ำหนักผ้าต่อหน่วยพื้นที่ และ การทดสอบความหนาตามมาตรฐาน ASTM D 1777 โดยทำทดสอบ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย
2. ศึกษาสัดส่วนวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์รุ่น OLYMPUS โดยใช้กำลังขยาย 4 เท่า
3. ศึกษาจำนวนห่วงถักต่อหน่วยพื้นที่ ตามมาตรฐาน ASTM D8007 โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
4. ศึกษาการซึมผ่านของอากาศ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D737-96 โดยทำทดสอบ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย
5. ศึกษาอัตราการดูดน้ำของผ้าตามแนวตั้งและแนวนอน ทำการทดสอบโดยปรับปรุงจากมาตรฐาน AATCC 197 และ AATCC 198 ตามลำดับ โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างสัตวแพทย์ จำนวน 4 คน พบว่า ปัจจัยหลักทางด้านความผดผื่นของผิวหนังที่พบในสุนัขส่วนใหญ่ คือ มีแผล มีการติดเชื้อบริเวณผิวหนัง คัน ขนร่วง พบได้ในบริเวณ ลำตัว ฝ่าเท้า หู ขาหนีบ รักแร้ (ซอกอับ) ใบหน้า และหลัง โดยมีอาการเรื้อรังและแย่งลง ประมาณ 1-3 เดือน หรือรักษาจากที่อื่นมามากกว่า 1 เดือนแล้วไม่หาย สัตวแพทย์จะทำการรักษาภาวะผดผื่นที่ผิวหนังของสุนัข มีวิธีการรักษา 2 แบบ คือ การรักษาด้วยการให้ยากินประเภทยาปฏิชีวนะ และการรักษาด้วยการให้ยาทาใช้ภายนอก ผลการรักษาขึ้นอยู่กับภาวะของโรค และใช้ประมาณ 1-3 เดือน หากสุนัขมีอาการคัน กัด เกา มีแผลที่ผิวหนัง หรือมีโรคภูมิแพ้ต่อสิ่งแวดล้อม สัตวแพทย์จะแนะนำให้สวมใส่ชุดสุนัข

จากผลการสัมภาษณ์พบว่าปัจจัยหลักทางด้านรูปแบบชุดสุนัขสำหรับสุนัขที่มีภาวะผดผื่นของผิวหนังนั้น บางกรณีมีผลต่อการรักษาโดยป้องกันการสัมผัสจากสิ่งกระตุ้น บางกรณีไม่มีผลต่อการรักษา แต่อาจมีผลต่อการประเมนอาการ เนื่องจากบางกรณีใส่เสื้อเพื่อช่วยลดอาการที่ผิวหนังจากการเกา แต่สุนัขยังคงมีอาการคันเหมือนเดิม และกรณีเกิดการกุดทับ เสื้อจะช่วยลดการกุดทับพื้น โดยรูปแบบและลักษณะชุดสุนัขที่มีความเหมาะสมกับสุนัขที่มีภาวะผดผื่นของผิวหนังควรมีน้ำหนักเบา ระบายอากาศได้ดี มีความยืดหยุ่น ลดการเกิดกลิ่น มีรูปแบบเต็มตัวหรือครึ่งตัวก็ได้ มีความหลากหลายของขนาดและแบ่งตามเพศ ซึ่งเนื้อผ้าของชุดสุนัขควรมีความกระชับและยืดหยุ่น ระบายอากาศได้ดี ไม่หนาหรือบางเกินไป มีสมบัติกันน้ำ ทนต่อการซักและไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองหรือแพ้ ลักษณะการใช้งานของชุดสุนัขควรมีสวมใส่ได้ง่าย มีการออกแบบให้สะดวกต่อการซักรีด เช่น มีกระดุม ซิป เป็นต้น ส่วนการดูแลรักษาชุดสุนัข พบว่าชุดสุนัข

มีความจำเป็นต้องซักได้ตามสภาพผิวหนังและความสกปรกจากการใช้งาน และสามารถนำไปซักโดยใช้เครื่องซักผ้าได้ มีราคาที่เหมาะสม ไม่ควรเกิน 1,000 บาท ต่อชุด

ผลจากการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างผู้เลี้ยงสุนัข จำนวน 9 คน พบว่า ปัจจัยหลักทางด้านอาการผดผื่นของผิวหนังที่พบในสุนัขส่วนใหญ่มีอาการคัน จากการมีตุ่มแดงขึ้นบริเวณผิวหนัง และถูกกัดหรือเกาจนเป็นแผล บริเวณที่พบส่วนมากเกิดขึ้นในบริเวณหู เท้า ข้อพับ หรือเกิดอาการทั่วตัว ระยะเวลาในการสังเกตอาการผดผื่นประมาณ 1-8 เดือน ผู้เลี้ยงสุนัขส่วนใหญ่ไม่มีความกังวลว่าโรคผิวหนังของสุนัขจะติดต่อมาสู่คน ผู้เลี้ยงสุนัขมีการดูแลรักษาสุนัขที่มีภาวะผดผื่นของผิวหนัง ด้วยการพาสุนัขมาพบแพทย์เพื่อรับประทานยา ใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่เหมาะสม และดูแลจนกว่าอาการจะดีขึ้น

ส่วนปัจจัยหลักทางด้านชุดสุนัขที่เหมาะสมกับสุนัขที่มีภาวะผดผื่นของผิวหนัง พบว่า โดยทั่วไปสุนัขจะสวมชุดสุนัขที่เป็นเสื้อคลุม เสื้อยืด จั๊มสูท จะสวมใส่ในเวลากลางคืน หรือช่วงที่มีอากาศหนาว สุนัขสวมใส่ชุดได้นานสูงสุดประมาณ 1-3 วัน และใน 1 วัน จะสวมประมาณ 6-7 ชั่วโมง ผู้เลี้ยงสุนัขส่วนใหญ่มีความต้องการชุดสุนัขสำหรับสุนัขที่มีภาวะผดผื่นของผิวหนัง เพราะอาจจะช่วยในการรักษาโรคได้ ควรมีรูปแบบเป็น จั๊มสูท เสื้อยืด และเสื้อตัวสั้น โดยมีคุณสมบัติที่ทำความสะอาดง่าย เนื้อผ้ามีความยืดหยุ่น ระบายอากาศได้ดี ชุดสุนัขทั่วไปตามท้องตลาดยังไม่ตอบสนองความต้องการ เพราะคุณภาพของผ้าที่ใช้ส่วนใหญ่ไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ความถี่ในการเปลี่ยนชุดสุนัขประมาณ 1-3 วัน โดยจะทำความสะอาดชุดสุนัขประมาณ 1 วัน ราคาค่าของชุดสุนัขควรไม่เกิน 500 บาท

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ



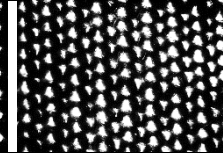



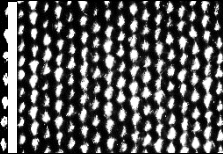

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ แสดงใน Table 1 เนื่องจากสมบัติการซึมผ่านของอากาศใช้ในการประเมินและเปรียบเทียบสมบัติการหายใจได้ของผ้า จาก Table 1 พบว่า ผ้าหมายเลข 1 สามารถยอมให้อากาศซึมผ่านได้มากที่สุด ส่วนผ้าหมายเลข 4 ยอมให้อากาศซึมผ่านได้น้อยที่สุด ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากโครงสร้างของผ้าถัก เนื่องจากผ้าหมายเลข 1 มีโครงสร้างที่มีรูมากที่สุด จึงทำให้มีการระบายอากาศได้มากที่สุด ส่วนผ้าหมายเลข 4 มีโครงสร้างการถักแน่น มีจำนวนห่วงถักต่อพื้นที่ ความหนา และน้ำหนักผ้ามากที่สุด จึงทำให้อากาศไหลผ่านผืนผ้าได้น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oner (2019)

การดูดน้ำของผ้าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังจากเมื่อผ้ามีการเปียกน้ำ (wetting) และน้ำเคลื่อนที่ผ่านรูเล็กๆ ของช่องว่างระหว่างเส้นใยด้วยแรงคาปิลลารี (capillary force) ซึ่งการดูดน้ำของผ้าเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนและมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการดูดน้ำของผ้า เช่น ชนิดของเส้นใย โครงสร้างผ้า ความขรุขระของพื้นผิวผ้า ขนาดของช่องว่างและการกระจายตัวของช่องว่างระหว่างเส้นด้าย เป็นต้น (Kumar and Das, 2014) จาก Table 1 พบว่าผ้าหมายเลข 2 และ 3 มีอัตราการดูดน้ำในแนวตั้งของผ้าตามแนวขวาง (course direction) และ ตามแนวยาว (wale direction) ต่ำกว่าผ้าหมายเลข 1 และ หมายเลข 4 เมื่อพิจารณาสมบัติการดูดน้ำในแนวตั้งตามขวางพบว่า ผ้าหมายเลข 1 มีอัตราการดูดน้ำในแนวตั้งของผ้าตามแนวขวางดีที่สุด ส่วนผ้าหมายเลข 4 มีอัตราการดูดน้ำในแนวยาวดีที่สุด

จากโครงสร้างของผ้าใน Table 1 พบว่า ผ้าหมายเลข 1 เป็นผ้าถักที่มี 2 หน้า กล่าวคือ ในด้านหน้าผ้าจะมีการถักที่เว้นการคล้องห่วงทุกสามห่วงของห่วงแนวนอน จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดเป็นช่องว่างในผืนผ้าส่งผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำไปตามเส้นใยในแนวตั้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของผ้าหมายเลข 4 พบว่า ผ้าหมายเลข 4 มีจำนวนห่วงต่อพื้นที่ในแนวยาวมากกว่าผ้าอื่นๆ ทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นด้ายน้อยกว่าผ้าชนิดอื่นๆ จึงให้มีช่องว่างเล็กๆ ระหว่างเส้นใยที่ให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนได้อย่างรวดเร็ว (Yang et al., 2021) ส่งผลให้อัตราการดูดน้ำของ

ผ้าในแนวตั้งตามแนวยาวของผ้าดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fan et al. (2020) ที่กล่าวว่าความหนาแน่นของจำนวนห่วงตามแนวยาวของผ้ามีผลต่ออัตราการดูดน้ำในแนวตั้งเมื่อทดสอบทั้งแนวยาวและแนวขวางของผืนผ้า

Table 1. Specification of tested samples

Item		Sample specification			
Samples		1	2	3	4
Composition		100% Polyester	67% Polyester 30% Cotton	45% Polyester 55% Cotton	43% Polyester 52% Cotton 5% Spandex
Fabric samples	Front				
	Back				
Color		Brown	Black	Grey	Green
Fabric structure		single jersey	Single jersey	Single jersey	Single jersey (Warp knit)
Fabric density	Course/inch	57	50	70	44
	Wales/inch	51	50	64	82
Fabric weight (g/m ²)		152.57	169.17	149.2	188.83
Fabric thickness (mm)		0.60	0.50	0.40	0.67
Air permeability (cfm)		448	297	141	74
Vertical Wicking Rate (mm/s)	Course	0.27	0.06	0.06	0.21
	Wales	0.18	0.06	0.06	0.24
Horizontal Wicking Rate (mm/s)		120.56	57.52	3.94	15.36

เมื่อพิจารณาอัตราการดูดน้ำของผ้าในแนวนอนพบว่า ผ้าหมายเลข 1 มีอัตราการดูดน้ำตามแนวนอนสูงที่สุด รองลงมาคือผ้าหมายเลข 2, 4 และ 3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของเส้นใยของผ้าแต่ละชนิดพบว่าผ้าหมายเลข 1 มีเส้นใยพอลิเอสเตอร์มากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าหมายเลข 2 และ 3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fan et al. (2020) ที่กล่าวว่า ผ้าถักที่มีอัตราส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์สูงจะช่วยให้อัตราการดูดน้ำในแนวนอนเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นโครงสร้างของผ้าหมายเลข 1 ที่มีช่องว่างในผืนผ้ามากกว่าผ้าอื่นๆ จึงทำให้น้ำเคลื่อนที่ผ่านผ้าในแนวนอนได้ดี

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สรุปได้ว่าผ้าหมายเลข 1 มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตัดชุดต้นแบบ เนื่องจากผ้าสามารถระบายอากาศ และ ดูน้ำได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าชนิดอื่นๆในงานวิจัยนี้

จากผลการสัมภาษณ์และผลการทดสอบสมบัติของผ้า สามารถนำมาสรุปแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาชุดได้ ดังนี้ ชุดสุนัขที่เหมาะสมกับสุนัขที่มีภาวะผิดปกติของผิวหนังควรเป็นแบบจัมสูทเนื่องจากสามารถปกคลุมผิวหนังของสุนัขได้ทั้งตัวทำให้สุนัขไม่สามารถกัดเกาบริเวณที่เป็นแผลได้ และการใช้ผ้าถักทำให้จัมสูทมีความยืดหยุ่น ไม่แน่นเกินไป ไม่อึดอัด รวมถึงอาจจะมีการใช้อุปกรณ์ในการตกแต่งเพิ่มเติม เช่น กระดุม ซิป และตีนตุ๊กแก เพื่อให้ง่ายต่อการสวมใส่ ดังแสดงใน Fig.1

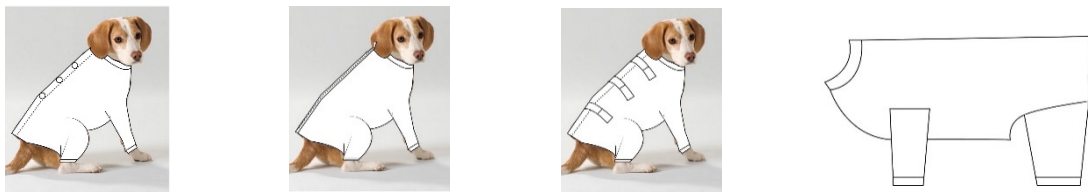


Fig. 1 Skating dog suit

สรุป

จากการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างสัตวแพทย์ผู้เชี่ยวชาญทางด้านการบำบัดรักษาสุนัขที่มีภาวะผิดปกติของผิวหนังพบว่า ส่วนใหญ่สุนัขที่มีภาวะผิดปกติของผิวหนังจะมีลักษณะอาการที่คล้ายคลึงกัน เกิดขึ้นในบริเวณเดียวกันบ่อยๆ และซ้ำๆ หากไม่ได้รับการดูแลรักษาที่ถูกต้องจะทำให้เกิดการลุกลามมากขึ้น และจะมีอาการเรื้อรังและแย่งใน ช่วง 1-3 เดือน ทำให้ผู้เลี้ยงสุนัขกังวลกับความสวยงามของสุนัข และมีความต้องการให้สุนัขสวมใส่ชุดเพื่อช่วยลดภาวะผิดปกติที่ผิวหนัง จากผลการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างผู้เลี้ยงสุนัข พบว่า ชุดสุนัขทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดยังไม่ตอบสนองต่อความต้องการของผู้เลี้ยงสุนัข และมีความต้องการชุดสุนัขสำหรับสุนัขที่มีภาวะผิดปกติของผิวหนัง เพื่อช่วยในการปกป้องร่างกายสุนัขจากสิ่งแวดล้อมและการกัดเกาบริเวณแผลจากตัวสุนัขเอง โดยต้องการชุดสุนัขที่มีรูปแบบเป็นชุดจัมสูทที่ทำความสะอาดง่าย เนื้อผ้ามีความยืดหยุ่น ระบายอากาศและระบายความชื้นได้ดี จากการทดสอบพบว่า ผ้าที่มีคุณสมบัติ ระบายความชื้นและระบายอากาศได้ดี เนื้อผ้าไม่หนาจนเกินไป และมีน้ำหนักเบา จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นต้นแบบชุดสุนัขสำหรับสุนัขที่มีภาวะผิดปกติของผิวหนัง เพื่อให้สุนัขใส่แล้วรู้สึกสบายตัว ไม่อึดอัดหรือรำคาญจนทำให้เกิดการ กัด แทะ หรือเกา ซึ่งจะช่วยให้ลดการลุกลามของเชื้อโรค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สัตวแพทย์ โรงพยาบาลสัตว์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่ให้ข้อมูลอย่างเต็มที่ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ บริษัท เพอร์ม่า คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ผ้าที่ใช้ในการทดสอบและนำมาทำตัวอย่างชุดสุนัข และขอขอบคุณ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60

เอกสารอ้างอิง

กมล ภาคย์ประเสริฐ. 2555. รู้จักกับปัญหาโรคผิวหนังในสัตว์เลี้ยง. <https://pet.kapook.com/view36486.html>, 22 มีนาคม 2564.

ชูสิทธิ์ บวรจลจิตกุล. ม.ป.ป. โรคผิวหนังอักเสบเป็นหนองในสุนัข (Canine Pyoderma).

https://www.thailanddogshow.com/content/352/%E0%B9%82%E0%B8%A3%E0%B8%84%E0%B8%9C%E0%B8%B4%E0%B8%A7%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%AA%E0%B8%9A%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B9%87%E0%B8%99%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B8%AA%E0%B8%B8%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%82-canine-pyoderma_22 มีนาคม 2564.

สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. ม.ป.ป.. ผ้าต้านแบคทีเรีย (เชื้อรา) ได้รับความนิยมมากในขณะนี้.

<https://www.thaitextile.org/th/innovation/detail.4.1.2.html>, 22 มีนาคม 2564.

อัฐพงษ์ แสงงาม. 2556. สิ่งทอกับนาโนเทคโนโลยี. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 17–20.

Fan, Y.N., Wang, W.Y., Kan, C.W., Maha-In, K., Changmuong, W., Wanitchottayanont, S., Mongkholrattanasit, R. 2020. Wicking Properties of Men's Quick-Dry Sportswear. Appl. Mech. Mater. 901: 79–87.

Oner, E. 2019. Mechanical and thermal properties of knitted fabrics produced from various fiber types. Fibers Polym. 20: 2416–2425.

Rossi, R.M. 2018. Specific testing for performance sportswear. In: Dolez, P., Vermeersch, O. Izquierdo, V. (Eds.) Advanced Characterization and Testing of Textiles. Woodhead Publishing. pp. 433-448.

Yang, Y., Yu, X., Chen, L., Zhang, P. 2021. Effect of knitting structure and yarn composition on thermal comfort properties of bi-layer knitted fabrics. Text. Res. J. 91: 3–17.

Yanilmaz, M., Kalaoglu, F. 2012. Investigation of wicking, wetting and drying properties of acrylic knitted fabrics. Text. Res. J. 82: 820–831.

ศักยภาพของอนุภาคนาโนสังเคราะห์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีสีเขียวจากเปลือกลิ้นจี่ในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุของการเน่าเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

The efficacy of green synthesized ZnO nanoparticles from Litchi peel on the growth of fungi causing postharvest decay of fruit

สุริสา สากยโรจน์, ประภัสสร รักถาวร*, อุดมลักษณ์ สุขอัครตะ, เกสรี่ กลิ่นสุคนธ์, ลลิตา คชารัตน์, ณัฐภรณ์ เปรสันเทียะ, ทิพาพร ทองคำ

Surisa Sakayaroj, Prapasson Rugthaworn*, Udomlak Sukatta, Ketsaree Klinsuknon, Lalita Khacharat, Natthaporn Presunthian, Thipaporn Thongkum

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI), Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: aapps@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีสีเขียวโดยสารสกัดเปลือกลิ้นจี่ภายใต้กระบวนการที่เหมาะสมสามารถสังเคราะห์นาโนสังเคราะห์ได้สูงสุดและมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 30–100 นาโนเมตร และเมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุการเน่าเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus niger*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Lasiodiplodia theobromae* และ *Rhizopus stolonifer* โดยทำการหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของอนุภาคนาโนสังเคราะห์ในการยับยั้งและทำลายเชื้อราพบว่า สามารถยับยั้งเชื้อราที่ทดสอบทั้ง 4 สายพันธุ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อราอยู่ระหว่าง 195.31–3,125 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ในการศึกษานี้ได้ทำการเสริมฤทธิ์ของอนุภาคนาโนสังเคราะห์ด้วยสารกันเชื้อราสูตรผสมทางการค้า (Sodium Benzoate : Sodium Propionate) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราพบว่า สูตรผสมในอัตราส่วน 5:5 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราที่ทดสอบได้ดีที่สุดโดยมีค่า MICs เท่ากับ 48.82–781.25 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร

คำสำคัญ: การเน่าเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว, เทคโนโลยีสีเขียว, นาโนสังเคราะห์, เปลือกลิ้นจี่, ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา

Abstract

Biosynthesis of the ZnO nanoparticles (ZnONPs) with green technology by *Litchi chinensis* peel extract as the reducing and capping agent under optimal condition gave the highest synthesis of ZnONPs and synthesized particle size in the range of 30–100 nm. The antifungal activity of synthesized ZnONPs on the growth of 4 species of fungi causing postharvest decay of fruit (*Aspergillus niger*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Lasiodiplodia theobromae* and *Rhizopus stolonifer*) were evaluated. The results of minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum fungicidal concentration (MFC) of the synthesized nanoparticles showed the synthesized ZnONPs could inhibit the growth of all four fungi tested with percentage of inhibitory effect were between 195.31 to 3,125 µg/mL. In this study the efficacy of ZnONPs was improved in combination with mixed antifungal agent (Sodium Benzoate + Sodium Propionate). It was found that biocontrol solutions that combined between ZnONPs and mixed antifungal agent at ratio 5:5 gave the most effective to control all postharvest fungi tested which MICs was 48.82–781.25 µg/mL.

Keywords: Antifungal activity, Green synthesized, Litchi peel, Postharvest decay of fruit, ZnO nanoparticles

คำนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นอีกหนึ่งความก้าวหน้าที่กำลังมีการพัฒนาอย่างมากและต่อเนื่อง นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีในการจัดการกับสสารในขนาดที่เล็กมาก เมื่อนำอนุภาคขนาดเล็กนี้มาจัดเรียงโครงสร้างใหม่ทำให้ได้คุณสมบัติใหม่ๆ เพราะนาโนเทคโนโลยีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อได้มากขึ้นและยังสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายขึ้น อนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์อีกชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์มากมายโดยเฉพาะในด้านการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ เช่น การใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อราในผลิตภัณฑ์กำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า การควบคุมโรคพืช นอกจากนี้สารซึ่งคือออกไซด์ยังไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยใช้วิธีการการระเหยกลายเป็นไอด้วยวิธีทางเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) การใช้วิธีสังเคราะห์ในการผลิตอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากพืชเป็นวิธีทางเลือกใหม่อีกทางหนึ่งในการนำมาใช้แทนวิธีการทางเคมี และวิธีการทางกายภาพ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการทางชีวสังเคราะห์ในการผลิตอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์เป็นวิธีการที่มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในปัจจุบันเนื่องจากเป็นวิธีการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมลดการใช้สารเคมี โดยอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชีวสังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี (Dobrucka and Dugaszewska, 2016) โดยมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารสกัดจากส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ ใบ ดอก และผลซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสามารถนำมาใช้เป็นสารให้กลิ่นตรอนในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนมีรายงานการค้นคว้าจำนวนมากแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการเตรียมอนุภาคนาโนเงินและทองคำโดยใช้สารสกัดจากธรรมชาติ โดยสมบัติการให้อิเล็กตรอนของสารสกัดขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารเคมี องค์ประกอบเคมีในพืชที่มีสมบัติเป็นสารให้อิเล็กตรอน ได้แก่ สารประกอบพอลิฟีนอล (polyphenolic compound) เช่น แทนนิน (tannin) ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) และสารกลุ่มนี้ยังมีสมบัติเป็นสารช่วยเสถียร ช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันและการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (พิชญ์สินี สมชัยดี และ กะระเกด เทศศรี, 2561) ยกตัวอย่างการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์จากสมุนไพรรวมโดยใช้สารสกัดจากเหง้าขิง เนื่องจากในส่วนเหง้าของขิงมีสารกลุ่มฟลาโวนอยด์เป็นจำนวนมากและสารนี้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราการสังเคราะห์ในกระบวนการชีวสังเคราะห์ของอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ ผลจากการศึกษาพบว่าสามารถเตรียมอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากขิงได้ โดยอนุภาคที่ได้มีขนาด 30-50 นาโนเมตร (Anand Raj and Jayalakshmy, 2015) ด้วยเหตุนี้การศึกษาการผลิตอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ด้วยกระบวนการทางชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากพืชจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและมีความสำคัญสำหรับอนาคตในการอยู่ร่วมกันอย่างยั่งยืนระหว่างเทคโนโลยีและทรัพยากรธรรมชาติและมนุษย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำสารสกัดจากพืชมาใช้ในกระบวนการชีวสังเคราะห์เพื่อผลิตอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์และนำอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นสารต้านเชื้อราในผลิตภัณฑ์ควบคุมเชื้อราสาเหตุของการเน่าเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลไม้เพื่อยืดอายุการเก็บของผลไม้ให้นานขึ้นด้วยเทคโนโลยีสีเขียว

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์

ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ ตามวิธีการสุริสาและคณะ (2563) โดยใช้สารสกัดเปลือกขิงซึ่งเป็นพืชที่ส่งเสริมการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ได้สูงสุดจากการคัดเลือกสมุนไพรรวมและวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอาหาร มากกว่า 15 ชนิด (อุดมลักษณ์ และคณะ, 2564) ซึ่งเป็นพืชที่อุดมไปด้วยสารให้ประโยชน์เชิงหน้าที่โดยเฉพาะกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้สารสกัดที่ระดับความเข้มข้น 10% เติมลงในสารละลายซิงค์แอซีเตต (Zinc acetate) ที่ระดับความเข้มข้น 30 mM ที่ระดับค่าความเป็น

กรดต่างเท่ากับ 12 (pH12.0) และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2hr จากนั้นทำการตรวจวัดอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วย UV-vis spectroscopy ที่ความยาวในช่วง 200–800 nm จากนั้นนำไปแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 rpm เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อแยกตะกอนอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ออก จากนั้นนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 °C

ทดสอบประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุการเสื่อมเสียของผลไม้

ทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของราสาเหตุการเน่าเสียของผลไม้จำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus niger*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Lasiodiplodia theobromae* และ *Rhizopus stolonifer* ด้วยวิธี poison food technique (Dhingra and Sinclair, 1995) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการต้านการเจริญของเชื้อราซึ่งทำโดยการเตรียมอาหาร PDA ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C ภายใต้อากาศดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที นำสารทดสอบผสมในอาหาร PDA ที่มีอุณหภูมิ 45–50 °C ในความเข้มข้นต่างๆ ผสมให้เข้ากันแล้วเทใส่จานเพาะเชื้อที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อเรียบร้อยแล้ว ในส่วนของชุดควบคุมไม่มีการผสมสารทดสอบหลังจากผิวหน้าอาหารผสมสารสกัดพืชแห้งสนิทนำขึ้นวันที่ได้จากการใช้ Cork borer เจาะเส้นใยบริเวณรอบโคโลนีเชื้อราที่อายุ 7 วัน วางบนผิวหน้าอาหารผสมสารทดสอบโดยคว่ำให้ด้านที่มีเชื้อราอยู่ทางด้านล่าง บ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้องหรือ 25 °C ภายใต้อากาศ near ultraviolet เมื่อเชื้อราชุดควบคุมเจริญเต็มจานเพาะเชื้อจึงทำการตรวจผลโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีที่เจริญและนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการต้านการเจริญโดยใช้ตามสมการ (Equation 1)

$$\text{ร้อยละการต้านการเจริญ} = [(A - B) / A] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราบนจานเพาะเชื้อชุดควบคุม

B คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารผสมสาร

เพื่อตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคพืชก่อนนำมาทำการเสริมฤทธิ์ร่วมกับสารต้านเชื้อราทางการค้าด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วน และความเข้มข้นต่ำสุดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำยาฉีดอายุผลไม้ต่อไป

ศึกษาการเสริมฤทธิ์ร่วมกันในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์และสารต้านเชื้อรา

ศึกษาฤทธิ์ของสารกันเชื้อราทางการค้าในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

สารกันเชื้อราทางการค้า คัดเลือกสารต้านเชื้อราที่ใช้ในอาหารทางการค้าจำนวน 2 ชนิดได้แก่ โซเดียมเบนโซเอต (Sodium Benzoate) และ โซเดียมโพรพิโอเนต (Sodium Propionate) เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในสูตรร่วมกับอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมการเสื่อมเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวครั้งนี้ ทดสอบความสามารถของสารในการยับยั้งการเจริญของราสาเหตุการเน่าเสียของผลไม้จำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *A. niger*, *C. gloeosporioides*, *L. theobromae* และ *R. stolonifer* ด้วยวิธี poison food technique (Dhingra and Sinclair, 1995) เพื่อตรวจสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคพืชก่อนนำมาทำการเสริมฤทธิ์ร่วมกับสารละลายอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ สำหรับการนำไปเสริมฤทธิ์กับอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์เพื่อยับยั้งเชื้อราสาเหตุของการเน่าเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

ทดสอบประสิทธิภาพของสูตรผสมอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์และสารกันเชื้อราทางการค้า

จากนั้นทำการทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราด้วยวิธี Resazurin Microtiter Assay Plate Method (Rahman et al., 2004) โดยนำสารตัวอย่างไปตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราสาเหตุโรคพืชจำนวน 4 สายพันธุ์ โดยเปิดอาหาร Potato Dextrose broth ปริมาตร 100 μ L ใส่ลงในแต่ละหลุม จากนั้นเจือจางสารทดสอบด้วย

วิธี two-fold dilution โดยปิเปตสารทดสอบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ความเข้มข้น 100,000 µg/mL สารกันเชื้อราทางการค้าความเข้มข้น 10,000 µg/mL และสารผสมความเข้มข้น 100,000/10,000 µg/ml ปริมาตร 100 µL ใส่ลงใน microtiter plate หลุมที่หนึ่ง ผสมสารทดสอบกับอาหารเลี้ยงเชื้อให้เข้ากัน จากนั้นใช้ปิเปตดูสารผสมปริมาตร 100 µL จากหลุมที่หนึ่งใส่ลงในหลุมที่สอง ทำเช่นนี้จนกระทั่งถึงหลุมสุดท้าย จากนั้นปิเปตสารละลายเชื้อราปริมาตร 100 µL ใส่ลงในแต่ละหลุมโดยหลุมที่มีเฉพาะอาหารเลี้ยงเชื้อเป็น Positive control และหลุมที่ใส่เฉพาะเชื้อราเป็น Negative control ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 72 hr โดยอัตราส่วนผสมและระดับความเข้มข้นของสารที่ให้ผลในการยับยั้งเชื้อสูงจะถูกเลือกเพื่อผสมกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้ยับยั้งเชื้อราสาเหตุของการเน่าเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวการเสื่อมเสียของมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยวต่อไป

ผลและวิจารณ์การทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีสีเขียวในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุการเสื่อมเสียของผลไม้จำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *A. niger*, *C. gloeosporioides*, *L. theobromae* และ *R. stolonifer* ด้วยวิธี poison food technique (Dhingra and Sinclair, 1995) ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน พบว่ามีแนวโน้มในการยับยั้งเชื้อราทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารให้สูงขึ้นจะส่งผลให้แนวโน้มในการยับยั้งเชื้อราสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มในการยับยั้งเชื้อรา *R. stolonifera* ได้สูงที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเท่ากับ $87.62 \pm 1.90\%$ และที่ระดับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เดียวกันสามารถยับยั้งเชื้อรา *C. gloeosporioides*, *L. theobromae* และ *A. niger* เท่ากับ $77.77 \pm 2.38\%$, $65.18 \pm 2.96\%$ และ $24.32 \pm 0.82\%$ ตามลำดับโดยแสดงดัง Table 1

Table 1 The Efficacy of ZnONPs on the growth of fungi causing postharvest decay of fruit.

Concentration (ppm)	Inhibition Percentage (%)			
	A	C	L	R
1000	12.98±1.23	48.65±2.53	43.10±1.54	69.23±2.78
2000	13.14±1.27	67.49±2.06	48.28±1.71	74.36±2.79
3000	16.91±1.53	72.83±2.81	57.14±3.65	85.13±1.87
4000	24.32±0.82	77.77±2.38	65.18±2.96	87.62±1.90

*Means A; *A. niger*, C; *C. gloeosporioides*, L; *L. theobromae*, R; *R. stolonifer*

โดยพบว่ากลไกในการต้านเชื้อราของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นเกี่ยวกับ ROS (Reactive oxygen species) ของอนุภาคนาโนของนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนสามารถดูดซับบนผนังเซลล์ของเชื้อราแล้วแทรกผ่านเข้าสู่เซลล์โดยการขนส่งหรือเอนโดไซโทซิสและเมื่ออนุภาคนาโนสัมผัสกับไซโตพลาสซึมซึ่งอาจส่งผลต่อการทำงานของไมโทคอนเดรีย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการผลิต ROS โดย ROS และ Zn^{2+} ที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์อาจทำให้เกิดความเสียหายทางชีวภาพที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้และสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับการแสดงออกของยีนที่สำคัญบางตัว (Oehlke et al., 2014; Sun et al., 2018) จากผลการทดสอบเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการชีวภาพจากเปลือกส้มจึงมีความสามารถในการต้านเชื้อราสาเหตุการเน่าเสียของผลไม้ที่ทำการทดสอบจึงมีความน่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุการเน่าเสียให้สูงขึ้น โดยทำการเสริมฤทธิ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยสารกันเชื้อราสูตรผสมทางการค้า (Sodium Benzoate

:Sodium Proionate) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อรา สำหรับการนำไปใช้เป็นสารต้านเชื้อราเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

ผลการศึกษาศรีมฤทธิร่วมกันในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซึ่งคอกโซลด์และสารต้านเชื้อรา

ผลการศึกษาฤทธิ์ของสารกันเชื้อราทางการค้าในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

จากการคัดเลือกสารต้านเชื้อราที่ใช้ในอาหารทางการค้าจำนวน 2 ชนิด ที่มีความปลอดภัยและอนุญาตให้ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่โซเดียมเบนโซเอต (Sodium Benzoate) และ โซเดียมโพรพิโอเนต (Sodium Propionate) ซึ่งโซเดียมเบนโซเอต, แคลเซียมโพรพิโอเนตและโพแทสเซียมซอร์เบตมีสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ดี (Stopforth JD, 2005) โดยโพแทสเซียมซอร์เบตมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราและยีสต์ โดยมีรายงานว่าโพแทสเซียมซอร์เบตมีประสิทธิภาพในการควบคุมการเจริญของเชื้อราในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเช่น *Penicillium Digitatum* ในผลไม้ตระกูลส้ม (Smilanick JL, 2008) โซเดียมเบนโซเอตมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราหลายชนิดได้แก่ *P. Digitatum* และ *Penicillium Italicum* (Valencia-Chamorro SA, 2009) กรดโพรพิโอนิกและเกลือของกรดโพรพิโอนิกนิยมใช้เป็นสารต้านการเจริญของเชื้อราในขนมปัง เค้ก เนยแข็งบางชนิดและ อาหารชนิดอื่นๆ และตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขสามารถใช้ในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับอาหารประเภทผักหรือผลไม้ (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข, 2561) และทำการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุการเสื่อมเสียของผลไม้จำนวน 4 สายพันธุ์ ด้วยวิธีpoison food technique พบว่าสารต้านเชื้อราที่ใช้ในอาหารทางการค้าทั้ง 2 ชนิด สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อได้แตกต่างกันและพบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารให้สูงขึ้นจะส่งผลต่อเชื้อสูงขึ้นด้วย โดยสารต้านเชื้อราโซเดียมเบนโซเอตสามารถยับยั้งเชื้อรา *A. niger* ได้ดีที่สุด โดยที่ระดับความเข้มข้นสูงสุดที่ทำการทดสอบคือ 4,000 ppm สารโซเดียมเบนโซเอตสามารถต้านเชื้อรา *A. niger* ได้ 100% รองลงมาคือ เชื้อ *R. stolonifer*, *L. theobromae* และ *C. gloeosporioides* ที่มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเท่ากับ 82.56±4.19%, 53.01±1.09% และ 35.71±0% ตามลำดับ สำหรับสารโซเดียมโพรพิโอเนตพบว่ามีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *R. stolonifer* ได้สูงที่สุดคือ 81.07±0.97% ในระดับความเข้มข้นของสาร 4,000 ppm รองลงมาได้แก่ *L. theobromae*, *A. niger* และ *C. gloeosporioides* ที่มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเท่ากับ 75.05±0.49%, 39.65±1.21% และ 4.29±0.38% ตามลำดับดังแสดงใน Table 2

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า สารกันเชื้อราทางการค้าในอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 2 ชนิด มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นสูตรผสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมเชื้อราสาเหตุการเสื่อมเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวที่มีสาเหตุมาจากเชื้อราที่ทำการทดสอบทั้ง 4 สายพันธุ์ ทั้งนี้เนื่องจากสารกันราทั้งสองชนิดสามารถยับยั้งสายพันธุ์เชื้อราที่ทดสอบได้ต่างกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเชื้อราที่ทำการทดสอบได้ทั้ง 4 สายพันธุ์ ที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm ระหว่าง 4.29–100% จึงมีความน่าสนใจที่จะนำเอาสารกันเชื้อราทั้งสองชนิดนี้มาผสมกัน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อรา

Table 2 The Efficacy of commercial antifungal agents on the growth of fungi causing postharvest decay of fruit.

Concentration (ppm)	Inhibition Percentage (%)							
	Sodium Benzoate				Sodium Propionate			
	A	C	L	R	A	C	L	R
1000	1.05±0.05	16.80±0.71	47.72±2.68	40.83±1.07	20.17±1.55	0±0	36.92±1.07	59.44±2.19
2000	74.19±1.86	22.86±1.43	47.34±2.49	43.83±1.31	32.01±1.23	0±0	49.56±3.02	78.68±1.16
3000	100±0	30.57±0.78	52.51±3.76	55.24±3.18	35.83±0.69	1.14±0	50.44±3.18	79.28±1.15
4000	100±0	35.71±0	53.01±1.09	82.56±4.19	39.65±1.21	4.29±0.38	75.05±0.49	81.07±0.97

*Means A; *A. niger*, C; *C. gloeosporioides*, L; *L. theobromae*, R; *R. stolonifera*

ทดสอบประสิทธิภาพของสูตรผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสารกันเชื้อราทางการค้า

นำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาสร้างสูตรผสมกับสารกันเชื้อราทางการค้าในอัตราส่วนที่ต่างกัน 3 ระดับ ดังนี้

ZnONPs	(Sodium Benzoate+Sodium Propionate)
10	0
5	5
0	10

เตรียมสารให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100,000 50,000 และ 10,000 μ g/mL สำหรับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์, สารกันราและสูตรผสมตามลำดับ ทำการทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราด้วยวิธี Resazurin Microtiter Assay Plate Method กับเชื้อราสาเหตุโรคพืชจำนวน 4 สายพันธุ์ได้แก่ *A. niger*, *C. gloeosporioides*, *L. theobromae* และ *R. stolonifer* พบว่าค่า MICs ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราทั้ง 4 สายพันธุ์มีค่าอยู่ในช่วง 195.31–3,125 μ g/mL และค่า MICs ของสารกันเชื้อราทางการค้าสูตรผสมมีระดับค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อราอยู่ระหว่าง 156.25–2,500 μ g/mL และสูตรผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสารกันเชื้อราทางการค้ามีค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อรา (MICs) อยู่ระหว่าง 48.82–781.25 μ g/mL ดังแสดงใน Table 3 และ Fig. 1

Table 3 Minimal inhibitory concentration of fungal ZnONPs and commercial antifungal agents and their combinations against the tested fungi.

ZnONPs	Ratio		Minimum inhibitory concentration (μ g/mL)			
	antifungal agents		<i>A. niger</i>	<i>C. gloeosporioides</i>	<i>L. theobromae</i>	<i>R. stolonifer</i>
10	0		6,250	781.25	390.62	390.62
5	5		1,562.50	390	97.65	195.31
0	10		2,500	2,500	312.5	625

* The experiment was replicated 3 times.

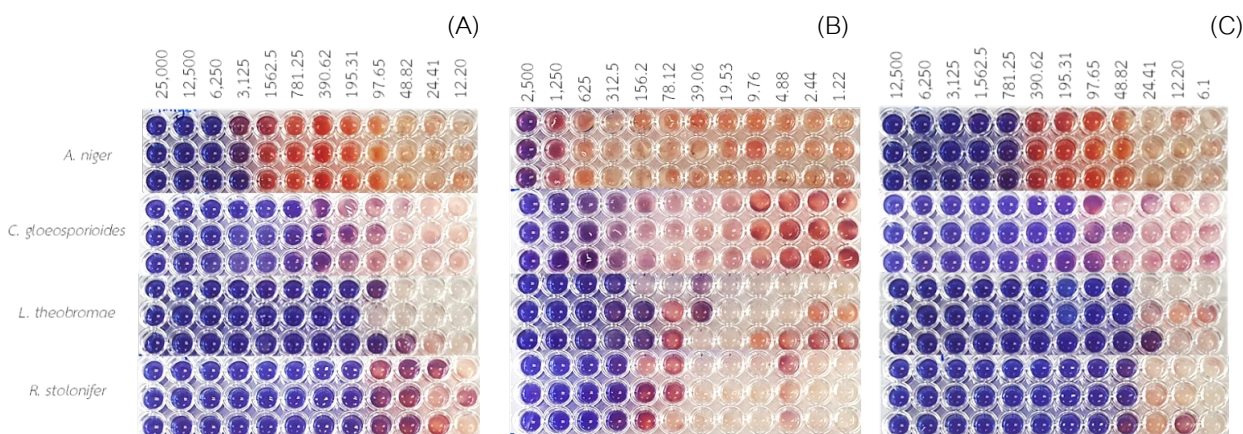


Fig. 1 MIC of synthesized ZnONPs (A), antifungal agent (B) and mixture solution (C) against fungal pathogens causing postharvest decay.

ค่า MICs ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อราทั้ง 4 สายพันธุ์อยู่ในช่วง 390.62–6,250 μ g/mL โดยค่า MICs ของสารกันเชื้อราทางการค้าสูตรผสมมีระดับค่าความเข้มข้นต่ำสุดอยู่ระหว่าง 312.5–2,500 μ g/mL และสูตรผสมในอัตราส่วน 5:5 ระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสูตรผสมสารกันเชื้อราทางการค้ามีค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อรา (MICs) อยู่ระหว่าง 97.65–1,562.50 μ g/mL ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Minimal fungicidal concentration of biocontrol solutions on the growth of fungi causing postharvest decay.

Ratios		Minimum fungicidal concentration ($\mu\text{g/mL}$)			
ZnONPs	antifungal agents	<i>A. niger</i>	<i>C. gloeosporioides</i>	<i>L. theobromae</i>	<i>R. stolonifer</i>
10	0	3,125	781.25	195.31	195.31
5	5	781.25	195.31	48.82	97.65
0	10	2,500	1,250	156.25	312.5

* The experiment was replicated 3 times.

จากผลการทดลองข้างต้นบ่งชี้ว่าสูตรผสมของสารระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสารกันเชื้อราทางการค้า มีแนวโน้มในการยับยั้งเชื้อราที่ทำการทดสอบทุกสายพันธุ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารเพียงชนิดเดียวเช่น อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสารกันเชื้อรา โดยค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อรา *A. niger*, *C. gloeosporioides*, *L. theobromae* และ *R. stolonifer* ของสูตรผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสารกันเชื้อราทางการค้ามีค่าลดลงจาก 6,250, 781.2, 390.62 และ 390.62 $\mu\text{g/mL}$ ตามลำดับเหลือเพียง 1,562.50, 390, 97.65 และ 195.3 $\mu\text{g/mL}$ ตามลำดับและเมื่อพิจารณาถึงดัชนีชี้วัดที่เรียกว่า Fractional Inhibitory Concentration Index ($\text{FIC}_{\text{Index}}$) คือ ค่าที่ใช้บอกประสิทธิภาพรวมเมื่อใช้สารร่วมทำปฏิกิริยากัน ซึ่งได้จากการนำค่า MICs มาทำการคำนวณและแปลผล โดยเมื่อค่า $\text{FIC}_{\text{Index}}$ มีค่าน้อยกว่า 1 หมายถึงสารที่ผสมเสริมฤทธิ์กัน (Synergistic) มีค่าเท่ากับ 1 คือสารที่ผสมมีแนวโน้มเสริมฤทธิ์ (Additive) และมีค่ามากกว่า 1 หมายถึงสารที่ผสมมีฤทธิ์ต้านกัน (Antagonistic) ดังแสดงใน Table 5

Table 5 The synergistic effect of ZnONPs with commercial antifungal agents against fungi causing postharvest decay.

Ratios		Fractional Inhibitory Concentration (FIC index)			
ZnONPs	antifungal agents	<i>A. niger</i>	<i>C. gloeosporioides</i>	<i>L. theobromae</i>	<i>R. stolonifer</i>
10	0	1.00	1.00	1.00	1.00
5	5	0.28	0.20	0.28	0.41
0	10	1.00	1.00	1.00	1.00

The experiment was replicated 3 times.

จากการศึกษาพบว่า ค่า $\text{FIC}_{\text{Index}}$ ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสารกันเชื้อราทางการค้าและสูตรผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารกันเชื้อราทางการค้าในอัตราส่วนต่างๆการต้านเชื้อราทั้ง 4 สายพันธุ์มีค่าระหว่าง 0.20-1.00 แสดงให้เห็นว่าสูตรผสมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารกันเชื้อราทางการค้ามีแนวโน้มการเสริมฤทธิ์กัน โดยแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของเชื้อรา มีเพียงสูตรผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารกันเชื้อราทางการค้าในอัตราส่วน 5:5 ที่มีการเสริมฤทธิ์กัน (Synergistic) อย่างเห็นได้ชัดซึ่งจากผลการทดลองไม่มีความเข้มข้นใดที่ต้านฤทธิ์กัน (Antagonistic) ในการต้านการเจริญของเชื้อราที่ทำการทดสอบทุกสายพันธุ์ และผลการทดลองแตกต่างจากการใช้สารเพียงชนิดเดียวคือ อนุภาคซิงค์ขนาดนาโนหรือสารกันเชื้อราทางการค้าเพียงชนิดเดียว ซึ่งผลการยับยั้งที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากสารสกัดดอก *Trifolium pratense* ที่พบว่า สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ดี และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการผลิตมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* ได้ดีกว่ายา gentamicin และยังสามารถยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus aureus* และเชื้อ *Escherichia coli* ได้ดี (Dobrucka and Dugaszewski, 2016)

สรุป

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีสีเขียวโดยใช้สารสกัดจากเปลือกถั่วลิสงที่ซึ่งเปลือกผลไม้เป็นแหล่งสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติที่ประกอบไปด้วย สารประกอบพอลิฟีนอล (polyphenolic compound) เช่น แทนนิน (tannin) สารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราโรคพืชทั้ง 4 สายพันธุ์ได้แก่ *A. niger*, *C. gloeosporioides*, *L. theobromae* และ *R. stolonifer* โดยมีค่า MIC 195.31–3,125 µg/mL และเมื่อทำการศึกษากิจกรรมเสริมฤทธิ์ร่วมกันระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารกันเชื้อราสูตรผสมทางการค้าพบว่าสูตรผสมในอัตราส่วน 5:5 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราที่ทดสอบได้ดีที่สุด โดยมีค่า MICs ลดลงเหลือเท่ากับ 48.82–781.25 µg/mL จากผลการทดลองข้างต้นบ่งชี้ว่า สูตรผสมของสารระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และสารกันเชื้อราทางการค้ามีแนวโน้มในการยับยั้งเชื้อราที่ทำการทดสอบทุกสายพันธุ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสารเพียงชนิดเดียวและมีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้เป็นสารออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อราในสูตรน้ำยาควบคุมการเสื่อมเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2560-2561

เอกสารอ้างอิง

- พิชญ์สินี สมชัยดี, การะเกด เทศศรี. 2561. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: 777–791. doi: 10.14456/tstj.2019.62.
- สุริสา สากยโรจน์, ประภัสสร รักถาวร, อุดมลักษณ์ สุขอืดตะ, เกสรี่ กลิ่นสุคนธ์, ลลิตา คชรัตน์, ณัฐภรณ์ เปรสสันเทียะ, ทิพาพร ทองคำ. 2563. ศักยภาพของสารสกัดเปลือกถั่วลิสงเพื่อใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคโนโลยีสีเขียว. ใน: รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 664–671.
- อุดมลักษณ์ สุขอืดตะ, ประภัสสร รักถาวร, ลลิตา คชรัตน์, เกสรี่ กลิ่นสุคนธ์. 2564. การผลิตอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์จากสารสกัดสมุนไพรและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ควบคุมเชื้อราสาเหตุของการเน่าเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลไม้. รายงานวิจัยโครงการบูรณาการวิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2561.
- Dobrucka, R., Dugaszewska, J. 2016. Biosynthesis and antibacterial activity of ZnO nanoparticles using *Trifolium pratense* flower extract. Saudi J. Biol. Sci. 23: 517–523.
- Mittal, A.K., Chisti, Y., Banerjee, U.C. 2013. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. Biotechnol. Adv. 31: 346–356.
- Oehlke, K., Adamiuk, M., Behnlian, D., Gräf, V., Mayer-Miebach, E., Walz E., Greiner, R. 2014. Potential bioavailability enhancement of bioactive compounds using food-grade engineered nanomaterials: A review of the existing evidence. Food Funct. 5: 1341–1359.
- Rahman, M., Kuhn, I., Rahman, M., Olsson-Liljequist, B., Mollby, R. 2004. Evaluation of a scanner-assisted colorimetric MIC method for susceptibility testing of gram-negative fermentative bacteria. Appl. Environ. Microbiol. 70: 2398–2403.
- Sinclair, J.B., Dhingra, O.D. 1995. Basic Plant Pathology Method. CRS Press, Inc. Boca Raton, Florida, pp. 355
- Sun, Q., Li, J., Le, T. 2018. Zinc oxide nanoparticle as a novel class of antifungal agents: Current advances and future perspectives. J. Agric. Food Chem. 66: 11209–11220.

Influence of pH, autolysis time and temperature on meaty volatile compounds formation of yeast autolysate

Songpun Surasieng^a, Wanee Jirapakkul^{a,*}, Sumallika Morakul^b

^aDepartment of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bDepartment of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wanee.ch@ku.ac.th

Abstract

Meaty flavors produced from non-animal source is a market demand to the growth of the food products. The objectives of this research were effect of pH, autolysis time and temperature on meaty aroma compounds formation of yeast autolysate (YA). Heating suspension of dried yeast cell at different conditions of 50 °C and 60°C at pH 3.0, 4.0 and 5.0. The optimum temperature and pH of autolysis was 50 °C at pH 3.0 which gave the highest autolysate yield (52.00±0.11% w/w). Protein contents of autolysate during 16-26 hours were measured by Lowry's method. The highest protein content was 1.34 mg/mL at 50 °C for 24hr at pH 3.0. Aroma volatile compounds was characterized through headspace-solid phase micro-extraction gas chromatography-time of flight mass spectrometry (HS-SPME-GC-ToFMS). Meaty volatile compounds are generated through Maillard reaction in three stages of yeast autolysate production. 2,5-dimethyl pyrazine (roasted beef), dimethyl trisulfide (sulfurous, meaty), furfural (bread) were the major volatile compounds related to cooked meat flavor. The best condition for dried yeast autolysate (180 °C) produced sulfur and nitrogen containing compounds such as dimethyl trisulfide. The information about volatile characterization of YA could benefit the food and flavor industry involved in the manufacturing of meaty flavorings for non-animal origin products.

Keywords: Autolysis, GC-ToFMS, Meaty volatile compounds, Thermal treatment, Yeast autolysate

Introduction

Yeasts are one of the most important microorganisms widely used in the food industry. The value-added products from yeast are also widely used all over the world. Yeast extracts and autolyzed yeast extracts are categorically declared as GRAS (generally recognized as safe) by the Food and Drug Administration (FDA). Consumers accept them as a naturally derived product, and they also are inexpensive.

The rise in demand for meat flavoring agents has been attributed to the growth of the food industry. Izzo and Ho (1991) investigated flavor compounds of yeast extract without adding beef protein hydrolysate and animal lipids. Heating is used to prepare the autolyzed yeast extract. It is a cost-effective and environmentally friendly use of resources to lower the cost of meat flavoring production. It also encourages the development of meat flavoring agent from yeast.

Yeast extract (YE) is a natural flavoring agent obtained by extracting the liquid in yeast cells from *Saccharomyces cerevisiae* by hydrolysis. Hough and Maddox (1970) described yeast autolysate (YA) as a form of yeast extract obtained by autolysis of yeast cells. It's a cell-based substance that breaks down soluble proteins and cell walls. The cell wall-removed product, which contains 50% of the total soluble solid, is known as autolyzed yeast.

Typically, the Maillard reaction products result from a complex reaction involving amino acids and reducing sugars, resulting in a significant alteration in the overall flavor profile of food systems. This reaction is widely regarded as the primary cause of many heat-treated food products' characteristic odorants. Roasted meat, coffee, cocoa, beef-like, and other odorants are all associated to Maillard reaction products. During the manufacturing of yeast autolysate (enzymatic hydrolysis, concentration, spray-drying, etc.), Maillard reaction occurs and impacts the odor and taste of yeast autolysate (Alim et al., 2018).

Until now, to our knowledge, little information is available concerning meaty volatile compounds generated in yeast autolysis production steps was reported. The objective of this research was to study the effect of autolysis pH, time, and temperature on meaty volatile compounds formation of YA during the production stages. This result will provide useful information for the quality control of the processing of YA liquid and powder related to meaty aroma compounds.

Materials and Methods

Determination of autolysate yield

Autolysis was performed in sterilized 1L glass beaker in triplicate. Sixty grams of super alcohol active dry yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) were rehydrated in 0.6 L of deionized water at a temperature of 37 °C for 30 minutes. The pH levels were adjusted to 3.0, 4.0 and 5.0 with 1N HCl. Autolysis was carried out at controlled temperature of 50 °C and 60 °C in a water bath. All experiment were conducted with 3 replications. During autolysis, samples were harvested at 24 hours, pasteurized at 80°C for 30 min then cooled down to room temperature and finally, centrifuged at 6500 x g for 10 min at 4 °C for chemical analysis of the supernatant.

The supernatant and precipitate of yeast autolysate were dried in a hot-air oven at $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ until constant weight. The autolysate yield was determined using the method of Hill (1981). The autolysate yield was determined according to Equation 1:

$$\% \text{ autolysate yield} = \frac{\text{dry weight of liquid supernatant (g)}}{\text{dry weight of liquid supernatant (g)} + \text{dry weight of solid precipitate (g)}} \times 100 \quad (1)$$

The experiment involving autolysis of brewer's dried yeast was divided into two treatments: treatment 1, studied autolysis pH (3.0, 4.0 and 5.0 respectively) and temperature (50°C and 60°C) which could give the highest autolysate yield; and treatment 2, studied autolysis reaction time (16–26 hours) which could give the highest protein content.

Determination of protein content

The optimal autolysis condition (pH and temperature) for producing yeast autolysate was selected from previous experiment which could give the highest autolysate yield. During autolysis duration at pH 3.0 and 5.0, samples were harvested at 16, 18, 20, 22, 24 and 26 hours, pasteurized at 80°C for 30 min then cooled down to room temperature and finally, centrifuged at $6500 \times g$ for 10 min at 4°C for chemical analysis of the supernatant. The total crude protein content was determined using the method of Lowry et al. (1951). Bovine serum albumin was used as standard of this experiment.

Production of yeast autolysate

The autolysis of brewer's dried yeast to produce yeast autolysate liquid and powder was carried out at 50°C for 24 hr by using water bath (Mettler, Germany). The process was terminated by heating at 80°C for 30 min and then cooled down. The suspension was centrifuged to remove the cell debris. The test was carried out in triplicate at the same conditions. The sample was placed in autoclave (Hirayama, Japan) and let it react at 120°C for 1 hr. The sample was concentrated to 15% solids content by using rotary evaporator R-300 (Buchi, Switzerland). The concentrated was added 10% w/v of Arabic gum then spray dried with mini spray-drier B-290 (Buchi, Switzerland) using an inlet air temperature of $180\text{--}190^{\circ}\text{C}$, an outlet air temperature of $100\text{--}105^{\circ}\text{C}$, a feeding rate of 30 mL/min (Tanguler and Erten, 2008). The resulting powder was stored in an aluminium foil bag at 4°C .

Determination of volatile components

Volatile compounds were determined based on the method of Alim et al. (2018). Three gram of the homogenized sample and 5 μL internal standard (2-methyl-3-heptanone) were placed into a 20 mL glass vial, capped with a Silicone-PTFE septum, and transferred into a CTC SPME Autosampler (CTC Analytics AG, Zwingen, Switzerland). The SPME fibers (a 50/30 μm DVB/CacboxenTM/PDMS StableFlexTM, Supelco: 57329-U)

were exposed to the headspace of the vial for 60 min at 55 °C and the volatiles were desorbed in the injection port of the gas chromatography for 5 min at 250 °C in split-less mode. An empty vial was used as a blank sampler to clean the column and the fiber before each sampler run.

The analysis of volatiles were analyzed using Gas Chromatography (7890A; Agilent Technologies, USA) equipped with a time-of-flight mass spectrometry detector (Pegasus 4D, LECO Corp., USA). Separation of compounds was performed on polar StabilWax capillary column with polyethylene glycol stationary phase (0.25 mm I.D. × 30 m × 0.25 µm film thickness; Restek Corp., USA). Helium was used as the carrier gas at a flow rate of 1.0 mL/min. The oven temperature was programmed to start from 35 °C, held for 10 min, ramped at 4 °C/min up to 225 °C, and held for 10 min. Volatile compounds were identified comparing their mass spectra with references from several libraries databases.

Results and Discussions

Autolysate yield

After autolysis at 50 °C for 24 hours, the amounts of autolysate yield at pH 3.0, pH 4.0 and pH 5.0 were 52.00±0.11% w/w, 36.00±0.23% w/w, and 49.57±0.92% w/w respectively. For autolysis at 60 °C for 24 hours, the amounts of autolysate yield at pH 3.0, pH 4.0 and pH 5.0 were 25.30±0.37% w/w, 17.63±0.92% w/w, and 23.54±0.28% w/w respectively. YA under 50 °C at autolysis pH 3.0, 4.0, and 5.0 could give autolysate yield in the range of 36–52% w/w, which higher than 60 °C. While yeast was autolyzed at pH 3.0, 50°C could give the highest autolysate yield (52.00±0.11% w/w).

Protein content during autolysis

The influence of pH and autolysis duration on protein content is given in Fig 1. Protein content was affected by autolysis pH and time. The concentration of protein released into liquid yeast autolysate from cells during autolysis at pH 3 considerably increased by 24 hr of incubation when the process was performed at temperature of 50 °C. After 24 hr there was no appreciable increase at pH 5 of yeast autolysate. Therefore, 24 hr was used as autolysis time in this study. The highest protein contents were obtained as 1.34 mg/mL at pH 3 for 24 hr of autolysis and as 1.12 mg/mL at pH 5 for 16 hr of autolysis. According to pI of yeast protein is 6.91 (Kozłowski, 2016), so pH 3 is the suitable pH for yeast autolysis. The further the pH from the pI, the higher the soluble protein content. Soluble proteins are important because they are non-volatile compounds that act as precursors to the formation of meat-like flavor, which are ultimately volatile compounds. Moreover, lower pH value also creates a reducing environment to release H₂S, thus, stimulating the formation of sulphur-containing volatile compounds specifically related to meaty odors (Ajandouz et al., 2008).

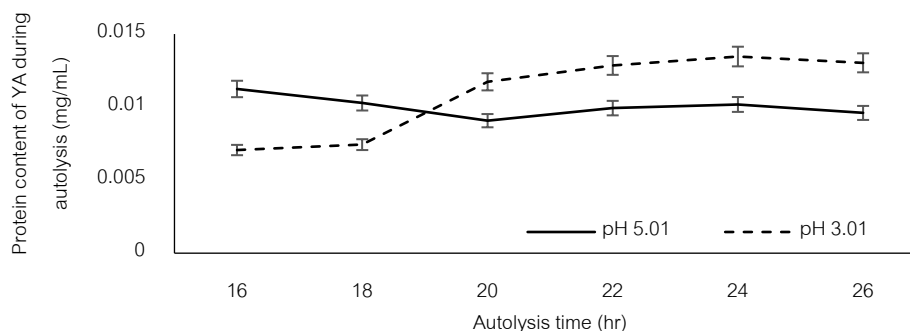


Fig.1 The influence of autolysis duration on protein content of yeast autolysate

Meaty volatile compounds

A total number of 5 meaty volatile compounds were identified in non-thermally treated YA sample by head space-solid phase micro-extraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography time-of-flight mass spectrometry (GC-ToFMS). The retention indices, odor descriptions, and other chromatographic information enlisted in Table 2. It contained the highest relative concentration of meaty aroma compounds which are acetic acid (sour), furfural (bread, almond, sweet) and butanoic acid (cheesy) respectively. It can be seen that YA sample before heating is exhibited little pyrazines and high amount of acetic acid (12.5 $\mu\text{g/L}$).

Pyrazines are the characteristic products of Maillard reaction products (MRPs) which are volatile substances and mostly produce during heat processing (Wang et al., 2021). Table 2, show a total of 10 kinds of detected meaty volatile compounds from non-thermally treated, thermally treated and dried YA by HS-SPME. The following volatile compounds were identified in YA samples, including four pyrazines: trimethylpyrazine (roasted, potato, must), 2,5-dimethylpyrazine (roasted beef), 2,6-dimethylpyrazine (roasted nut), 2-ethyl-3-methylpyrazine (roasted); two furan derivative: 2,5-dimethylfuran (meaty, roasted beef), furfural (bread, almond, sweet); two aldehydes: 2-methylbutanal (cocoa), 3-methylbutanal (chocolate); two sulfur volatile compounds: dimethyl disulfide (onion, cabbage, putrid) and dimethyl trisulfide (sulfurous, meaty). Among them, furan derivatives are Maillard reaction products. Pyrazines are Strecker degradation products of dicarbonyl compounds and amino acids. 2-methylbutanal, 3-methylbutanal are typical Strecker aldehydes derived from Leu, Ile, and Met respectively. While sulfides, such as dimethyl disulfide, dimethyl trisulfide, are derivatives of methional (methional is degraded to H_2S , then sulfide like dimethyl disulfide is formed from H_2S) (Raza et al., 2020). It revealed that some volatile compounds may be from peptide degradation.

The Strecker degradation is a very important step of Maillard reaction, it is mainly responsible for the production of Strecker aldehydes and 2-aminocarbonyl compounds (Yaylayan, 2003). The present study has recorded 4 pyrazines in dried YA samples, these includes, 2,5-dimethylpyrazine, 2,6-dimethylpyrazine, 2-ethyl-3-methylpyrazine, and trimethylpyrazine. Researchers also claimed that the responsible factors for the production of amino-specific pyrazines are actually dihydropyrazines which were formed through the condensation reaction between two α -aminocarbonyl compounds and the Strecker aldehyde product from the amino group.

Table 2 Selected volatile compounds with relate to meaty flavor during production stages of yeast autolysate (YA) analyzed through HS-SPME-GC-ToFMS.

Aroma compounds	M.W. ^a	Identifi- Cation	C.F. ^b	CAS no.	RI WAX ^c	Odor description ^d	Relative concentration ^e (µg/Kg)		
							Non-thermally treated YA ^f	Thermally treated YA ^f	Dried YA ^f
2-methylbutanal	86.1323	RI, MS	C ₅ H ₁₀ O	96-17-3	904	Cocoa	0.03±0.02	2.32±2.37	38.38 ±11.36
3-methylbutanal	86.1323	RI, MS	C ₅ H ₁₀ O	590-86-3	909	Chocolate	0.02±0.00	17.93±8.46	209.04 ±68.76
Dimethyl disulfide	94.20	RI, MS	C ₂ H ₆ S ₂	624-92-0	1063	Onion, cabbage, putrid	0.00±0.00	0.01±0.01	0.52 ±0.44
Dimethyl trisulfide	126.264	RI, MS	C ₂ H ₆ S ₃	3658-80-8	1355	Sulfurous, meaty	0.00±0.00	0.70±0.41	0.21 ±0.20
2,5-Dimethyl- Furan	96.1271	RI, MS	C ₆ H ₈ O	625-86-5	1288	Meaty, roasted beef	0.00±0.00	0.00±0.00	0.05 ±0.00
Trimethyl- pyrazine	122.1677	RI, MS	C ₇ H ₁₀ N ₂	14667-55-1	1388	Roasted, potato, must	0.07±0.06	0.03±0.02	0.00 ±0.00
2,5-Dimethyl- Pyrazine	108.1411	RI, MS	C ₆ H ₈ N ₂	123-32-0	1308	Roasted beef	0.03±0.03	0.00±0.00	0.11 ±0.10
2,6-Dimethyl- Pyrazine	108.1411	RI, MS	C ₆ H ₈ N	108-50-9	1314	Roasted nut	0.00±0.00	0.00±0.00	0.06 ±0.00
2-Ethyl-3- methyl-Pyrazine	122.1677	RI, MS	C ₇ H ₁₀ N ₂	15707-23-0	1383	Roasted	0.00±0.00	0.00±0.00	0.03 ±0.00
Furfural	96.084	RI, MS	C ₅ H ₄ O ₂	98-01-1	1452	Bread, almond, sweet	0.64±0.17	308.87 ±292.15	92.81 ±2.47

^a Represents the molecular weight of aroma compounds.

^b Represents the chemical formula of aroma compounds.

^c Retention index of volatile compounds were calculated with n-alkanes mixture on a polar StabilWax column.

^d The odor property of a volatile compound was confirmed through online data bases; <http://flavornet.org>, www.thegoodscentscompany.com.

^e Relative concentration was calculated from concentration of internal standard (2-methyl-3-heptanone).

^f Non-thermally treated YA = YA at 25°C without thermal treatment; thermally treated YA = YA with thermal treatment at 120 °C for 1 hour; dried YA = YA after thermal treatment at 120°C for 1 hour and then spray drying at inlet air temperature of 180 °C. All experiments performed in the table were conducted with three replications.

Pyrazines were generated in this experiment at thermal treatment temperature of 120°C and drying temperature of 180°C. Pyrazines is a chemical group which mostly generate after thermal reaction. A non-volatile substance such as peptides are nitrogen sources for Maillard reaction and can promote the formation of nitrogen-containing heterocyclic compounds such as pyrazines which are considered as the main volatile products from

the Maillard reaction of peptides (Alim et al., 2018). With the increase in temperature, odor characteristics like meaty and roasted became more intense, when temperature reached 180°C, roasted, sweet and sulfurous odors were becoming predominant and stronger than other odors. As a result of the greater temperature of spray drying, various meaty aroma molecules are formed.

Conclusion

Among the experiments, autolysis at 50°C for 24 hr at pH 3.0 was desirable condition in terms of autolysate yield and protein content. The highest levels of autolysate yield and protein content were 52.00±0.11% w/w and 1.34 mg/mL, respectively. Therefore, yeast autolysate was produced at those conditions for aroma compounds analysis. After the treatment of YA, it was observed that some volatile compounds such as dimethyl disulfide, dimethyl trisulfide, 2,5-dimethylpyrazine, 2,6-dimethylpyrazine, trimethylpyrazine, 2-ethyl-3-methylpyrazine, 2-ethyl-5-methylpyrazine, furfural, 2,5-dimethylfuran were identified in YA samples in this study. Dried YA samples were shown the highest kinds and the concentration of volatile compounds. The GC-ToFMS analysis confirmed that the nitrogen and sulfur-containing volatile compounds were the main aroma compounds responsible for the meaty aroma of thermally treated products. The information about volatile characterization of YA could benefit the food and flavor industry involved in the manufacturing of meaty flavorings for non-animal origin products.

Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This project was funded by National Research Council of Thailand (380/2563). The authors gratefully acknowledge Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Thailand for instrumental support of this project.

References

- Ajandouz, E.H., Desseaux, V., Tazi, S., Puigserver, A. 2008. Effects of temperature and pH on the kinetics of caramelisation, protein cross-linking and Maillard reactions in aqueous model systems. *Food Chem.* 107: 1244–1252. doi :10.1016/j.foodchem.2007.09.062
- Alim, A., Song, H., Liu, Y., Zou, T., Zhang, Y., Zhang, S. 2018. Flavour-active compounds in thermally treated yeast extracts. *J. Sci Food Agri.* 98: 3774–3783.
- Hofmann, T., Schieberle P. 1995. Evaluation of the key odorants in a thermally treated solution of ribose and cysteine by aroma extract dilution techniques. *J. Agric. Food Chem.* 43: 2187–2194.
- Hough, J.S., Maddox I.S. 1970. Yeast autolysis. *J. Process Biochem.* 5: 50–52

- Kozlowski, L.P. 2016. Proteome-pl: proteome isoelectric point database. *J. Nucleic Acids Res.* 45: 1112–1116. doi.org/10.1093/nar/gkw978
- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., Randall, R.J. 1951. Protein measurement with the folin phenolreagent. *J. Biol. Chem.* 193: 265–275.
- Raza, A., Song, H., Raza, J., Li, P., Li, K., Yao, J. 2020. Formation of beef-like odorants from glutathione enriched yeast extract via Maillard reaction. *J. Food Funct.* 9.
- Wang, F., Shen, H., Liu, T., Yang, X., Yang, Y., Guo, Y. 2021. Formation of Pyrazines in Maillard Model Systems : Effects of Structures of Lysine-Containing Dipeptides/Tripeptides. *J. Food.* 10: 9–12.
- Yaylayan, V.A. 2003. Recent advances in the chemistry of Strecker degradation and Amadori rearrangement : Implications to aroma and color formation. *J. Food Sci. Technol.* 9: 1–6.

Dietary to acrylamide exposure from instant noodles to Thai population

Arati Kokabthong, Kanithaporn Vangnai*

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kanithaporn.v@ku.th

Abstract

Instant noodles have gained popularity to become one of the most starchy foods world-wide with reasonable prices and easy preparation. The noodles are initially cooked by steaming, further cooked by frying or baking, and then dehydrated. Heat treatment during cooking could result in the formation of carcinogenic acrylamide. This study aims to monitor the content of acrylamide in 20 instant noodles available in Thai market (10 domestic samples and 10 imported samples). Dietary exposure to acrylamide from instant noodles to Thai population was also evaluated. Acrylamide in domestic samples (28.3–241.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$, \bar{x} = 137.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$) was apparently higher than those of imported samples (26.8–64.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, \bar{x} = 45.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$). The dietary exposure of the Thai population to acrylamide from instant noodles ranged from 0.39 to 0.84 $\mu\text{g}/\text{kg}$ body weight/day. Small children (3–5.9 years old) showed the highest acrylamide exposure (0.84 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw/day) followed by children (6–12.9 years old) (0.80 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw/day), while population ages 65 up obtained the lowest acrylamide exposure (0.39 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw/day). The results obtained in this study are considered useful as a database for determination of acrylamide in instant noodles.

Keywords: Acrylamide, Acrylamide exposure, Dietary exposure, Instant noodles, Thai population

Introduction

Since 1994, the International Agency for Research on Cancer (IARC) has classified acrylamide as a 'probable human carcinogen' (class 2A carcinogen), and the food safety authority has concluded that levels of dietary exposure to acrylamide are cause for concern due to its carcinogenic effects. Acrylamide is a carcinogenic contaminant from thermal food processes formed through the Maillard reaction mediated by asparagine and reducing sugar. Moreover, acrylamide has been reported to form during frying in many research studies (Pérez-López et al., 2021). In the presence of carbonyl groups such as aldehyde, ketone or other breaking down products from the lipid oxidation during high temperature frying, these compounds could react with asparagine to form acrylamide in the system without the presence of the reducing sugars (Capuano et al., 2010). Apart from Maillard reaction pathway, acrylamide could alternatively formed through acrolein as well.

Instant noodles are one of the most popular foods that people consume because they are inexpensive and easy preparation. Consumption of instant noodles are increasing and the market of instant noodles are growth together. The noodles are initially cooked by steaming, further cooked by frying or baking, and then dehydrated (Kim, 1996). Main ingredient of instant noodles is wheat flour, which contains asparagine ranged from 140–190 mg/kg (Stadler et al., 2002) and reducing sugars which are major precursors of acrylamide formation (Nematollahi et al., 2021). Factors affecting of acrylamide formation in instant noodles is asparagine and reducing sugar in wheat flour, fat/oil used during frying and cooking time and temperature (Li et al., 2006). In Thailand, the instant noodles market is dominating by large domestic brands. Recently, more international brands have entered Thailand's instant noodles market, mainly from other Asian countries, such as Korea and Japan. Even though the consumption of instant noodles are rapidly increased in Thailand, There is a lack of studies regarding the acrylamide content in instant noodles.

The objective of our study was to investigate acrylamide content in instant noodles available in Thailand both domestic and international brands. The dietary exposure to acrylamide from instant noodles in Thai population had been evaluated. The result of this study would be useful to assess the risk of acrylamide and define mitigation measures it in the future.

Materials and Methods

Chemicals

HPLC grade acetonitrile, methanol and hexane were purchased from Lab Scan (Ireland). Analytical grade acrylamide was obtained from Sigma-Aldrich (USA).

Instant noodles samples

Instant noodles domestic samples (n = 10) and imported samples (n = 10) were collected in September-October 2021 from supermarket and convenience stores in Bangkok, Thailand. Information shown

on the label including net weight, manufacturing country, wheat flour content, and palm oil content was recorded.

Acrylamide extraction

Acrylamide extraction was adapted from Michalak et al. (2013). 10 grams of sample were homogenized with 20 mL of 80% methanol and shaken in shaking water bath at 60 °C for 2 hours. Following acrylamide extraction, the samples were filtered through filter paper. A portion of hexane (20 mL) was added and shaken by hand for 2 minutes. The top hexane layer was scraped away. After that, the sample was filtered through a 0.45 µm nylon syringe filter into an amber vial and analyzed using HPLC.

Acrylamide determination by HPLC-DAD

The determination of acrylamide concentration was adapted from Michalak et al. (2013). A Shimadzu LC-10A series HPLC (Kyoto, Japan) with a UV-vis 190–600 nm diode array detector (DAD model SPD-M20A, Shimadzu) set at 200 nm was used. C18 analytical column (250 × 4.6 mm, 5 µm; GL sciences Inc, Japan) heated to 25°C was used for the analysis. The mobile phase was 3.5% acetonitrile in deionized water, with a flow rate of 1 mL/min and an injection volume of 10 µL. The chromatogram of acrylamide is shown in Figure 1. This acrylamide measurement has been validated. The LOD, LOQ and recovery were 89–106%. 3.37 µg/kg, and 10.22 µg/kg, respectively.

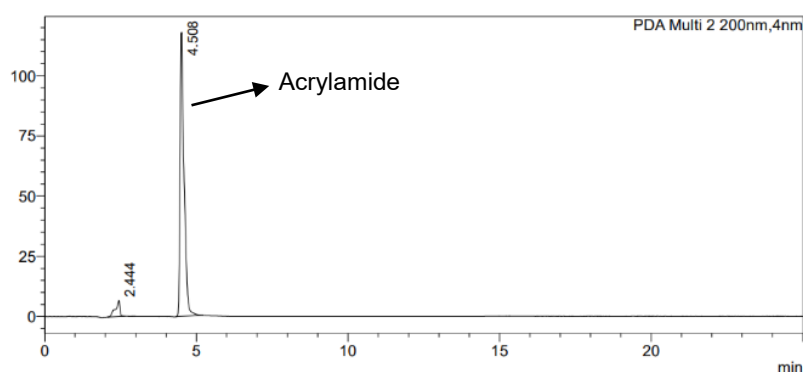


Fig. 1 The chromatogram of acrylamide ($t_R = 4.506$ minute)

Estimation of acrylamide exposure

$$\text{Acrylamide exposure} = \frac{C \times Q}{BW}$$

Where,

C = the average concentration of acrylamide detected in instant noodles samples (µg/kg)

Q = the average daily consumption of instant noodles samples (g/day)

BW = the body weight (kg)







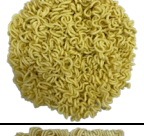

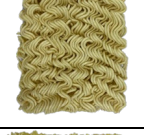











The daily consumption of Instant noodles and human body weight were calculated using food consumption data from Thailand's National Bureau of Agricultural Commodity and Standards (ACFS, 2016). This database is based on 4,310 Thai people who participated in dietary surveys across 17 provinces and four regions of Thailand. The average daily consumption of instant noodles sample (g/day) of Thai instant noodles consuming individuals of six group by age which were 3–5.9, 6–12.9, 13–17.9, 19–34.9, 35–64.9 and 65 up years old. This study focused on people who typically consume instant noodles (eaters only), which presented in from of average and 97.5th percentile.

Results and Discussion

Information of collected instant noodles

Net weight, manufacturing country, percentage of wheat, percentage of palm oil and appearance of twenty instant noodles samples are shown in Table 1. Sample No.1–10 are imported samples and sample No.11–20 are domestic samples. Net weight of imported samples (85–160g, \bar{x} = 113.40g) were higher than those of domestic samples (20–90 g, \bar{x} = 63.00g). However average of wheat flour and palm oil contents in the imported samples (average of %wheat = 58.60%, average of %palm oil = 13.40%) were slightly lower than domestic samples (average of %wheat = 59.92%, average of %palm oil = 15.92%). The different percentage of wheat flour and palm oil in instant noodles could depend on the original wheat flour and the manufacturing process such as centrifugal oil separation and blowing out the oil after frying, resulting in instant noodles with lower oil contents. In addition, the color of each instant noodle sample was varied. The yellow-brown color of instant noodles is contributed by the Maillard reaction between constituents such as sugar and amino acids during frying or baking. The darker color was observed in domestic samples which may be due to the nature color of wheat flour, cooking time and temperature or even reusing of frying oil (Nematollahi et al., 2021).

Table 1 Information of twenty instant noodles

Sample no.	Net weight (g)	Country	Wheat flour (%)	Palm oil (%)	Appearance	Sample no.	Net weight (g)	Country	Wheat flour (%)	Palm oil (%)	Appearance
1	120	Korea	61.0	11.8		11	55	Thailand	68.0	15.0	
2	140	Korea	52.0	11.0		12	80	Thailand	47.6	18.9	
3	112	Korea	61.7	15.0		13	90	Thailand	64.8	8.8	
4	120	Korea	58.8	12.6		14	60	Thailand	56.4	18.0	
5	90	Indonesia	56.7	20.6		15	20	Thailand	68.3	19.0	
6	160	Korea	39.0	8.0		16	55	Thailand	68.3	18.0	
7	90	Singapore	76.0	8.0		17	60	Thailand	53.0	16.0	
8	87	Japan	67.0	17.5		18	65	Thailand	65.0	18.0	
9	130	Korea	51.8	9.8		19	60	Thailand	52.3	14.2	
10	85	Indonesia	62.0	19.6		20	85	Thailand	55.5	13.4	

Acrylamide content in instant noodles

Figure 2 showed the concentration of acrylamide detected in twenty instant noodles samples (10 domestic samples and 10 imported samples). Acrylamide content in domestic samples (28.3–241.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$, \bar{x} = 137.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$) was higher than those of imported samples (26.8–64.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, \bar{x} = 45.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$). This could be the reason that domestic samples have darker color than imported samples because of acrylamide occurs from Maillard reaction. As a result, samples with higher acrylamide content have darker finished products. This could be caused by using a high temperature for an extended period of time during the process (Nematollahi et al., 2021).

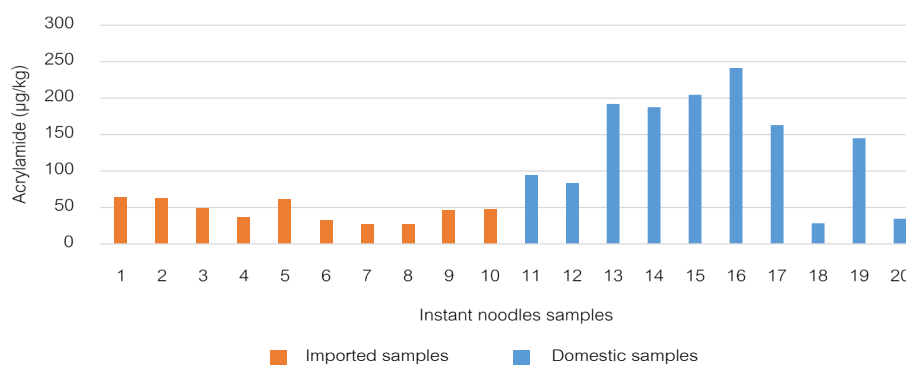


Fig. 2 Acrylamide content in twenty instant noodles

Table 2 Acrylamide level in instant noodles from other countries.

Country	Source of production	N	Acrylamide content ($\mu\text{g}/\text{kg}$)		References
			max - min	average	
Thailand	Domestic samples	10	28.3 - 241.4	137.4	Current study
	Imported samples	10	26.8 - 64.1	45.4	Current study
Taiwan	Domestic samples	8	20.0 - 156.0	N/A	Cheng et al. (2006)
Japan	Domestic samples	2	11.0 - 30.0	21.0	Ono et al. (2003)
China	Domestic samples	30	83.7 - 1027.7	N/A	Zhang et al. (2008)

N/A Data is not available.

Table 2 compared the acrylamide content of instant noodles obtained in this study to those of other countries. The average acrylamide content of twenty instant noodle brands obtained from our study was 26.8–241.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$, which is higher than the acrylamide content of instant noodles in Taiwan ranged from 20.0–156.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (Cheng et al., 2006) and Japan ranged from 11.0–30.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (Ono et al., 2003). According to the study of Zhang et al. (2008), China has the highest acrylamide content in instant noodles, ranging from 83.7–1027.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

Acrylamide is a possible human carcinogen, and the benchmark levels for acrylamide as recommended by Commission Regulation (EU) 2017/2158 (European Commission Regulation, 2017) in wheat and rye based products are 300 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The level of acrylamide in Thai instant noodles ranged from 26.8–241.4

$\mu\text{g}/\text{kg}$, indicating that they are still lower the benchmark levels. In other countries where acrylamide levels are less than $300 \mu\text{g}/\text{kg}$, they are also safe.

Acrylamide exposure from instant noodles

Acrylamide dietary exposure ($\mu\text{g}/\text{kg}$ body weight/day) was calculated by multiplying the average concentration of acrylamide detected in instant noodles samples ($\mu\text{g}/\text{kg}$) and the average daily consumption of instant noodles sample (g/day). The results showed that the dietary exposure of the Thai population to acrylamide from instant noodles in average acrylamide level with average and the 97.5th percentile instant noodles consumers ranged from 0.09–0.21 and 0.15–0.32 $\mu\text{g}/\text{kg}$ body weight/day, respectively and the 97.5th percentile acrylamide level with average and the 97.5th percentile instant noodles consumers ranged from 0.23–0.56 and 0.39–0.84 $\mu\text{g}/\text{kg}$ body weight/day (Table 3). Small children (3–5.9 years old) showed the highest acrylamide exposure (0.84 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw/day) followed by children (6–12.9 years old) (0.80 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw/day), while population ages 65 up obtained the lowest acrylamide exposure (0.39 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bw/day). It was discovered that acrylamide exposure from instant noodles to Thai population is affected by acrylamide concentration, daily consumption, and human body weight.

Table 3 Acrylamide exposure through the consumption of instant noodles at the average and 97.5th percentiles acrylamide content across different age groups of Thai population.

Age (years)	Bodyweight (kg bw)	Consumption level (g/day)		Acrylamide exposure ($\mu\text{g}/\text{kg}$ bw/day)			
		Average	P _{97.5}	average acrylamide level ^a		P _{97.5} acrylamide level ^b	
				Average consumption	P _{97.5} consumption	Average consumption	P _{97.5} consumption
3–5.9	17.25	40.2	60	0.21	0.32	0.56	0.84
6–12.9	33.38	54.19	110	0.15	0.30	0.39	0.80
13–17.9	53.42	61.23	110	0.10	0.19	0.28	0.50
18–34.9	63.12	63.47	110	0.09	0.16	0.24	0.42
35–64.9	63.53	59.81	110	0.09	0.16	0.23	0.42
65 up	55.77	53.69	90	0.09	0.15	0.23	0.39

^aThe average of acrylamide content in instant noodles is $91.40 \mu\text{g}/\text{kg}$

^bThe 97.5th percentile of acrylamide content in instant noodles is $241.4 \mu\text{g}/\text{kg}$

Conclusion

Acrylamide in domestic samples ($28.3\text{--}241.4 \mu\text{g}/\text{kg}$, $\bar{x} = 137.4 \mu\text{g}/\text{kg}$) was apparently higher than those of imported samples ($26.8\text{--}64.1 \mu\text{g}/\text{kg}$, $\bar{x} = 45.4 \mu\text{g}/\text{kg}$). The dietary exposure of the Thai population to acrylamide from instant noodles ranged from 0.39 to $0.84 \mu\text{g}/\text{kg}$ body weight/day. Small children (3–5.9 years

old) showed the highest acrylamide exposure (0.84 µg/kg bw/day) followed by children (6–12.9 years old) (0.80 µg/kg bw/day), while population ages 65 up obtained the lowest acrylamide exposure (0.39 µg/kg bw/day).

Acknowledgements

We are thankful to Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for providing us with academic presentation scholarship.

References

- Capuano, E., Oliviero, T., Açar, Ö.Ç., Gökmen, V., Fogliano, V. 2010. Lipid oxidation promotes acrylamide formation in fat-rich model systems. *Food Research International*. 43: 1021–1026.
- Cheng, W.C., Hsiao, S.W., Chou, S.S., Sun-Hwang, L., Lu, T.J., Yeh, A.L. 2006. Determination of acrylamide in Chinese food by GC-ion trap MS using 2-bromopropenamide and 2-bromopropenamide-¹³C₃. *Food Drug Analysis*. 14: 207–214.
- Kim, S.K. 1996. Instant Noodle Technology. *Cereal Foods World*. 41: 213–218.
- Li, Y.X., Cao, S.X., Zhong, N.J. 2006. Determination of acrylamide in fried instant noodle by gas chromatography/mass spectrometry. *Food Sci*. 27: 229–232.
- Michalak, J., Gujska, E., Kuncewicz, A. 2013. RP-HPLC- DAD studies on acrylamide in cereal- based baby foods. *J. Food Compost. Anal*. 32: 68–73.
- Nematollahi, A., Neda, M.M., Amin, M.K. 2021. An overview of combination of emerging technologies with conventional methods to reduce acrylamide in different food products: Perspectives and future challenges. *Food Control*. 127: 108144.
- Ono, H., Chuda, Y., Ohnishi-Kameyama, M., Yada, H., Ishizaka, M., Kobayashi, H., Yoshida, M. 2003. Analysis of acrylamide by LC-MS/MS and GC-MS in processed Japanese foods. *Food Additives and Contaminants*. 20: 215–220.
- Pérez-López, A.J., Noguera-Artiaga, L., López-Miranda González, S., Gómez-San Miguel, P., Ferrández, B., Carbonell-Barrachina, Á.A. 2021. Acrylamide content in French fries prepared with vegetable oils enriched with β-cyclodextrin or β-cyclodextrin-carvacrol complexes. *LWT-Food Science and Technology*. 148: 111765.
- Zhang, Y.P., Ou, S.Y., Guo, X.D., Du, Z.F., Wu, Y.L. 2008. Determination of acrylamide in fried instant noodles. *Mod. Food Sci. Technol*. 24: 593–595.

Impact of high amylose starch on non-additive behaviors of starch-blend pastes

Ployfon Boonkor*, Namfone Lumdubwong

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok
10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ployfon.bo@ku.th

Abstract

The objective of this study was to investigate the effect of total amylose (AM) content on pasting properties and other Physico-chemical properties of starch blends. High amylose (HAM) rice starch and waxy (Wx) rice starch containing AM content of 36.89% and 0.28%, respectively were blended at five different ratios (20/80, 40/60, 50/50, 60/40, and 80/20 w/w). The total AM content of the blends was ranged from 7.60% to 29.57%. Strong statistical correlations were reported between AM content and swelling power (SP) ($r = -0.99$), solubility ($r = 0.86$), and pasting parameters which were pasting temperature ($r = 0.90$), peak viscosity ($r = -0.91$), trough ($r = -0.81$), breakdown ($r = -0.90$) and setback ($r = 0.68$), respectively. Non-additive behaviors of starch-blend pastes were exhibited, and the extreme effect was shown in starch blends containing 60%–80% of HAM. The addition of HAM starch drastically reduced the breakdown (BD) value of the blends by 44.5%–81.0%.

Keywords: Native starch, Non-additive effect, Pasting properties, Physico-chemical, Starch blend

Introduction

Blending native starches with different weight ratios exhibit additive effects and non-additive effects of food properties. When the food properties can be predicted based on the properties of parental starches according to their blending ratio, the effect is additive. On the contrary, the non-additive effects do not comply with the properties of their parental starches. For example, starch blends displayed higher swelling power (SP) than that of their parental starches (Yao et al., 2003).

Besides starch botanical sources, amylose (AM) content is one of the major factors affecting the functional properties of the starch blends. Sasaki et al. (2002) studied the effect of blending normal and waxy (Wx) wheat starch using various blend ratios. They concluded that AM content had a strong negative correlation with the swelling power (SP) of starch blends. The addition of potato starch to high amylopectin (AP) potato starch also increased moduli values of starch gels (Ortega-Ojeda et al., 2004). The authors suggested that the presence of AM was essential to the rheological behavior of starch blend gels since AM led to a strong network formation. Although the linear glucan polymer significantly influences starch gelling and pasting properties, their effects on those properties were not that simple. The 10% w/v starch paste of the blends of normal rice/Wx rice at a blend ratio of 75/25 exhibited several non-additive pasting properties (Hagenimana and Ding, 2005). The pasting profile displayed double peak viscosities. The values of peak viscosity (PV) increased, but its setback decreased significantly. And those pasting parameters at the specific ratio, evidently, were not the weight-average values of those parental starches.

Previous studies suggested important roles of AM content on the Physico-chemical, rheological, and pasting properties of the starch blends. However, those studies have been done on a system of ~10% concentration of starch. It is worth exploring the effect of AM content of the blends at ~6% concentration on pasting properties. The typical concentration is used as food thickeners in bakery products such as pie-filling. Therefore, the objective of the study was to investigate the effect of total amylose (AM) content on pasting properties and other Physico-chemical properties of starch blends. High amylose (HAM) rice starch and waxy (Wx) rice starch were blended at five different weight ratios. The concentration of the blends was 6.0% w/v. The hypothesis of this study is effects of AM content of starch blends on their pasting properties are non-additive. The application of the findings aimed for utilization of native starch blends as clean-label food ingredients.

Materials and Methods

Materials

High amylose rice - Chainart (CN) and waxy rice - Sew Mae Jan (SMJ) were obtained from the Rice Research Center (Thailand). Amylose from potatoes was purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO).

Starch isolation

Rice starches were isolated according to the alkaline method (Lumdubwong and Seib, 2000). The starch was extracted using rice grain. The soaking time was increased to 24 hr.

General method

Moisture content and proximate analyses (protein, lipid, and ash) of starch were determined using the methods of AOAC (1990). The apparent amylose content of starch was measured by the method of Chrastil (1987).

Measurements of Physico-chemical and pasting properties

A completely randomized design (CRD) was used in all experiments. HAM and Wx starches were blended at seven weight ratios of blending: 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80, and 0/100. Total treatments were seven.

The gelatinization properties of starch were determined by differential scanning calorimetry (DSC) (model DSC 1, Star[®] System, Mettler-Toledo, Greifensee, Switzerland). The ratio of starch to water was 1: 2.5 (w/w). The heating condition was according to Hsieh et al. (2019). Swelling power (SP) and solubility of starches (1%w/v) were determined by the method of Crosbie (1991). The pasting properties of starch were determined by a rapid visco analyzer (RVA) (model 4500, Perten Instruments, Sydney, Australia). The concentration of the samples was 6.0% w/v and 10.8% w/v. The pasting condition of Lumdubwong and Seib (2000) was applied in this study.

Statistical analyses

All measurements were done at least in replicate. Analysis of variance (ANOVA), Duncan's multiple comparison, and Pearson's correlation were performed using SPSS 25 software.

Results and Discussion

Chemical compositions and Physico-chemical properties of starches

High amylose (HAM) rice, Chainart (CN), and waxy (Wx) rice, Sew Mae Jan (SMJ), were used in this study. The AM content of both samples obtained from the iodine method (Table 1) verifies that they are HAM and Wx starches, respectively. The higher protein residue in HAM starch, compared to that of Wx starch was related to the presence of granule-bound starch synthase (GBSS) (Tomlinson and Denyer, 2003). However, the fat and ash content of both samples were not significantly different ($p \geq 0.05$). The gelatinization temperature (T_p) of HAM starch was $\sim 10^\circ\text{C}$ higher than that of Wx starch (Table 1). In addition, its difference between T_c and T_o was narrower than Wx. The incidents indicated HAM starch had a higher molecular order of AP as well as a higher perfection of the crystalline phase, compared to Wx starch. Their similar values of the gelatinization

enthalpy (ΔH) ($p \geq 0.05$) were not agreeable to a previous study in which waxy starches displayed a higher ΔH than normal starches. The high enthalpy value was generally reflected a high percentage of crystallinity of AP (Jane et al., 1999). However, our results were in accordance with the study of Vandeputte et al. (2003b). The authors reported some normal rice starches contained both high T_p and ΔH . Furthermore, their values were equivalent to those of Wx rice starches.

Table 1 Chemical compositions, and gelatinization properties of native starches.^A

Sample	Chemical compositions			AM content (%)	Gelatinization properties				
	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)		T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
HAM starch	0.47 $\pm 0.03^a$	0.08 $\pm 0.03^a$	0.21 $\pm 0.03^a$	36.89 $\pm 0.55^a$	76.45 $\pm 0.06^a$	81.25 $\pm 0.11^a$	89.53 $\pm 0.13^a$	13.08 $\pm 0.08^b$	14.39 $\pm 1.12^a$
Wx starch	0.22 $\pm 0.10^b$	0.13 $\pm 0.03^a$	0.16 $\pm 0.02^a$	0.28 $\pm 0.39^b$	63.79 $\pm 0.19^b$	70.75 $\pm 0.11^b$	82.69 $\pm 0.15^b$	18.90 $\pm 0.04^a$	12.17 $\pm 0.38^a$

Means in the same column with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

^A T_o = onset temperature of gelatinization; T_p = peak temperature; T_c = conclusion temperature.

Table 2 Swelling power and solubility of native starches and their blends.^A

Sample	Swelling power (g/g)	Solubility (%)
HAM starch	23.81 \pm 0.22 ^d	17.53 \pm 0.19 ^{ab}
HW80/20	29.31 \pm 1.21 ^f	19.19 \pm 1.02 ^a
HW60/40	33.54 \pm 1.35 ^e	18.58 \pm 1.85 ^a
HW50/50	37.82 \pm 1.14 ^d	15.32 \pm 1.68 ^{bc}
HW40/60	40.41 \pm 0.28 ^c	13.81 \pm 0.01 ^c
HW20/80	46.98 \pm 0.37 ^b	10.87 \pm 0.47 ^d
Wx starch	53.96 \pm 0.38 ^a	11.10 \pm 0.71 ^d

Means in the same column with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

^A HW = the blends of HAM/Wx starches at different mixing ratios.

Swelling power and solubility of starch blends

Swelling power (SP) of HAM starch was twice lower than Wx starch (Table 2). The result was consistent with previous reports. AP was responsible for SP of starch granules; but AM restricts granule swelling and, therefore, provides granule rigidity (Tester and Morrison, 1990). Percentage of solubility of HAM starch was also higher than Wx starch. Vandeputte et al. (2003a) justified the event that leaching ability during heating increased when starch contained high AM content. SP of the blends of HAM/Wx samples at five different ratios increased proportionally to AP content of the samples. Their values also indicated additive effects (Table 2). In contrast, the solubility of the blends exhibited non-additive effects. The solubles of the blends of HW80/20 and HW60/40

were similar to that of HAM ($p \geq 0.05$). Percentage of solubility of the blends drastically reduced when the blends contained 40% of HAM starch (Table 2).

Pasting properties of native starches

Typical pasting profiles of HAM and Wx starches at 10.8% w/v are shown in Fig. 1A. To compare the effect of concentrations, pasting properties of both starches at 6.0% w/v were also determined (Fig. 1A). The pasting characteristic of starch with similar AM content was originally expected to be the same since both concentrations were an excess water condition. The curve of 10.8% starch, however, should be sharper, and the overall viscosity was higher than that of 6.0% starch. The presumption was based on the lower amount of free water and a larger proportion of swollen granules occupying the space in the higher concentration of starch (10.8%) (Srichuwong et al., 2005). Surprisingly, only the 6.0% Wx starch exhibited the pasting profile as predicted (Fig. 1A). The profile of 6.0% HAM starch, in contrast, was totally different from the 10.8% HAM starch (Fig 1A). It exhibited an extremely low peak viscosity (PV), very low breakdown (BD), and final viscosity (FV). The profile was somewhat a cross-linked starch. Differences in swelling power, granule rigidity, resistance to friction during shear, and leaching ability of HAM and Wx starches were proposed to be the causes. HAM granules had restricted swelling. Consequently, the friction between granules due to shear force (stirring) was very low under a diluted system. Besides, their granule rigidity was high; and the amount of leached AM was extremely low. In turn, the profile of 6.0% HAM was similar to the cross-linked starch. While at a higher concentration, swollen granules were more compact with each other, resulting in an increase of friction between granules during stirring. The incident led to higher granule disruption (Srichuwong et al., 2005). The amount of AM leaching in this system was also supposedly at least twice higher. Thus, a distinctive PV, a higher BD, and a higher FV of the 10.8% HAM paste were reported. On the contrary, high SP of Wx resulted in the high occupied volume despite the diluted system. In turn, the friction between swollen granules increased. The granule rigidity of Wx was also very low. Therefore, those granules were easily swollen and disrupted during shear.

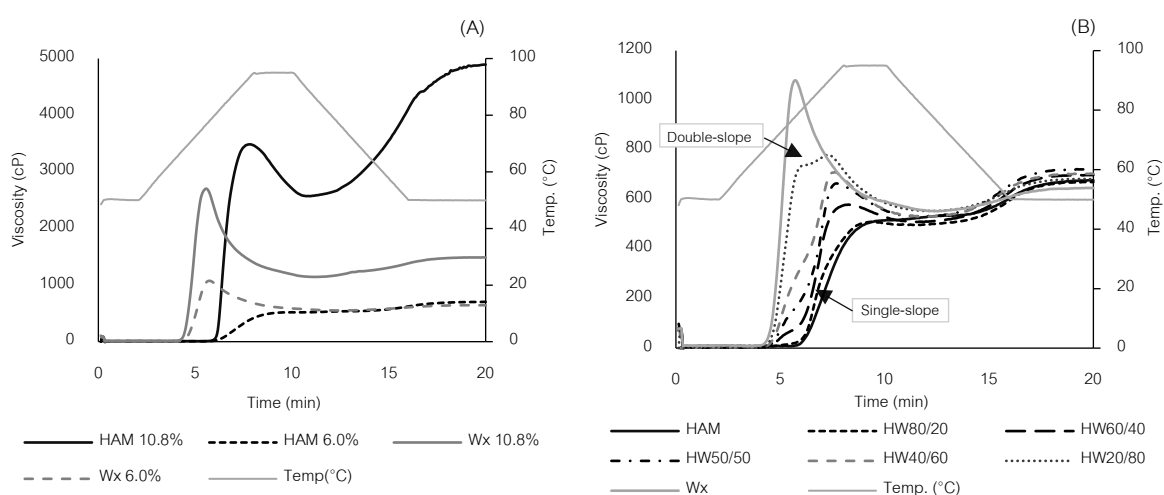


Fig. 1 Pasting profile of native starches and their blends: (A) starch concentration 10.8% and 6.0%; (B) starch concentration 6.0%.

Pasting properties of starch blends and correlations of AM content with pasting parameters

The pasting temperature (PT) of both starches corresponded with their gelatinization temperature (Table 1 and Fig. 1B). HAM starch was higher than Wx starch (82.43°C vs 67.95°C). The HW20/80, HW40/60, HW50/50, and HW60/40 blends displayed a double-slope characteristic prior to its peak viscosity (PV), indicating a two-stage swelling of granules. The HW80/20 blend was the only sample exhibiting a single slope (Fig. 1B). The ratio of the length of the first and the second slope was positively correlated with the weight fraction of Wx and HAM starches, respectively. Wx starch was possibly responsible for a rise of the first stage of heating viscosity. Wx granules not only rapidly swelled, but disrupted easily due to their low shear resistance while stirring. HAM starch superseded Wx starch at the second stage of heating viscosity, due to its AM leaching and granule swelling (Hagenimana and Ding, 2005). The strong negative correlations between AM and SP ($r = -0.99$), PV ($r = -0.91$), and breakdown (BD) ($r = -0.90$) affirmed significance of AM as it provided granule rigidity and shear resistance (Table 3). The positive correlation of AM and PT ($r = 0.90$) also supported the justification.

AM content was generally positively correlated with final viscosity (FV) of starch paste. The linear molecules efficiently re-associate to form a 3-D network during the cooling stage, resulting in high viscosity (Ai and Jane, 2018). Our study, in contrast, found no correlations between AM content and FV of the 6.0% HAM/Wx blends (Fig. 1B and Table 3). The FV of all the HAM/Wx blends was ~ 680 – 724 cP. In other words, the non-additive effect of FV of the HAM/Wx blends was reported. The results suggested that AM content was probably not the only factor that governed the FV of the system. In fact, the interaction between granule remnants and leached molecules reinforcing the starch network was another important factor governing FV during cooling (Waterschoot et al., 2014).

Table 3 Pearson's correlation of AM content, SP, solubility, and pasting parameters.

Parameter	AM	SP	Solubility	PT	PV	Trough	BD	FV	SB
AM	1.00								
SP	-0.99**	1.00							
Solubility	0.86**	-0.89**	1.00						
PT	0.90**	0.93**	0.91**	1.00					
PV	-0.91**	0.93**	-0.84**	-0.81**	1.00				
Trough	-0.81**	0.82**	-0.95**	-0.87**	0.82**	1.00			
BD	-0.90**	0.93**	-0.81**	-0.79**	0.99**	0.78**	1.00		
FV	0.35	-0.39	0.30	0.11	-0.58*	-0.26	-0.61*	1.00	
SB	0.68**	-0.72**	0.74**	0.55*	-0.86**	-0.74**	-0.85**	0.84**	1.00

*Correlation is significant at the 0.05 level ($p < 0.05$).

**Correlation is significant at the 0.01 level ($p < 0.01$).

Non-additive effects of HAM starch on pasting properties of the HAM/Wx blends.

Although AM content of the blends decreased PV and BD of the paste, its effect was not proportional to their weight ratio. The actual values of the pasting parameters of the blends were ~ 100 - 200 cP lower than the predicted values, the weighted average of the ratio of HAM to Wx fraction. The addition of HAM starch drastically reduced the BD value of the blends by 44.5%–81.0% (Fig. 2B). The non-additive effects of HAM starch, seemingly, depended on the ratio of HAM. The strong non-additive behavior was addressed when the blends contained 60%–80% of HAM as shown in Fig. 2A and 2B. Therefore, the mechanism of the non-additive behaviors of pasting profiles when HAM was blended with Wx at certain ratios will be further investigated.

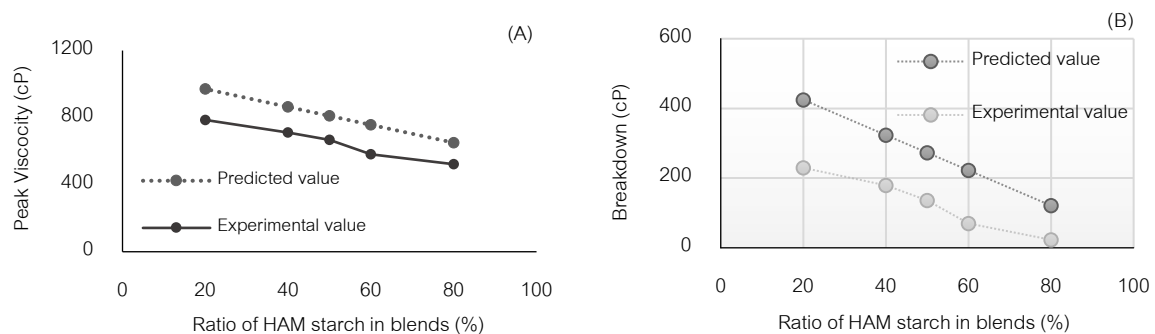


Fig. 2 Comparison of experimental and predicted values of pasting parameters of starch blends: (A) peak viscosity (PV); (B) breakdown (BD).

Conclusion

The pasting profile of HAM starch at 6.0% was similar to a cross-linked starch paste, and different from the HAM paste at 10.8%. AM content, SP, solubility, and pasting parameters of the 6.0% paste of the HAM/Wx blends were strong statistically correlated. The addition of HAM resulted in non-additive behaviors of pasting viscosities. AM content of the blends decreased PV and BD of the paste but its effect was not proportional to the HAM weight ratio. The blends containing 60% to 80% of HAM displayed the strongest non-additive effect of reduced viscosities. Blending HAM with Wx was proposed to be an opportunity to design the desirable viscosity of the paste for food applications.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This work is supported in part by Kasetsart University through the Graduate School Fellowship Program, and the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

References

- Ai, Y., Jane, J.-I. 2018. Understanding starch structure and functionality. In: Sjö, M., Nilsson, L. (Eds.). Starch in Food (Second Edition). Woodhead Publishing, pp. 151–178.
- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis, 15th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA.
- Chrastil, J. 1987. Improved colorimetric determination of amylose in starches or flours. Carbohydrate Research 159: 154–158.
- Crosbie, G.B. 1991. The relationship between starch swelling properties, paste viscosity and boiled noodle quality in wheat flours. J. Cereal Sci. 13: 145–150.
- Hagenimana, A., Ding, X. 2005. A comparative study on pasting and hydration properties of native rice starches and their mixtures. Cereal Chemistry 82: 70–76.
- Hsieh, C.F., Liu, W., Whaley, J.K., Shi, Y.-C. 2019. Structure and functional properties of waxy starches. Food Hydrocoll 94: 238–254.
- Jane, J., Chen, Y.Y., Lee, L.F., McPherson, A.E., Wong, K.S., Radosavljevic, M., Kasemsuwan, T. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chem. 76: 629–637.
- Lumdubwong, N., Seib, P.A. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour. J. Cereal Sci. 31: 63–74.
- Ortega-Ojeda, F.E., Larsson, H., Eliasson, A.C. 2004. Gel formation in mixtures of high amylopectin potato starch and potato starch. Carbohydr. Polym. 56: 505–514.
- Sasaki, T., Yasui, T., Matsuki, J., Satake, T. 2002. Rheological properties of mixed gels using waxy and non-waxy wheat starch. Starch – Stärke 54: 410–414.
- 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.
- Tester, R.F., Morrison, W.R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. Cereal Chem. 67: 551–557.
- Tomlinson, K., Denyer, K. 2003. Starch synthesis in cereal grains. Adv. Bot. Res. 40: 1–61.
- Vandeputte, G.E., Derycke, V., Geeroms, J., Delcour, J.A. 2003a. Rice starches. II. Structural aspects provide insight into swelling and pasting properties. J. Cereal Sci. 38: 53–59.
- Vandeputte, G.E., Vermeylen, R., Geeroms, J., Delcour, J.A. 2003b. Rice starches. I. Structural aspects provide insight into crystallinity characteristics and gelatinisation behaviour of granular starch. J. Cereal Sci. 38: 43–52.
- Waterschoot, J., Gomand, S.V., Willebrords, J.K., Fierens, E., Delcour, J.A. 2014. Pasting properties of blends of potato, rice and maize starches. Food Hydrocoll. 41: 298–308.
- Yao, Y., Zhang, J., Ding, X. 2003. Retrogradation of starch mixtures containing rice starch. J. Food Sci. 68: 260–265.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
(Subject: Natural Resources and Environment)

ภาคบรรยาย
(Oral Presentation)

Preparation biofertilizer precursor from waste latex sludge digestion with sulfuric acid

Praewpan Chantarapong^{a,c}, Wirach Taweepreda^{a,b,*}

^aScience for Industry Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, Thailand

^bPolymer Science Program, Division of Physical Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, Thailand

^cT.C. Group Co., Ltd., 1275/2 Petchkasem Road, Hat-Yai, Songkhla 90110, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wirach.t@psu.ac.th

Abstract

Waste latex sludge, which is a null by-product of concentrated latex manufacturing, was a digestion process of waste latex sludge with sulfuric acid. Effect of the moisture of waste latex sludge and sulfuric acid at concentration was studied. It was found that moisture of waste latex sludge affected on the reaction between acid and waste latex sludge. In addition, this moisture influenced also on several reusable acids. The acid concentration hardly affected on the digestion process of waste latex sludge. The wastewater that occurred from acid digestion was treated by an alkaline, obtaining the matters which contain essential nutrient elements for plants namely nitrogen, potassium, and phosphorus in amounts of 1.29, 6.70, and 2.05% w/w, respectively. It was found that quantities of these nutrient elements were not significant at ≤ 0.05 . Moreover, from the X-ray diffraction pattern results, it was found that many elements were analyzed such as sulphur, magnesium, and phosphorus elemental as by products. Therefore, the wastewater in this work is suitable used the fertilizer.

Keywords: Concentrated latex, Moisture of waste latex sludge, Sulfuric acid, Waste latex sludge

Introduction

The natural rubber latex is not only consisted of natural rubber latex particles that has a dry rubber content of 25–35% w/w, but also non-rubber parts such as Magnesium (Wirach, 2011). The production of concentrated natural rubber is manufactured by centrifuging to bring fresh latex to a concentration suitable for processing into various products. The natural rubber latex contains high magnesium and has an impact on the centrifugation process and the quality of concentrated latex. The method of magnesium precipitation is achieved by adding diammonium hydrogen phosphate, in which the reaction of diammonium hydrogen phosphate with magnesium results in solid sludge formation and precipitation. The sludge is waste generated and obtained from various steps of the latex production process. Generally, this disposed of sludge waste became wasted, abandoned, reclamation and incineration, which the waste disposal method is not considered appropriate. In addition to the waste residue left behind, it will cause a smelly, disturbing smell (Korwutthikulrangsi et al., 2015). The waste latex sludge was generated from concentrated latex manufacture by centrifuging. Sludge waste is generated and found at the bottom of the tank. The basic composition of these materials is rubber hydrocarbon, nitrogen, magnesium, and phosphorus for 12.5%, 3.3%, 12.2%, and 14.7% w/w (dry weight), respectively. (Boonsawang et al., 2008). Therefore, the sludge wasted from the concentrated natural rubber latex industry can be increased in its value by being modified with effective processes before utilization for agriculture.

Most of the nitrogen contents of the latex sludge are derived from the protein fraction on the decomposed rubber particles. However, digestion with acid inorganic and organic matters are decomposed until a solution can be used and the use of acid causes various elements in the waste latex sludge to be dissolved. Meanwhile, the component does not deteriorate. Meanwhile the component does not deteriorate (Wirach, 2011). These materials can be comparable used as commercial fertilizers The three main nutrients are nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). Other important nutrients are calcium, magnesium, and sulfur. Plants also need small quantities of iron, manganese, zinc, copper, boron, and molybdenum, known as trace elements, because only traces are needed by the plant. The role these nutrients play in plant growth.

In this research, the study holds waste disposal with sulfuric acid and preparation fertilizer from waste digestion with sulfuric acid. Apart from developing fertilizer precursors from waste latex sludge, these are the commercial fertilizers in the market

Materials and Methods

Waste latex sludge dry (the moisture of waste latex sludge is about 8% w/w), waste latex sludge wet (the moisture of waste latex sludge is about 50% w/w) and dried waste latex sludge soaked in water (the moisture of waste latex sludge is about 50% w/w) were used in this work as illustrated in Fig 1. In the first step, the waste latex sludge was digested to separate rubber through reaction between waste latex sludge and sulfuric acid (98 %w/w) for 24 hours at room temperature. After that, the liquid part was titrated to determine the concentration of the residual acid from the waste latex sludge infusion, The solid part or rubber was washed

with water and dried. The waste latex sludge was added into sulfuric acid from in the first step in case of higher than 15% w/w of acid concentration and/or the acid content has adequately to add into further waste latex sludge.

Then, the properties of wastewater from latex sludge digestion were analyzed. Total nitrogen, total phosphorus and total potassium were investigated by Kjeldahl method, spectrophotometry, and inductively coupled plasma (ICP), respectively. In addition, sulfuric acid, at less than 15% w/w, was neutralized by ash powder and then analyzed for fertilizer standard such as total nitrogen by CN analyzer, total potassium by spectrophotometry, phosphorus by inductively coupled plasma, organic matter, and germination index. The crystal as by product in this work was characterized by X-ray diffractometer.



Fig. 1 (A) waste latex sludge dry, (B) waste latex sludge wet, and (C) dried waste latex sludge soaked in water

Results and Discussion

Effect of moisture on the reaction between waste latex sludge and acid as shown in Table 1. It was found that higher moisture waste latex sludge can react with acids faster than lower moisture waste latex sludge. The waste latex sludge wet presents the fastest reaction time, compared to others. It was approximate 3 seconds due to appearance of reaction between water on the surface particle and acid (Goodman et al., 2000).

In addition, moisture influenced also on several reusable acids as shown in Table 2. It's clearly that waste latex sludge which was soaked in water had number of times to add into acid than waste latex sludge dry but closed to waste latex sludge wet. However, the acid concentration hardly affected on the digestion process of waste latex sludge.

Table 1 Reaction time between waste latex sludge and acid

Waste latex sludge characteristics	Time (sec.)
waste latex sludge dry	6300
waste latex sludge soaked in water	5
waste latex sludge wet	3

Table 2 Effect of moisture of latex sludge on reusable acid

The weight was lost of	Number of times to add Waste latex sludge							
	1	2	3	4	5	6	7	8
waste latex sludge dry (%)	93.14	61.78	87.05	-	-	-	-	-
waste latex sludge soaked in water (%)	95.44	95.31	94.09	93.36	89.56	86.84	91.51	-
waste latex sludge wet (%)	94.30	92.90	89.40	87.14	86.39	86.80	86.77	81.80
acid concentration (%)	98	70	50	40	35	30	25	20

Table 3 shows nutrients for plants in wastewater in this work. It was found that waste latex sludge dry, waste latex sludge wet, and dried waste latex sludge soaked in water consist of significantly enough nitrogen, potassium, and phosphorus elements because waste latex sludge comprises a mixture of organic and inorganic about 5-50%. Therefore, when organic was digested by sulfuric acid at hydroxyl group positions led to releasing of various elements. However, the other components were not deteriorated. (Goodman et al., 2000).

Table 3 Nutrients for plants in wastewater

Waste latex sludge characteristics	Total N	Total P	Total K
wastewater from waste latex sludge dry digestion with sulfuric acid	1.78	6.86	0.25
wastewater from dried waste latex sludge soaked in water digestion with sulfuric acid	1.15	7.77	0.27
wastewater from latex sludge wet digestion with sulfuric acid	0.95	6.39	0.43
One Way Analysis of Variance	S	S	S

significant **significant at $p \leq 0.05$

The mean difference is significant at the 0.05 level

Ash powder was added to the wastewater from sludge digestion with sulfuric acid at a concentration of less than 15 %w/w to analyze important nutrients for plant such as nitrogen, potassium, and phosphorus as shown in Table 4.

The results were found wastewater from sludge digestion with sulfuric acid after adding ash powder which presented pH about 6. In addition, its nitrogen, potassium, phosphorus, organic matter, and germination index were approximate 1.29, 6.70, 2.05, 8.10, and 93.96% w/w respectively. It was found that the results of nutrients were not significant.

Table 4 Several nutrient elements in wastewater which was neutralized

	Total N	Total P	Total K	organic matter	Germination index
Organic Fertilizer Standard	> 1.0% w/w	> 0.5% w/w	> 0.5% w/w	> 20% w/w	> 80% w/w
Sulfuric acid at a concentration of less than 15% add ash powder	1.29	6.70	2.05	8.10	93.96
T-test	ns	Ns	Ns	ns	Ns

Not significant **significant at $p \leq 0.05$

The mean difference is not significant at the 0.05 level

The crystal formation was appeared from waste latex sludge digestion with sulfuric acid as shown in Fig 2. It's clearly that the crystal characteristics are transparent and glossy. In addition, the crystals were analyzed by X-ray diffraction pattern. It was found that many elements appeared such as sulphur, magnesium and potassium as shown in Table 5.



Fig. 2 The crystals from waste latex sludge digestion using sulfuric acid

Table 5 Elemental analysis of crystals

Analyte	Compound formula	Concentration (%)
Mg	MgO	4.623
P	P ₂ O ₅	0.491
S	SO ₃	39.714
K	K ₂ O	1.057
Zn	ZnO	0.949
Rb	Rb ₂ O	0.117

Conclusions

The wastewater from sludge digestion with sulfuric acid through neutralization was found to contain several nutrient elements such as nitrogen, potassium and phosphorus were 1.29, 6.70 and 2.05% w/w and was feasible solution to solve the problem of waste disposal in the latex concentrated factories. Therefore, the wastewater in this work is suitable used the fertilizer because it contains various nutrients for plants.

Acknowledgements

This research was supported by the Triple helix master degree integrated platform for research, development and innovation in industry under Program Management Unit – Brain Power (PMUB), Office of National Higher Education Science Research and Innovation Policy Council (Nxpo). PC are grateful to T.C. GROUP Co., Ltd. for the M.Sc. financial supports.

References

- Boonsawang, P., Laeh, S., Intrasungka, N., 2008. Enhancement of sludge granulation in anaerobic treatment of concentrated latex wastewater. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 30: 111–119.
- Goodman, A.L., Underwood, G.M., Grassian, V.H. 2000. A laboratory study of the heterogeneous reaction of nitric acid on calcium carbonate particles. Department of Chemistry and Center for Global and Regional Environmental Research, University of Iowa, Iowa City. *J Geophys. Res.* 105: 29,053–29,064.
- Korwutthikulrangsri, S., Prasertsongsun, S., Chaisuksant, Y. 2015. The Innovative reduction odor of Latex Sludge. Faculty of Science and Technology Prince of Songkla University, Pattani, Thailand. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JEET/article/view/180908>, 4 December 2020.
- Taweepreda, W. 2011. Industrial Prototype of Rubber Recovery Technology from Waste Latex Sludge. Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. <https://chem.eng.psu.ac.th/tiche2011/TCHE/data/paper/international/pp/oral/pp007.pdf>, 31 December 2020.

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ และคุณภาพน้ำประปาจากระบบ ประปาหมู่บ้าน กรณีศึกษา จังหวัดสิงห์บุรี

Assessment of greenhouse gas emission, water footprint and water supply quality from village
water supply systems; Case study of Singburi Province

พิชญานิน จันทร์ไบลีก*, จิมา ศรีลัมพ์

Pichayanin Chanbailek*, Cheema Soralump

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail Address: pichayanin.c@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ และคุณภาพน้ำประปาจากระบบประปาหมู่บ้าน เพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและปรับปรุงกระบวนการประปา การใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน โดยรวบรวมข้อมูลแล้วนำมาคำนวณตามคู่มือ พบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำอยู่ในช่วง 1,009–17,251 kgCO₂e/year การใช้ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,334–24,721 kgCO₂e/year และไม่ได้ใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต จึงไม่มีฟุตพริ้นท์เกิดขึ้น เมื่อพิจารณา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 1.05 ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้ไปในกระบวนการต่างๆ รวมถึงเป็นน้ำที่สูญเสียและน้ำที่แฝงอยู่ในสารขาเข้าที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา และผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำประปามีพารามิเตอร์ที่ตรวจแล้วเกินเกณฑ์มาตรฐาน 9 พารามิเตอร์ ได้แก่ Turbidity, TDS, Hardness, Fe, Mn, As, Pb, TCB และ *E. coli*

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก, ระบบประปาหมู่บ้าน, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์

Abstract

The study aimed to assess the GHG emission, water footprint and water supply quality of village water supply systems. The results of this study are reduced GHG and improve production efficiency and sustainability. The data are collecting and calculating according to the manual. The results of the GHG assessment showed that the GHG emissions from water production in the range of 1,009–17,251 kgCO₂e/year and electricity consumption in the range of 1,334–24,721 kgCO₂e/year. There are no chemicals are used in the water production, therefore no footprints occurred. Water footprint per unit of product is 1.05. Which is water used in various processes, including water loss and water hidden in the water production. The results of water quality analysis found that the measured parameters exceeded the standard 9 parameters: Turbidity, TDS, Hardness, Fe, Mn, As, Pb, TCB and *E. coli*.

Keywords: Greenhouse gas emission, Village water supply systems, Water footprint

คำนำ

วิกฤติการณ์สิ่งแวดล้อมระดับโลกที่กำลังสร้างความเสียหายและเป็นภัยต่อมนุษย์มากที่สุดในปัจจุบัน คือการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ไม่ว่าจะเนื่องมาจากความเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ หรือกิจกรรมของมนุษย์ การขยายตัวของชุมชน การใช้พลังงาน การลดลงของพื้นที่สีเขียว ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สภาพอากาศของโลกเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกอย่างรุนแรง (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2563)

คนมีความต้องการใช้น้ำในชีวิตประจำวันในหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น น้ำดื่ม น้ำเพื่อการปรุงอาหาร น้ำเพื่อการซักล้าง นอกจากนี้ยังมีน้ำอีกส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำของคน เป็นน้ำส่วนใหญ่ที่ใช้ในการดำรงชีพของคน คือน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูก เลี้ยงสัตว์ แปรรูปอาหาร ผลิตภัณฑ์และบริการต่างๆ ทรัพยากรน้ำในโลกมีปริมาณจำกัด ขณะที่ความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้นอย่างไม่รู้ที่สิ้นสุด การขาดแคลนน้ำจึงเกิดขึ้นในหลายพื้นที่ของโลก และนับวันสภาวะการขาดแคลนน้ำจะรุนแรงมากขึ้น ทั่วโลกมีความต้องการใช้น้ำเพื่อการผลิตและบริการเพิ่มขึ้น ในขณะที่แหล่งน้ำจืดลดลง และมีการเสื่อมคุณภาพของน้ำจากมลพิษ สำหรับประเทศไทยเองกำลังเริ่มเผชิญหน้ากับปัญหาการใช้น้ำมากขึ้นเช่นกัน (องค์การกองทุนสัตว์ป่าโลกสากล, 2560)

ระบบประปาหมู่บ้าน เป็นการนำน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ (น้ำผิวดิน และ/หรือ น้ำใต้ดิน) มาผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผลิตให้เป็นน้ำสะอาดตามหลักสุขาภิบาล แล้วจ่ายน้ำประปาให้แก่ประชาชน ทั้งนี้ระบบประปาแต่ละแบบจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ส่วนการบริหารกิจการประปาจะบริหารโดยคณะกรรมการประปาหมู่บ้าน หรือประชาชนบริหารกิจการประปาร่วมกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นบริหารกิจการเอง หรือจ้างเอกชนเป็นผู้บริหารกิจการ (กรมการปกครองส่วนท้องถิ่น, 2563)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จากระบบประปาหมู่บ้าน ตั้งแต่ระบบน้ำดิบจนถึงการให้บริการน้ำประปาแก่ผู้ใช้น้ำ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่สำคัญในการบริหารจัดการระบบประปานำไปสู่แนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในขั้นตอนที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้น้ำที่มากเกินไปจนความจำเป็น รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพน้ำประปา เพื่อปรับปรุงระบบประปาหมู่บ้านให้ยั่งยืน

โดยในการศึกษานี้ทำการศึกษาระบบประปาในจังหวัดสิงห์บุรีทั้งสิ้น 15 ระบบ เป็นระบบประปาที่สะดวกที่จะให้ข้อมูลและได้ข้อมูลครบถ้วนมากที่สุด การผลิตน้ำประปาเริ่มจากการสูบน้ำจากบ่อบาดาล เข้าสู่ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำแล้วสูบขึ้นสู่หอถังสูง และจ่ายน้ำจากหอถังสูงส่งให้ผู้ใช้ผ่านมาตรวัดน้ำ ดัง Fig. 1

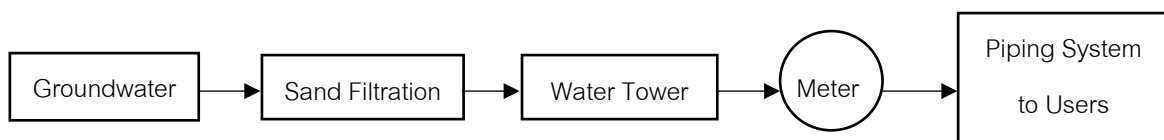


Fig. 1 Village water supply production

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

แบบสำรวจข้อมูลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและปริมาณการผลิตน้ำจากระบบประปาหมู่บ้าน ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำประปาของระบบประปาหมู่บ้าน ค่า Emission Factor คู่มือการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์

ตามหลักเกณฑ์ของ IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006) คู่มือการประเมินนวัตกรฟุตพริ้นท์จาก The Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra et al., 2011) และใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณ

Table 1 Greenhouse Gas Emission Coefficient

No.	Activity	Details	Unit	Factor (kgCO ₂ e/Unit)	References
1	Electricity, grid mix	Electric grid mix 2016-2018	kWh	0.5986	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA (with TGO electricity 2016-2018)
2	Water Supply PWA	Produced by Surface Water and Groundwater	m ³	0.2843	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA (with TGO electricity 2016-2018)
3	Water Supply - MWA	Produced by Surface Water	m ³	0.7948	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA (with TGO electricity 2016-2018)
4	Chlorine	Chlorine, gaseous, diaphragm cell, at plant	kg	1.0548	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a
5	Aluminium Sulphate; ALUM (Al ₂ (SO ₄) ₃)	Aluminium sulphate, powder, at plant	kg	0.5311	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a

Source: Thailand Greenhouse Gas Management Organization (2020)

วิธีการศึกษา

1. การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกการผลิตน้ำประปาจากระบบประปาหมู่บ้าน นำข้อมูลทั้งหมดที่เก็บรวบรวมเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำของระบบประปาหมู่บ้านมาเข้าสู่ตรรกการคำนวณ ดังสมการที่ 1 และ 2 ประกอบด้วยการประเมิน 2 แบบ คือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกการผลิตน้ำของระบบประปา ใช้ค่า Emission Factor จากน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ผลิตโดยใช้น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าของระบบประปา ใช้ค่า Emission Factor ของ Electricity, grid mix (ไฟฟ้าแบบ grid mix ปี 2016–2018) ดังที่ระบุใน

Table 1

$$\text{GHG Emission} = \sum_{i=1}^n \text{GHG}_i \quad (1)$$

$$\text{GHG}_i = \text{Activity Data}_i \times \text{Emission Factor}_i \quad (2)$$

โดยที่ GHG = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO₂e), Activity Data = ข้อมูลกิจกรรม, Emission Factor (EF) = ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO₂e/หน่วยกิจกรรม), n = จำนวนกิจกรรมทั้งหมด, i = กิจกรรมที่ i

2. การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน ประกอบด้วย การประเมินบลูวอเตอร์ การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อเดือน/วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อปี และการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ ดังสมการที่ 3, 4, 5, และ 6 โดยในการศึกษานี้ไม่มีทั้งกรีนวอเตอร์และเกรย์วอเตอร์ เนื่องจากไม่มีน้ำใช้ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการเพาะปลูกพืชในการผลิตน้ำประปา และไม่มีปริมาณน้ำจืดที่ต้องใช้ในการเจือจางหรือบำบัดน้ำเสียให้ได้ค่าตามมาตรฐานคุณภาพน้ำ

$$\text{Blue WF ของการผลิตไฟฟ้า} = \text{ปริมาณไฟฟ้า} \times \text{อัตราการใช้ไฟฟ้าต่อการผลิตไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์} \quad (3)$$

$$\text{วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อเดือน (m}^3/\text{month)} = \text{บลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (m}^3/\text{month)} + \text{เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (m}^3/\text{month)} \quad (4)$$

$$\text{วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อปี (m}^3/\text{year)} = \text{บลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (m}^3/\text{year)} + \text{เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (m}^3/\text{year)} \quad (5)$$

$$\text{WF ของผลิตภัณฑ์} = \text{WF รายเดือนหรือรายปี (m}^3) / \text{ปริมาณน้ำประปาที่ไปถึงผู้ใช้รายเดือนหรือรายปี (m}^3) \quad (6)$$

3. วิเคราะห์ผลคุณภาพน้ำประปา เพื่อปรับปรุงระบบประปาหมู่บ้านให้ยั่งยืน โดยใช้ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำประปาของระบบประปาหมู่บ้าน ตามมาตรฐานเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ กรมอนามัย พ.ศ. 2563 โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2564 ณ ห้องปฏิบัติการสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6 พารามิเตอร์ pH, Turbidity, Color, SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, Cl⁻, F⁻, TDS, Hardness, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Cd, Pb และห้องปฏิบัติการเอกชน พารามิเตอร์ As Hg TCB, *E.coli*

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

1.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำของระบบประปา

จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณการผลิตน้ำของระบบประปาหมู่บ้าน ใช้ค่า Emission Factor จากน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ผลิตโดยใช้น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน มีค่าเท่ากับ 0.2843 kgCO₂e/m³ จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก ปี 2563 โดยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากปริมาณการผลิตน้ำอยู่ในช่วง 1,008.70–17,251.32 kgCO₂e/m³

1.2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าของระบบประปา

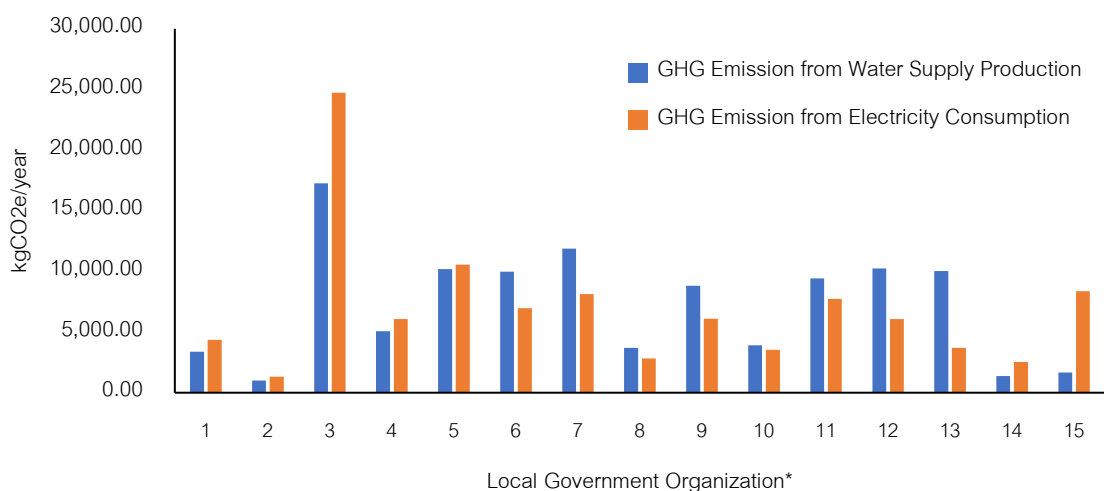
จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณไฟฟ้าของระบบประปาหมู่บ้าน ใช้ค่า Emission Factor ของ Electricity, grid mix (ไฟฟ้าแบบ grid mix ปี 2016–2018) มีค่าเท่ากับ 0.5986 kgCO₂e/kWh จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก ปี 2563 โดยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,333.68–24,720.98 kgCO₂e/kWh

โดยจาก Table 2 และ Fig. 2 องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านจำ หมู่ 4 (บ้านดอนมะตุ๊ก) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งจากการผลิตและการใช้ไฟฟ้ามากที่สุด ส่วนระบบประปาขององค์การบริหารส่วนตำบลบ้านจำ (ต้นสารภี) หมู่ 2 มีปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งจากการผลิตและการใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด เนื่องจากองค์การบริหารส่วนตำบลบ้านจำ หมู่ 4 (บ้านดอนมะตุ๊ก) เป็นระบบประปาขนาดใหญ่มาก มีจำนวนประชากรที่ได้รับบริการมากถึง 1,112 คน จึงมีการผลิตน้ำและ

ใช้ไฟฟ้าสูง ส่วนองค์การบริหารส่วนตำบลบ้านจำ (ต้นสารภี) หมู่ 2 มีปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นระบบประปาที่มีไว้สำรองในกรณีฉุกเฉิน จึงมีการสูบน้ำไว้ในคราวจำเป็นเท่านั้น

Table 2 Population of this study

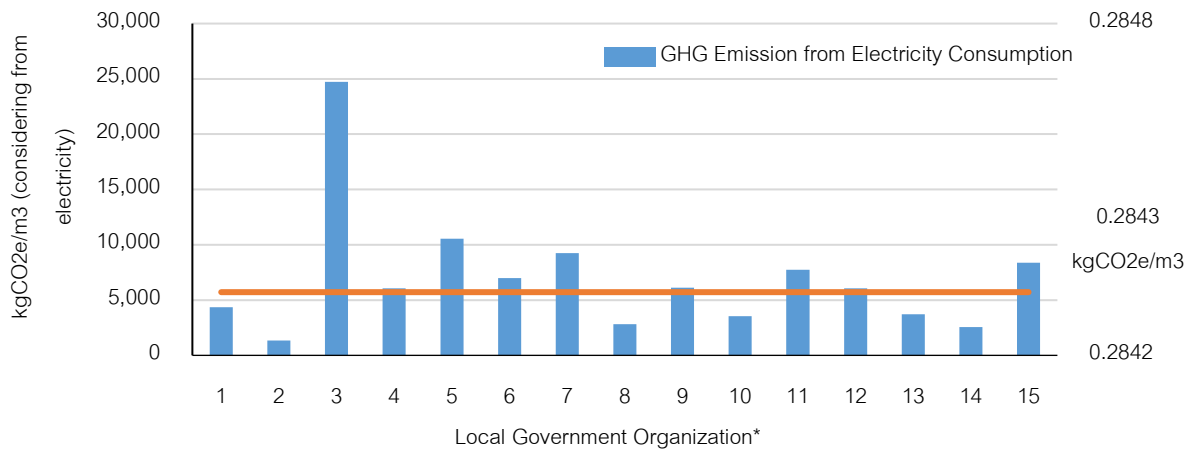
No.	Local Government Organization	Population
1	Ban Cha Village No.1	418
2	Ban Cha Village No.2 (Saraphi Tree)	410
3	Ban Cha Village No.4 (Ban Don Ma Duk)	1,112
4	Ban Cha Village No.6 (Nongkrata)	601
5	Promburi Village No.1 (Buddhists Association)	291
6	Promburi Village No.1 (Sa La Mae Ban)	288
7	Promburi Village No.3 (Subdistrict Health Promotion Hospital)	304
8	Promburi Village No.3 (Promburi Temple)	138
9	Promburi Village No.5 (Drinking Water Plant)	96
10	Promburi Village No.5 (Che Pa Temple)	116
11	Promburi Village No.5 (Amphawan School)	79
12	Promburi Village No.6 (Ban Bang Pra Tun)	339
13	Tha Ngam Village No.9 (Ban Pla Lai)	405
14	Chak Si Village No.2	560
15	Hua Phai Village No.10	321



*Local Government Organization from Table 2

Fig. 2 Greenhouse gas emissions from village water supply system

จาก Fig. 3 ข้อมูลปริมาณไฟฟ้าของระบบประปาหมู่บ้าน ที่ใช้ค่า Emission Factor ของ Electricity, grid mix (ไฟฟ้าแบบ grid mix ปี 2016–2018) มีค่าเท่ากับ 0.5986 kgCO₂e/kWh จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก ปี 2563 เปรียบเทียบกับค่าคงที่ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำของระบบประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ผลิตโดยใช้น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน เท่ากับ 0.2483 kgCO₂e/m³ ซึ่งเป็นค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามเงื่อนไขเฉพาะของการผลิตน้ำประปา จะเห็นได้ว่าระบบประปาขององค์การบริหารส่วนตำบลบ้านจำ หมู่ 4 (บ้านดอนมะตูม) หมู่ 6 (หนองกระทะ), เทศบาลตำบล พรหมบุรี หมู่ 1 (พุทธภิณฑลสมาคม), พรหมบุรี หมู่ 1 (ศาลาแม่บ้าน), พรหมบุรี หมู่ 3 (รพ.สต.), พรหมบุรี หมู่ 5 (โรงเรียนวัดใหม่), พรหมบุรี หมู่ 5 (ร.ว.วัดอัมพวัน), พรหมบุรี หมู่ 5 (บ้านบางประทุน) และองค์การบริหารส่วนตำบลหัวไผ่ หมู่ 10 นั้นมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาพรวมของระบบประปาแต่ละระบบสูงกว่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำ ซึ่งเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาพรวมของประเทศ



*Local Government Organization from Table 2

Fig. 3 Greenhouse gas emissions from water supply production and electricity consumption

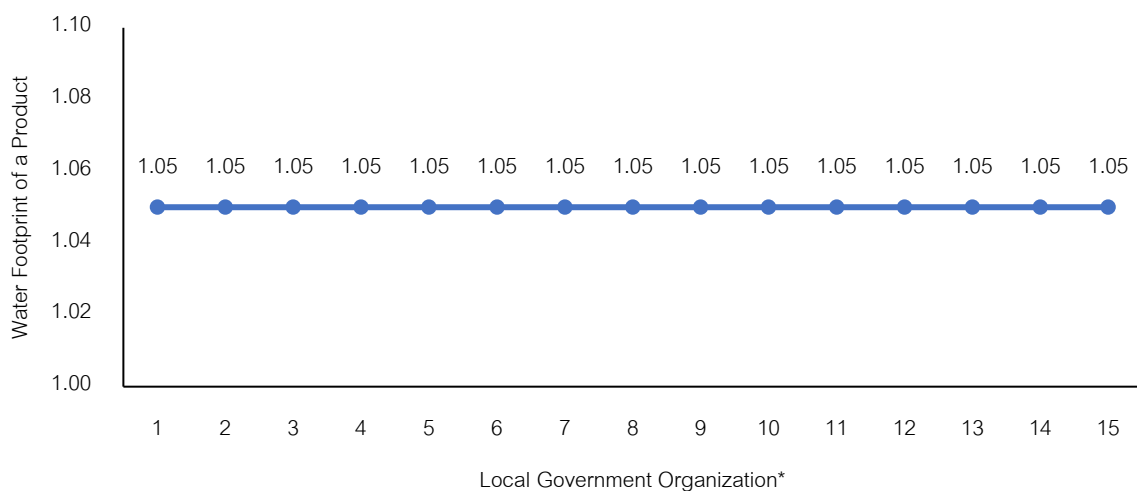
1.3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้สารเคมีของระบบประปา

เนื่องจากระบบประปาหมู่บ้านทั้ง 15 ระบบ ไม่ได้ใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตจึงไม่มีข้อมูลมาใช้ในการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จึงไม่มีฟุตพริ้นท์จากสารเคมีเกิดขึ้น เนื่องจากไม่เป็นที่นิยม แต่ถ้าหากมีการใช้สารเคมีในระบบประปาจะเป็นการเพิ่มฟุตพริ้นท์ให้มากขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรค ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น

2. การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

ในการคำนวณบวอเตอร์ค่านวนจากผลรวมของปริมาณน้ำประปาที่ผลิตได้จากข้อมูลในพื้นที่ ปริมาณน้ำสูญเสีย (Water Loss) และปริมาณบวอเตอร์แฝงจากสารขาเข้า ได้แก่ ไฟฟ้า โดยใช้ค่า Emission factor ในการผลิตไฟฟ้า ประเภท Grid Mixed ในประเทศไทยจากสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2563 เท่ากับ 0.0039 m³/kWh มารวมเป็นบวอเตอร์รวมในหน่วย m³/year โดยจากข้อมูลของระบบประปาของจังหวัดสิงห์บุรี นั้นไม่ได้ประเมินปริมาณน้ำสูญเสีย จึงได้นำข้อมูลอัตราน้ำสูญเสียสำหรับสาธารณูปโภคขนาดเล็กของประเทศญี่ปุ่น เท่ากับร้อยละ 5 (Ministry of Health, Labor and Welfare, 2011) มาใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำสูญเสีย และจากการคำนวณแก็วอเตอร์ในการผลิต น้ำประปา พบว่าค่าแก็วอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากไม่มีปริมาณน้ำจืดที่ต้องใช้ในการ

เจ็อบจหรือบำบัดน้ำเสียให้ได้ค่าตามมาตรฐานคุณภาพน้ำ ดังนั้นผลรวมของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จึงเป็นค่าบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เท่านั้น โดยมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมดเท่ากับ 399,215.19 m³ และเมื่อพิจารณา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์จากระบบประปา 15 ระบบ พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.05 ดัง Fig. 4 ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้ไปในกระบวนการต่างๆ รวมถึงเป็นน้ำที่สูญเสียและน้ำที่แฝงอยู่ในสารขาเข้าที่ถูกใช้ในการผลิตน้ำประปา คิดเป็น 72.9 m³/cap/year ซึ่งปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยทั่วโลกอยู่ที่ 1,240 m³/cap/year (Hoekstra and Chapagain, 2006) จะเห็นได้ว่าระบบประปาของจังหวัดสิงห์บุรี ทั้ง 15 ระบบ มีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์คิดเป็นร้อยละ 4.36×10^{-6} ของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของโลก โดยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของโลกอยู่ที่ประมาณ 9×10^{12} tons/year



*Local Government Organization from Table 2

Fig. 4 Water footprint of a product

3. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำประปาจากระบบประปาหมู่บ้าน

จาก Table 3 พบว่ามีพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดแล้วเกินเกณฑ์มาตรฐาน 9 พารามิเตอร์ ได้แก่ Turbidity, TDS, Hardness, Fe, Mn, As, Pb, TCB และ *E. coli* หากได้รับสารเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นควรมีการบริหารจัดการให้คุณภาพน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน

Table 3 Results of Water Quality Analysis

	Results								
	Turbidity	TDS	Hardness	Fe	Mn	Pb	As	TCB	<i>E. coli</i>
Local Government Organization	(≤ 5 NTU)	(≤ 500 mg/L)	(≤ 300 mg/L)	(≤ 0.3 mg/L)	(≤ 0.3 mg/L)	(≤ 10 μ g/L)	(≤ 0.01 mg/L)	(not detected)	(not detected)
Ban Cha Village No.1					0.48			3.6	3.6
Ban Cha Village No.2	38.5			4.62	0.62		0.0122		
Ban Cha Village No.6							0.0161		
Hua Phai Village No.10			333.5			13.53			
Chak Si Village No.2						12.33			
Promburi Village No.1						10.73		23	2.2
Promburi Village No.3		644	382.5			15.68		16	
Promburi Village No.5 (Amphawan School)								5.1	
Promburi Village No.5 (Drinking Water Plant)		606	332			12.59			
Promburi Village No.5 (Che Pa Temple)		674	365			10.85		2.2	1.1
Tha Ngam Village No.9 (Ban Pla Lai)								2.2	2.2

สรุป

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำอยู่ในช่วง 1,009–17,251 kgCO₂e/ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7,194 kgCO₂e/ปี การใช้ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,334-24,721 kgCO₂e/ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6,493 kgCO₂e/ปี โดยระบบประปาขององค์การบริหารส่วนตำบลบ้านจำ หมู่ 4 (บ้านดอนมะตูม) มีปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เนื่องจากเป็นระบบประปาขนาดใหญ่มาก มีจำนวนประชากรที่ได้รับบริการมากถึง 1,112 คน จึงมีการผลิตน้ำและใช้ไฟฟ้าสูง ส่วนองค์การบริหารส่วนตำบลบ้านจำ (ต้นสารภี) หมู่ 2 มีปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นระบบประปาที่มีไว้สำรองในกรณีฉุกเฉิน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์จากระบบประปา 15 ระบบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.05 ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้ไป รวมถึงเป็นน้ำที่สูญเสียและน้ำที่แฝงอยู่ในสารขาเข้าที่ถูกใช้ในการผลิตน้ำประปา คิดเป็น 72.9 m³/cap/year และจะเห็นได้ว่าระบบประปาทั้ง 15 ระบบ มีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์คิดเป็นร้อยละ 4.36×10⁻⁶ ของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของโลก

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดแล้วเกินเกณฑ์มาตรฐาน 9 พารามิเตอร์ ได้แก่ Turbidity, TDS, Hardness, Fe, Mn, As, Pb, TCB และ *E. coli* หากได้รับสารเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นควรมีการบริหารจัดการให้คุณภาพน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดสิงห์บุรี สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6 (นนทบุรี) และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การอนุเคราะห์และสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมการปกครองส่วนท้องถิ่น. 2563. มาตรฐานระบบน้ำสะอาด. <http://www.dla.go.th>.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2563. “ลดโลกร้อน” ด้วยตัวเรา. [http://www.eppo.go.th/Information_service/Publication/Knowledge/greenearth.pdf](http://www.eppo.go.th/Information_service/Publication/Knowledge/greeneearth.pdf)

องค์การกองทุนสัตว์ป่าโลกสากล. 2560. สถานการณ์น้ำจืดของโลกและประเทศไทย. http://www.wwf.or.th/what_we_do/wetlands_and_production_landscape/freshwater,

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. 2563. ค่า Emission Factor โดยแบ่งตามประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม. http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_117a1351b6.pdf, 20 ตุลาคม 2563.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K. 2006. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resour. Manag.* 21: 35–48.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan Ltd, London, UK.

Ministry of Health, Labor and Welfare. 2011. *Waterworks technologies in Japan*, https://www.mhlw.go.jp/english/policy/health/water_supply/8.html.

การพัฒนาและทดสอบแนวคิดของการบำบัดน้ำปนเปื้อนไนเตรตด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส

Concept development and testing of water treatment contaminated with nitrate by using electrolysis method

อุภัยภัทร บัวงาม^{a,*}, นันทกาญจน์ มุรติต^{a,b}, พิศาล สุขวิสูตร^c

Upaipat Buangam^{a,*}, Nantakan Muensit^{a,b}, Pisan Sukwisute^c

^aหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

^bสาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

^cภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

^aScience for Industry Program Faculty of Science Prince of Songkla University, Songkla 90110, Thailand

^bPhysical Science Faculty of Science Prince of Songkla University, Songkla 90110, Thailand

^cDepartment of Physics Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

10520, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: reen_buangam@live.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาการบำบัดไนเตรต (NO_3^-) ในน้ำด้วยวิธีการทางอิเล็กโทรไลซิสทำปฏิกิริยารีดักชันไนเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจนซึ่งได้ทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่การไหลแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลเดียวกันคือ 0.79 L/min ในการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์สำหรับการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่เท่ากับ 3 mA/cm² ความต่างศักย์เท่ากับ 5 V ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 นาที ระยะห่างระหว่างแผ่น 0.5 cm และจำนวนแผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้คือ 12 แผ่น ทั้งนี้ตัวอย่างน้ำจะต้องผ่านการกรองด้วยความละเอียด 12 μm ก่อนผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจากการทดสอบน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณไนเตรตเริ่มต้นที่ 100 mg/L บำบัดไนเตรตเหลือ 63.7 mg/L น้ำเสียชุมชนปริมาณไนเตรตเริ่มต้น 15.4 mg/L เหลือ 5.2 mg/L หรือคิดเป็นร้อยละ 66 และที่ความเข้มข้นสูงไนเตรตขึ้นได้รับการบำบัดร้อยละ 49

คำสำคัญ: กระบวนการบำบัดไม่ใช้สารเคมี, ไนเตรต, น้ำเสีย, อิเล็กโทรไลซิส

Abstract

This research aims to study and develop nitrate (NO_3^-) treatment by using electrolysis method, nitrate was reduced to nitrogen gas. The experiments were conducted for synthetic and real wastewater with the same continuous flow at a flow rate of 0.79 L/min. In order to determine the parameters for electrochemical reaction of nitrate removal, the optimal conditions are the current density of 3 mA/cm², a potential difference of 5 V, a retention time of 1 minute and an electrode spacing of 0.5 cm for the number of electrode plates of 12. Hence, all the sample water was undergone a coarse filter before the electrochemical process. From the study, the synthetic water contaminated with a nitrate of 100 mg/L was reduced to be 63.7 mg/L, wastewater from a source of community nitrate of 15.4 mg/L was reduced to be 5.2 mg/L or 66% and 48% for High Nitrate Concentration.

Keywords: Electrolysis, Nitrate, Non-chemical water treatment, Wastewater

คำนำ

ไนเตรตคือของเสียทางเคมีชนิดหนึ่งส่วนใหญ่จะมีอยู่ในแหล่งน้ำชุมชนสามารถก่อให้เกิดปัญหา Eutrophication ที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตบริเวณแหล่งน้ำได้ (Guo et al., 2020) ไนเตรตนั้นได้ถูกควบคุมในมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวงให้มีปริมาณไนเตรตไม่เกิน 50 mg/L (การประปานครหลวง, 2563) และควบคุมตามมาตรฐานน้ำเสียชุมชนของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมให้มีค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) ไม่เกิน 20 mg/L (ค่าไนโตรเจนทั้งหมดจะประกอบไปด้วย 4 ค่า คือ สารอินทรีย์ไนโตรเจน, แอมโมเนีย (NH_3), ไนไตรต์ (NO_2^-), ไนเตรต (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) จากงานวิจัยที่ศึกษามาพบว่าระบบไฟฟ้าเคมีมีอิเล็กโทรไลซิสมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรตและมีข้อดีในการใช้เวลาในการบำบัดน้อยไม่ต้องเพิ่มสารเคมีในการทำปฏิกิริยา โดยเงื่อนไขที่เลือกวัสดุมาใช้เป็นอิเล็กโทรดคือเป็นวัสดุที่มีทั่วไปและหาได้ง่าย ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้ศึกษามานั้นวัสดุที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันไนเตรตได้กว่า 87% และเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจนกว่า 90% ในรูปแบบแบตช์ (Batch Electrolysis) กับน้ำเสียสังเคราะห์ (Synthesis Water) ในเวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที คืออลูมิเนียมที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดทั้งแคโทดและแอโนด (Guo et al., 2020) ซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ได้มีการทำการทดลองบำบัดไนเตรตด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสเพื่อพัฒนาให้ระบบอิเล็กโทรไลซิสเหมาะกับการนำไปใช้งานมากขึ้นโดยใช้วิธีคือ โดยทำการทดลองการไหลรูปแบบต่อเนื่อง (Continuous Flow) กำหนดให้ใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่ 1 นาที โดยเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงจะต้องมีการปรับตัวแปรอื่นที่มีความเกี่ยวข้องกับอัตราการบำบัดตามระยะเวลาการบำบัดที่ลดลงได้แก่ 1. ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolves Solids ; TDS) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำเนื่องจากค่า TDS มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) (Rusydi et al., 2020) ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเพราะกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยผ่านขั้วอิเล็กโทรดลงในน้ำซึ่งถ้ามีความนำไฟฟ้า ค่า TDS มากกระแสไฟฟ้าจะผ่านได้ดีการเกิดปฏิกิริยาได้มาก 2. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้จะส่งผลต่อความเร็วของประจุและจะต้องเหมาะสมกับสมการเพื่อเปลี่ยนไนเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจน 3. จำนวนแผ่นอิเล็กโทรดจะมีผลกับการทำปฏิกิริยาเนื่องจากการเพิ่มจำนวนแผ่นจะเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาให้มากขึ้นเกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มมากขึ้น 4. จำนวนครั้งที่ผ่านระบบอิเล็กโทรไลซิสโดยวนน้ำที่ผ่านการบำบัดไปบำบัดอีกครั้งหนึ่งเพื่อเพิ่มการบำบัดไนเตรต 5. ระบบกรองเพื่อกรองตะกอนที่อาจรบกวนการทำปฏิกิริยาออกจากตัวอย่างน้ำซึ่งตัวแปรทั้งหมดจะนำไปทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อควบคุมตัวแปรในการทดลองหลังจากที่ทำการทดสอบกับแต่ละตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแล้วจึงนำค่าตัวแปรที่ได้ไปทดสอบกับน้ำเสียชุมชนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณไนเตรต 200 mg/L ในตัวอย่างน้ำ 10 L โดยใช้ไนเตรตจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ซึ่งให้ได้น้ำหนัก 4.891 g ใส่ลงในน้ำประปาปริมาตร 10 L จากนั้นคนเพื่อผสมน้ำกับสารละลายจะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาตรไนเตรต 200 mg/L

การวัดค่าความเข้มข้นไนเตรต

การวัดค่าความเข้มข้นของไนเตรตใช้วิธีการวัดความเข้มของสีเทียบเป็นความเข้มข้นของไนเตรต (Colorimeter) หลังจากที่มีการเติมแคดเมียม (Cd) ลงไปในน้ำที่มีไนเตรตเรียกว่า กระบวนการแคดเมียมรีดักชัน (Cadmium Reduction) โดยใช้เครื่อง HANNA Nitrate Portable Photometer รุ่น HI 96786 ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0–100 mg/L ซึ่งมีขั้นตอนการวัดโดย

ใช้คิวเวตใส่ตัวอย่างปริมาตร 10 mL แล้วเติมแคดเมียมลงไปผสมกับน้ำเสียแล้วทำการเขย่าแคดเมียมจะละลายในตัวอย่างน้ำเปลี่ยนเป็นสีเหลืองโดยที่ความเข้มของสีขึ้นอยู่กับปริมาณของไนเตรตจากนั้นจึงใส่ตัวอย่างที่จะวัดลงในเครื่อง จากนั้นเครื่องจะจับเวลา 5 นาที (Hanna Instruments, 2021) แล้วแสดงความเข้มข้นไนเตรต ในหน่วย mg/L



Fig. 1 Process Measurement of Concentration of Nitrate (A) Cadmium Reagent (B) Water Sample Color Changed to Yellow (C) HANNA Nitrate Portable Photometer

ส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส

ส่วนประกอบของระบบอิเล็กโทรไลซิสขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบการบำบัดไนเตรตให้เป็นขั้วอลูมิเนียมเกรด 1100 ทั้งแคโทดและแอโนด ขนาด 8×10 cm จำนวน 12 แผ่น วางห่างกัน 0.5 cm อยู่ในกล่องอคริลิกปริมาตร 1L น้ำจะมีการไหลแบบต่อเนื่อง ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 นาที

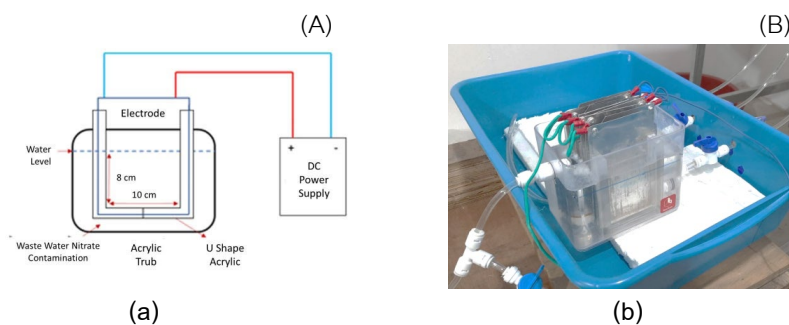


Fig. 2 Electrolysis Process (A) Diagram Electrolysis Setup (B) the Experimental Setup

ขั้นตอนการบำบัดไนเตรต

ขั้นตอนการบำบัดเริ่มต้นจากการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงมาผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองขนาดความละเอียด $12 \mu\text{m}$ จึงผ่านระบบอิเล็กโทรไลซิสและผ่านการกรองอีกครั้งด้วยขนาด รูพรุน $2.5 \mu\text{m}$ เพื่อบำบัดตะกอนอลูมิเนียมที่กรองออกมาจากระบบอิเล็กโทรไลซิส ก่อนที่จะผ่านไประบบอื่นๆ ต่อไปโดยมีการทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง การทดลองจากตัวอย่างน้ำเดียวกันซึ่งระบบการบำบัดมีขั้นตอนดังนี้

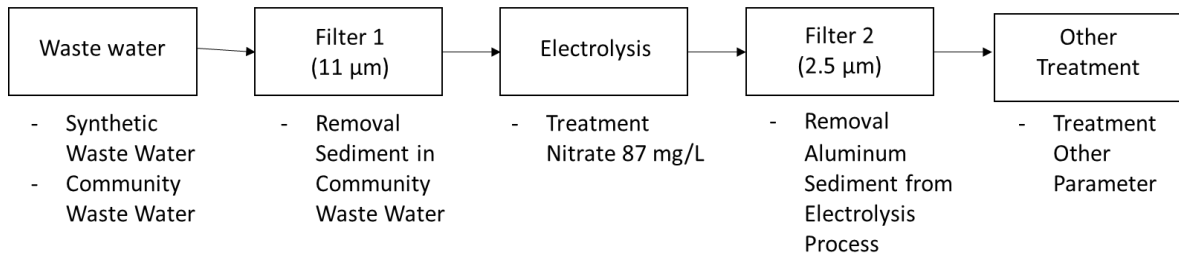


Fig. 4 Nitrate Treatment Process Waste Water to filter 11 µm to Electrolysis Process to Filter 2.5 µm and to Other Treatment

วิธีการทดสอบบำบัดในเตรตด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส

การทดสอบบำบัดในเตรตด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อหาเงื่อนไขในการบำบัดกับการทดสอบและการบำบัดกับน้ำเสียจริง โดยมีการทดลองดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolves Solids ; TDS) กับแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า TDS กับแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะกำหนดแรงดันไฟฟ้าในการบำบัดตามชนิดและคุณภาพของน้ำที่นำมาบำบัดโดยใช้ค่า TDS เป็นค่าที่กำหนด สำหรับการทดสอบใช้น้ำเสียที่เก็บจากบริเวณฟาร์มหมู มีความสกปรกมากค่า TDS ถึง 7,500 mg/L มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่า TDS ลงที่ละ 250 mg/L เพื่อที่จะจำลองคุณภาพของน้ำที่จะบำบัดจากน้ำที่สกปรกมากที่สุดไปยังน้ำที่มีความสะอาดที่สุด จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าและวัดค่าความต่างศักย์ในระหว่างการบำบัดเพื่อที่จะให้ได้ช่วงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TDS กับค่าแรงดันไฟฟ้าแต่ละค่า

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแผ่นกับอัตราการบำบัดในเตรต

การทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดในเตรตโดยใช้วิธีการเพิ่มจำนวนแผ่นที่ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยมีวิธีการ คือ ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ในเตรตที่ประมาณ 100 ppm อัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 120 mL/นาที ทำการเพิ่มและลดจำนวนแผ่นอิเล็กโทรดอยู่ที่ 4, 8, 12 แผ่น เพื่อดูผลของการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 1 นาที ใช้แรงดันไฟฟ้าคือ 5v

การเพิ่มอัตราการบำบัดในเตรตโดยเพิ่มจำนวนครั้งในการทำปฏิกิริยา

การทดสอบทำเพื่อดูประสิทธิภาพการบำบัดในเตรตโดยใช้วิธีการเพิ่มจำนวนครั้งที่แผ่นที่ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ได้ในเตรตที่ประมาณ 100 ppm เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดในเตรตเพิ่มมากขึ้นจึงทำการปล่อยให้น้ำไหลผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส 1, 2, และ 3 ครั้ง ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5v เพื่อดูผลของการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 1 นาที

การทดสอบระหว่างระบบที่มีการกรองกับไม่มีการกรอง

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่มีการกรองและไม่มีการกรองโดยการใช้ น้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นของไนเตรต 100 mg/L แบ่งตัวอย่างน้ำออกเป็น 2 ตัวอย่างคือ ตัวอย่างที่ 1 เป็นระบบที่ผ่านการกรองก่อนผ่าน

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และตัวอย่างที่ 2 เป็นระบบที่ไม่ผ่านการกรองก่อนผ่านระบบอิเล็กทรอนิกส์ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5v โดยที่กำหนดตัวแปรอื่นๆเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบว่าควรใส่ระบบกรองก่อนจะผ่านกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์หรือไม่

การทดสอบกับน้ำเสียจริง

การทดลองใช้แหล่งตัวอย่างน้ำ 2 ตัวอย่างจากน้ำเสียชุมชนคือ 1. น้ำดิบที่เก็บตัวอย่างมาจากชุมชนมีความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ 15.4 mg/L และ 2. น้ำเสียชุมชนที่ทำการเติมความเข้มข้นไนเตรตเข้าไปให้สูงขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 258.8 mg/L เพื่อดูผลการทดลองที่ความเข้มข้นไนเตรตสูงมากขึ้นจึงเติมไนเตรตเข้าไปด้วยสารโพแทสเซียมไนเตรต การทดสอบได้มีการสุ่มตัวอย่างน้ำเสียจากบริเวณคลองลาดพร้าว บริเวณชุมชนลาดพร้าว 101 ทดสอบบำบัดไนเตรตภายใต้เงื่อนไขจากการทดลองก่อนหน้า สำหรับน้ำเสียจริงจะมีส่วนประกอบของแอมโมเนียและไนไตรต์ด้วยจึงทำการวัดค่าเปรียบเทียบสำหรับน้ำเสียจริงนั้นจะมีองค์ประกอบของสารอื่นๆประกอบอยู่ด้วยเช่น แอมโมเนีย ไนไตรต์ ฟอสเฟต หรือสารอื่นๆที่สามารถละลายอยู่ในน้ำเสียได้ซึ่งจะรวมออกมาเป็นค่า TDS ดังนั้นค่า TDS ของตัวอย่างที่เป็นน้ำเสียจริงจะสูงกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความนำไฟฟ้าสูงกว่าและคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดได้ดีกว่า

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TDS กับแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดลองที่ได้ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TDS กับแรงดันไฟฟ้าได้คือช่วง TDS 250–1,250 mg/L แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 15–1.3 v มีความชันกราฟ เท่ากับ -0.004179 ผลการทดลองนั้นค่า TDS กับ ความต่างศักย์มีค่าสัมพันธ์กันอันเนื่องมาจากค่า TDS มีความสัมพันธ์กับค่า Conductivity ของน้ำและค่า Conductivity นี้เป็นตัวแปรที่กำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าซึ่งค่ากระแสนี้นั้นจะไปมีผลกับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นถ้าตัวอย่างน้ำเปลี่ยนไปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนค่าไป

นั่นเป็นน้ำประปาที่เติมไนเตรตเข้าไปทำให้มีค่า TDS ประมาณ 700 ppm ซึ่งตรงกับช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ 5V จึงนำค่าที่ได้มาใช้บำบัดไนเตรตกับน้ำเสียสังเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TDS และแรงดันไฟฟ้าแสดงใน Fig 7A

ความสัมพันธ์จำนวนแผ่นกับอัตราการบำบัดไนเตรต

จากผลการทดลองพบว่าจำนวนแผ่นที่มากที่สุดที่ 12 แผ่นสามารถบำบัดไนเตรตได้ดีที่สุดจากปริมาณไนเตรตเริ่มต้นที่ 98.1 mg/L เหลือปริมาณไนเตรตเท่ากับ 33.2 mg/L จึงสรุปผลการทดลองได้ว่าจำนวนแผ่นมีผลต่ออัตราการบำบัดถึงจำนวนแผ่นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เป็นการพื้นที่ทำปฏิกิริยาให้มากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้นบำบัดไนเตรตได้มากขึ้น ผลการทดลองแสดงใน Fig 7B

การเพิ่มอัตราการบำบัดไนเตรตโดยเพิ่มจำนวนครั้งในการทำปฏิกิริยา

จากผลการทดลองพบว่าการทำปฏิกิริยาที่ 3 ครั้งจะทำให้บำบัดไนเตรตได้เพิ่มมากขึ้นแต่ในการทำปฏิกิริยาครั้งแรกนั้นไนเตรตมากลดลงที่คือจากไนเตรตเริ่มต้นที่ 85.2 mg/L เหลือไนเตรตหลังจากผ่านไปครั้งที่ 1 เท่ากับ 40.1 mg/L โดยที่เมื่อผ่านครบ 3 ครั้งเหลือปริมาณไนเตรต 35.2 mg/L เพราะเมื่อน้ำผ่านการบำบัดไปแล้วความเข้มข้นของไนเตรตลดลง

รวมถึงค่า TDS ของน้ำก็จะลดลงดังนั้นในการบำบัดครั้งถัดไปอัตราการบำบัดจึงลดลงไปด้วยประกอบกับการเพิ่มจำนวนครั้งเข้าไปมีความสิ้นเปลืองพลังงานและวัสดุมากขึ้นใช้การบำบัดในเตรตเพียง 1 ครั้ง ผลการทดลองแสดงใน Fig 7 (c)

การทดสอบระหว่างระบบที่มีการกรองหยาบกับไม่มีการกรอง

ผลการทดสอบพบว่าระบบที่มีการกรองสามารถบำบัดในเตรตใกล้เคียงกับระบบที่ไม่มีการกรองโดยระบบที่มีการกรองจากในเตรตเริ่มต้นที่ 100 mg/L บำบัดในเตรตเหลือ 63.7 mg/L ส่วนระบบที่ไม่ผ่านการกรองในเตรตเริ่มต้นที่ 100 mg/Lg เหลือในเตรตอยู่ที่ 64.7 mg/L แต่การที่กรองตะกอนในน้ำเสียออกจนหมดช่วยให้การไหลของน้ำภายในระบบดีขึ้น รวมทั้งยังช่วยบำบัดน้ำทางกายภาพไปด้วยจึงใส่ระบบการกรองก่อนที่จะผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ดังแสดงใน Fig 7D

การทดสอบกับน้ำเสียจริง

- น้ำเสียชุมชน ปริมาณไนเตรตเริ่มต้น 15.6 mg/L นำมาผ่านระบบอิเล็กโทรไลซิสที่ออกแบบ พบว่าเหลือไนเตรตอยู่เท่ากับ 5.2 mg/L หรือคิดเป็นร้อยละที่บำบัดได้เท่ากับ 66.7 % โดยที่แอมโมเนียมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 17.9 mg/L เป็น 18.7 mg/L คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 4.2% ดังแสดงใน Fig 8A

- น้ำเสียชุมชนผลการทดสอบหลังผ่านระบบอิเล็กโทรไลซิสปริมาณไนเตรตที่วัดได้ลดลงจากเดิมเท่ากับ 258.8 mg/L เหลือไนเตรตอยู่เท่ากับ 132.4 mg/L หรือคิดเป็นร้อยละที่บำบัดได้เท่ากับ 48 % โดยแอมโมเนียมีการเพิ่มขึ้นจาก 23 mg/L เป็น 24 mg/L การที่แอมโมเนียมีการเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากผลของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสตามสมการ $\text{No}_3^- + 6\text{H}_2\text{O} + 8\text{e}^- \rightarrow \text{NH}_3 + 9\text{OH}^-$ ซึ่งตามสมการไนเตรตรับ 6 อิเล็กตรอนเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้สำหรับผลการทดลองแสดงใน Fig 8 (b)

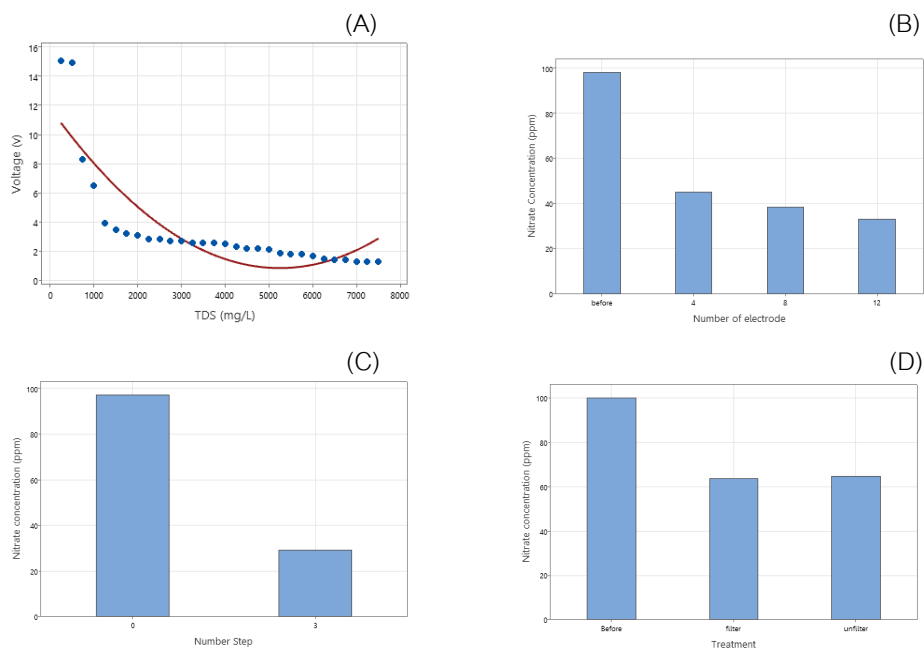


Fig. 7 Sorting Picture Resulting Experiment Concentration Nitrate Treatment (A) Relationship of Nitrate with TDS (B) Relationship of Nitrate with Number of Electrode (C) Relationship of Nitrate with Number of the step of Electrolysis (D) Relationship of Nitrate Concentration in Filtered and Unfiltered Processes

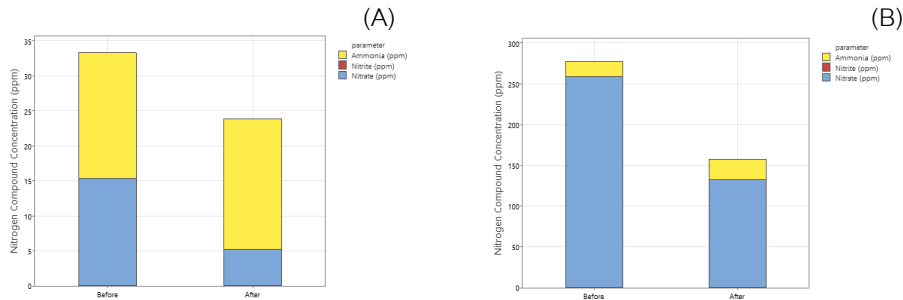


Fig. 8 Total Nitrogen in Electrolysis Treatment from (A) Community Wastewater (B) Community Wastewater Nitrate High Concentration

สรุป

จากการทดสอบแนวคิดและพัฒนากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสในการบำบัดไนเตรตพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสนั้นสามารถบำบัดไนเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากระบบการต่างๆ ในการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. สามารถกำหนดแรงดันไฟฟ้าจากความสัมพันธ์กับค่า TDS ได้ซึ่งในน้ำเสียสังเคราะห์จะใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5v จึงนำค่าที่ได้ไปทดสอบในส่วนอื่นๆ ต่อไป
2. จำนวนแผ่นมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรต คือ ถ้าจำนวนแผ่นมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจะมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสเพิ่มมากขึ้นทำให้บำบัดไนเตรตได้ดีขึ้น
3. การเพิ่มจำนวนครั้งในการบำบัดมีผลช่วยให้บำบัดไนเตรตได้ดีขึ้นแต่เนื่องจากว่าอัตราในการลดลงของไนเตรตได้เพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อยจึงใช้การบำบัดเพียงหนึ่งครั้งเพราะมีอัตราการลดลงของไนเตรตสูงที่สุด
4. ระบบกรองมีส่วนทำให้ระบบอิเล็กโทรไลซิสบำบัดได้ดีขึ้นและยังช่วงให้การไหลของน้ำภายในระบบสะดวกยิ่งขึ้นจึงควรมีระบบกรองก่อนที่จะผ่านระบบ
5. หลังจากที่ได้มีการออกแบบระบบทั้งหมดจึงนำไปใช้ในการบำบัดกับน้ำเสียจริง 2 ตัวอย่างคือน้ำชุมชนกับน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นไนเตรตสูง ซึ่งทั้ง 2 ตัวอย่างมีอัตราการบำบัดที่แตกต่างกันคือ น้ำเสียชุมชนมีอัตราการบำบัดอยู่ที่ 66% และน้ำเสียชุมชนมีความเข้มข้นไนเตรตสูงอัตราการบำบัดเท่ากับ 48% ต้นแบบที่ได้จะนำไปพัฒนาในระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการแพลตฟอร์มการศึกษาระดับปริญญาโท และการวิจัยพัฒนานวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม (Triple helix master degree integrated platform for research, development and innovation in industry) ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วย บริหารและจัดการทุน หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนา สถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.)

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน. ราชกิจจานุเบกษา, (27). มาตรฐานน้ำเสียชุมชน.

การประปานครหลวง. 2560. เกณฑ์กำหนดคุณภาพน้ำประปา, เกณฑ์กำหนดคุณภาพน้ำประปาการประปานครหลวง 2560. https://web.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=33082

Rusydi, A. F. 2018. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A Review. Global Colloquium on GeoSciences and Engineering doi:10.1088/1755-1315/118/1/012019

HANNA instrument. 2021. Instruction Manual HI96786C Nitrate ISM. HANNA-HI96786.pdf

Guo, M., Feng, L., Liu, Y., Zhang, L. 2020. Electrochemical simultaneous denitrification and removing phosphorus from the effluent of municipal wastewater treatment plant using cheap metal electrodes. Environ Sci-Wat Res. 2020:1095–1105. doi: 10.1039/D0EW00049C

อิทธิพลของเวลาและปริมาณ Materials Institute Lavoisier-88A (MIL-88A) ในการบำบัดซีไอดีจากน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟนตันแบบอากาศประยุกต์

The influence of reaction time and amount of Materials Institute Lavoisier-88A (MIL-88A) for the treatment of COD from coolant oil by Modified Air-Fenton process

ขวัญฤดี สุวรรณสังข์^๑, วรพจน์ กนกกันตพงษ์^{๑,*}, สุเมธ วงศ์เชียว^๒

Kwanruedee Suwannasung^๑, Vorapot Kanokkantapong^{๑,*}, Sumeth Wongkiew^๒

^๑หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^๒ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

^๑Interdisciplinary Program in Environmental Science, Faculty of Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

^๒Department of Environmental Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: vorapot.ka@chula.ac.th

บทคัดย่อ

น้ำมันหล่อเย็นจากอุตสาหกรรมยานยนต์จะมีสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ทำให้น้ำเสียมีค่าซีไอดีสูงถึงประมาณ 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของเวลา (30–180 นาที) และปริมาณ MIL-88A (0.2–1 กรัม) ในการบำบัดซีไอดีจากน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟนตันแบบอากาศประยุกต์ โดยออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดซีไอดีจากน้ำมันหล่อเย็น ซึ่งพบว่าการเพิ่มเวลาและปริมาณ MIL-88A ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีจากน้ำมันหล่อเย็นสูงขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดซีไอดีจากน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ 5% ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอช 9 ด้วยการเติมอัตราการไหลเวียนอากาศ 2 ลิตรต่อนาที คือ ใช้ MIL-88A ปริมาณ 1 กรัม เป็นเวลา 144 นาที ซึ่งสามารถบำบัดซีไอดีได้ 92.86% และเมื่อทดลองซ้ำในสภาวะเดียวกันพบว่าสามารถบำบัดซีไอดีได้ 93.06% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่โปรแกรมคาดการณ์ไว้

คำสำคัญ: การทดลองแบบส่วนประสมกลาง, การบำบัดน้ำเสีย, โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์

Abstract

Coolant oil from the automotive industry contains various types of additives, causing the wastewater to have a high chemical oxygen demand (COD) around 100,000 mg/L. This study investigated the influence of reaction time (30–180 min) and amount of MIL-88A (0.2–1 g) for COD treatment in coolant oil by modified air-Fenton (MAF). The experiments were designed by central composite design (CCD) and the results were analyzed by response surface methodology (RSM). It was found that increasing the reaction time and amount of MIL-88A resulted in higher treatment of COD in the coolant oil. For coolant oil 5% (50 mL), pH 9 with the addition of an airflow rate of 2 L/min, the optimum condition for COD treatment efficiency was 92.86% which occurred at 1 g of MIL-88A for 144 minutes. When repeated experiment under the same condition, it was found that COD treatment was 93.06% which was close to the prediction from program.

Keywords: Central composite design, Metal organic frameworks (MOFs), Wastewater treatment

คำนำ

อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีการใช้น้ำมันหล่อเย็น (Coolant oil) เพื่อลดการเสียดสีของผลิตภัณฑ์ขณะทำการบิด เจียร หรือตัดโลหะ น้ำมันหล่อเย็นมีส่วนประกอบของน้ำมันแร่ และสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เช่น สารลดแรงตึงผิว, สารยับยั้งการกัดกร่อน, และสารลดแรงเสียดทาน (Jagadevan et al., 2012) หากทิ้งลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการบำบัดอาจก่อให้เกิดโรคต่างๆ ต่อผู้รับสัมผัส เช่น โรคมะเร็ง, โรคผิวหนัง, โรคระบบทางเดินหายใจ และโรคอื่นๆ (Amin et al., 2017) โดยน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นอาจมีค่าซีไอดีสูงประมาณ 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ministry of Environment Republic of Korea, 2004) ซึ่งเหมาะกับกระบวนการบำบัดทางเคมี โดยกระบวนการเฟนตัน (Fenton process) เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide: H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งจะผลิตอนุมูลอิสระ เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical: $\cdot OH$) ที่สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้เกือบทั้งหมด (Neyens and Baeyens, 2003) ทั้งนี้ ในปัจจุบันกระบวนการเฟนตันถูกพัฒนาเป็นกระบวนการเฟนตันประยุกต์ (Modified Fenton processes) มีการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาโดยนำโลหะทรานซิชันชนิดอื่นมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทน (Cheng et al., 2018) อย่างไรก็ตามกระบวนการเฟนตันประยุกต์นี้ยังคงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษ และการใช้สารเคมีอันตรายอย่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ (Metal organic Frameworks: MOFs) เป็นตัวเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตันประยุกต์ได้ เนื่องจากโครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์นี้สร้างจากโลหะ เช่น นิกเกิล, โคบอลต์ หรือเหล็ก ร่วมกับสารอินทรีย์ เช่น กรดฟูมาริก หรือกรดเทเรพทาλικ ซึ่งโครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ที่ผลิตจากธาตุเหล็ก เรียกว่า Materials Institute Lavoisier หรือ MILs (Ye et al., 2020) ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความยืดหยุ่นเชิงโครงสร้างสามารถปรับรูปแบบเพื่อให้เหมาะกับการนำมาใช้งาน (Liang et al., 2015) ทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาล้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษ เช่น Liao et al. (2019) พบว่า MIL-88A สามารถบำบัดน้ำเสียฟีนอล 100% ภายใน 15 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ นอกจากนี้ Utset et al. (2000) ได้รายงานว่าออกซิเจนเป็นสารออกซิแดนซ์ราคาต่ำและสามารถทำหน้าที่แทนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟนตันได้ ซึ่งจะช่วยลดการใช้สารเคมีอันตรายด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ MIL-88A ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเฟอริกคลอไรด์และกรดฟูมาริก ในตัวทำละลายน้ำและเอทานอล ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการให้อากาศ ในกระบวนการเฟนตันแบบอากาศประยุกต์ (Modified Air-Fenton: MAF) เพื่อบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ โดยศึกษาปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ได้แก่ เวลา ปริมาณ MIL-88A ด้วยการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อเป็นกระบวนการทางเลือกแห่งอนาคตในการบำบัดน้ำเสียที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

น้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ชนิดน้ำมันผสมน้ำหรือโซลูเบิลคูลานต์ (Soluble Oil Coolant), กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 , 98%, Grade AR, Quality Reagent Chemical, New Zealand), โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$, 99%, Grade AR, KEMAUS, Australia), แอมโมเนียมเฟอรัสซัลเฟต ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$: FAS, >95%, Grade AR, Loba Chemie Pvt. Ltd.), โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$, 99%, Grade AR, KEMAUS, Australia), เมอคิวริกซัลเฟต ($HgSO_4$, 99%,

Grade AR, Quality Reagent Chemical, New Zealand), ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4 , 99%, Grade AR, Quality Reagent Chemical, New Zealand), 1,10-พีแนนโทรลิน ไฮเดรต ($\text{C}_{12}\text{H}_8\cdot\text{H}_2\text{O}$), Grade AR, Ajax Finechem), กรดฟูมาริก ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$, Grade AR, Sigma-Aldrich), เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Grade AR, Quality Reagent Chemical, New Zealand), เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 99%, Grade AR, Fulltime)

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา MIL-88A

งานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงวิธีการสังเคราะห์ MIL-88A จาก Fu et al. (2020) โดยนำกรดฟูมาริกละลายในเอทิลแอลกอฮอล์ และนำเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตละลายในน้ำกลั่น จากนั้นนำสารทั้งสองชนิดผสมกัน กวนด้วย Hotplate Stirrer ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ($30\pm 1^\circ\text{C}$) เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำสารที่ได้มาล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ และใส่เครื่องหมุนเหวี่ยง 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารละลาย และนำตัวเร่งปฏิกิริยามาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา MIL-88A เพื่อทำการทดลองขั้นต่อไป

ศึกษาเวลาและ MIL-88A ที่เหมาะสมในการบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็น

การศึกษาเวลาและ MIL-88A ที่เหมาะสมในการบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟนตันแบบอากาศประยุกต์นี้จะใช้ MIL-88A เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะใช้การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ช่วยในการออกแบบการทดลองในครั้งนี้ ผ่านโปรแกรม Minitab 19 โดยทำการทดลองเบื้องต้นพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็นมีทั้งหมด 2 ปัจจัย ประกอบด้วย เวลาในการบำบัด (30–180 นาที) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (0.2–1 กรัม) ทั้งนี้จะทำการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นที่ความเข้มข้น 5% (ค่าซีไอดีประมาณ 120,000–140,000 มิลลิกรัม/ลิตร), ปริมาณน้ำ 50 มิลลิลิตร, พีเอช 9 (พีเอชปกติของน้ำมันหล่อเย็น), ใช้อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2 ลิตร/นาที และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยการเติมอากาศจะเติมจากเครื่องปั๊มเติมอากาศผ่านสายยาง ควบคุมอัตราการเติมอากาศโดยเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air flow meter) และอากาศจะถูกกระจายด้วยหัวทรายที่อยู่ในบีกเกอร์ซึ่งบรรจุน้ำมันหล่อเย็นและ MIL-88A ดัง Fig.1

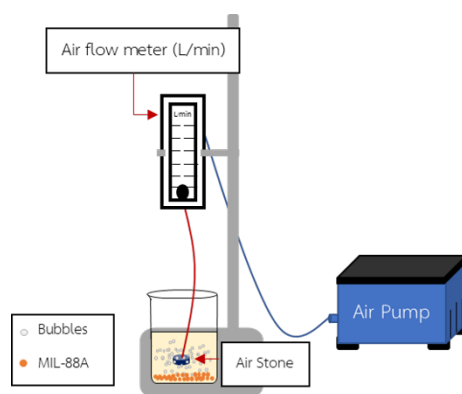


Fig. 1 Experimental equipment installation

ในการเลือกช่วงสภาวะการทดลองเกิดจากการทำการทดลองเบื้องต้นประกอบกับการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วยเหตุนี้เมื่อนำไปคำนวณผ่านโปรแกรม ทำให้การทดลองในการศึกษาเวลาและ MIL-88A ที่เหมาะสมในการบำบัดซีไอ

ดีในน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟ้นต้นแบบอากาศประยุกต์มีทั้งหมด 33 สภาวะการทดลอง (12 การออกแบบแพคทอเรียล, 12 แนวแกน และ 9 จุดศูนย์กลาง) ซึ่งค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนของแต่ละปัจจัยแสดงดัง Table 1

Table 1 Levels define of factors

Factor	Low	Hight
Time (min)	30	180
MIL-88A (g)	0.2	1

การวิเคราะห์หาร้อยละการบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็น

ทำการทดลองตามสภาวะที่โปรแกรมออกแบบมาให้ เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดปรับพีเอชสารละลายให้เท่ากับ 8 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อหยุดปฏิกิริยาเฟ้นต้น หลังจากนั้นนำมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 2 แล้วนำสารละลายไปหาค่าซีไอดีตาม Standard method 5220D (American Society for Testing & Materials, 1995) และหาร้อยละการบำบัดซีไอดีดัง Equation 1

$$\text{ร้อยละการบำบัดซีไอดี (\%)} = \frac{\text{COD}_0 - \text{COD}_e}{\text{COD}_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ COD_0 = ซีไอดีของน้ำเสียตัวอย่างก่อนบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

COD_e = ซีไอดีของน้ำเสียตัวอย่างหลังบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาและ MIL-88A ที่เหมาะสมในการบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟ้นต้นแบบอากาศประยุกต์ ทั้งหมด 33 สภาวะการทดลอง ซึ่งในแต่ละสภาวะการทดลองมีร้อยละการบำบัดซีไอดีดัง Table 2

จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมทางสถิติการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า เวลาที่ใช้ในการบำบัดและปริมาณของ MIL-88A มีอิทธิพลต่อการบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็น เนื่องจากค่า p -value ของ ทั้ง 2 ปัจจัยมีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิง $\alpha = 0.05$ นั่นคือ 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ ดัง Table 3 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการถดถอยจะได้สมการดัง Equation 2 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9428 และค่า R^2_{adj} เท่ากับ 0.9322 หมายความว่า ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็นได้ถึงประมาณ 93%

Table 2 COD treatment efficiency (%) obtained in the tests

No.	Time (min)	MIL-88A (g)	COD treatment efficiency (%)	No.	Time (min)	MIL-88A (g)	COD treatment efficiency (%)
1	30	1.0	56.78	18	180	0.6	64.75
2	180	1.0	87.29	19	180	0.2	52.54
3	105	0.6	53.90	20	105	0.2	47.46
4	180	1.0	89.83	21	30	0.2	3.51
5	180	1.0	88.98	22	105	0.6	53.90
6	105	0.6	53.90	23	30	0.6	38.98
7	105	0.6	53.90	24	105	0.6	52.54
8	105	1.0	96.95	25	30	1.0	58.47
9	105	0.2	49.15	26	30	0.2	3.70
10	105	0.6	53.22	27	180	0.2	54.24
11	30	0.6	37.63	28	105	0.2	52.54
12	180	0.6	63.39	29	30	0.2	3.70
13	105	0.6	54.58	30	180	0.6	64.75
14	105	1.0	96.61	31	30	1.0	59.32
15	105	1.0	97.29	32	105	0.6	51.86
16	105	0.6	53.90	33	30	0.6	37.63
17	180	0.2	61.02				

Table 3 Response Surface Regression: Time and MIL-88A

Term	p-Value
Constant	0.000
Time (min)	0.000
MIL-88A (g)	0.000
Time (min)*Time (min)	0.000
MIL-88A (g)*MIL-88A (g)	0.000
Time (min)*MIL-88A (g)	0.005

สมการถดถอย

$$\text{COD treatment (\%)} = -15.86 + 3.0\text{MIL-88A(g)} + 0.8192\text{Time(min)} + 60.1 \text{ MIL-88A(g)} \times \text{MIL-88A(g)} - 0.002229\text{Time(min)} \times \text{Time(min)} - 0.1815 \text{ MIL-88A(g)} \times \text{Time(min)} \quad (2)$$

หลังจากนั้นโปรแกรมจะนำข้อมูลที่ได้จากสมการถดถอยมาสร้างกราฟ เพื่อแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ของเวลาและปริมาณ MIL-88A ต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำมันหล่อเย็น ในรูปแบบของกราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติและ 2 มิติ ดัง Fig. 2A และ 2B ตามลำดับ

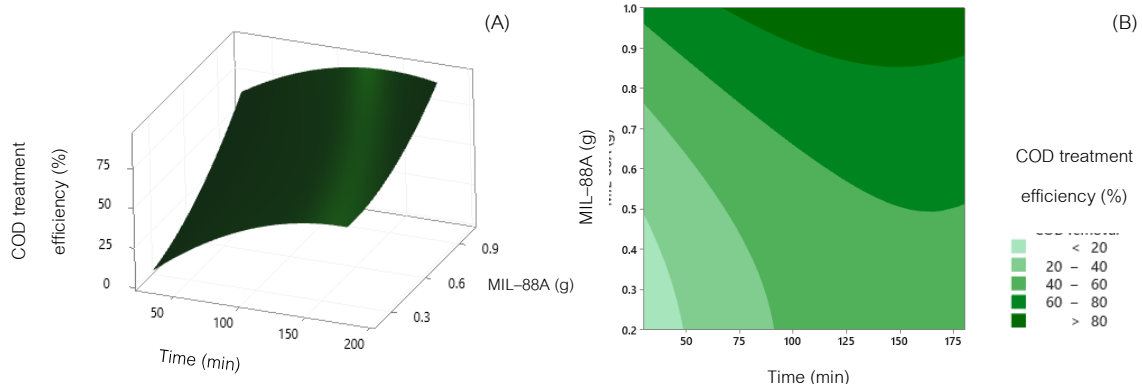
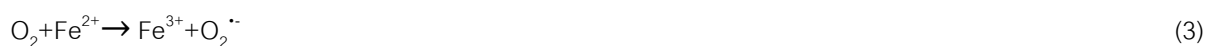


Fig. 2 Surface Plot of treatment compare with time (min) and MIL-88A (g) (A) and Contour Plot of treatment compare with time (min) and MIL-88A (g) (B)

โดยใน Fig. 2B สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้จากความเข้มของสีที่กำหนดให้สีเข้มที่สุดแสดงถึงความสามารถในการบำบัดซีโอดีที่มากกว่า 80% และลดลงตามความเข้มของสี ซึ่งความเข้มของสีที่อ่อนที่สุดแสดงถึงความสามารถในการบำบัดซีโอดีที่น้อยกว่า 20% โดยจากกราฟแสดงให้เห็นว่า เวลาในการบำบัดและปริมาณของ MIL-88A ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็นสูงขึ้น เนื่องจากเหล็กที่มาจาก MIL-88A และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจาก Equation 4 (Vallyathan and Shi, 1997) มีเวลาเพียงพอในการทำปฏิกิริยาร่วมกันจึงสามารถผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลเพื่อไปบำบัดสารเคมีที่ย่อยสลายยากในน้ำมันหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการเพิ่มปริมาณของ MIL-88A ทำให้มีปริมาณของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} มากขึ้น จึงสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดัง Equations 3 และ 4 ตามลำดับ (Phaniendra et al., 2015) เมื่อ Fe^{2+} ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลดัง Equation 5 ซึ่งจะนำไปสู่การออกซิเดชันสารมลพิษในน้ำมันหล่อเย็นดัง Equation 6 (Amin et al., 2017) นอกจากนี้การรีดักชันของ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ดัง Equation 7 ก็ สามารถเกิดปฏิกิริยาดัง Equations 3-6 ได้อีกด้วย (Estrada-Arriaga et al., 2016) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ MIL-88A จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงขึ้นเช่นกัน



สภาวะที่เหมาะสมจากการคำนวณจากโปรแกรมพบว่าการบำบัดซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็น 5% ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอช 9 ด้วยการเติมอัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ควรใช้ MIL-88A ปริมาณ 1 กรัม และใช้เวลาในการบำบัด 144 นาที จะสามารถบำบัดซีโอดีได้ 92.86% เมื่อทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ในสภาวะเดียวกันพบว่าสามารถบำบัดซีโอดีได้ 93.06% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณจากโปรแกรม

สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาและปริมาณ MIL-88A ในการบำบัดซีโอดีจากน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟ้นแบบอากาศประยุกต์โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองพบว่า เวลาและปริมาณ MIL-88A มีอิทธิพลต่อการบำบัดซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็น เนื่องจากมี p -value น้อยกว่าค่าอ้างอิง $\alpha = 0.05$ นั่นคือ 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มเวลาและปริมาณ MIL-88A จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงขึ้น เนื่องจากเหล็กจาก MIL-88A ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเติมอากาศ ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลเพียงพอที่จะไปทำลายสารเคมีที่ย่อยสลายยากในน้ำมันหล่อเย็น จึงทำให้ค่าซีโอดีลดลง นอกจากนี้โปรแกรมได้มีการคำนวณสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดซีโอดีจากน้ำมันหล่อเย็นคือน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้น 5% ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอช 9 เติมอัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ควรใช้ MIL-88A 1 กรัม และใช้เวลาในการบำบัด 144 นาที จะสามารถบำบัดซีโอดีได้ 92.86%

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยจากกลุ่มวิจัยการใช้ประโยชน์จากของเสียและประเมินความเสี่ยงทางนิเวศวิทยา กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing & Materials. 1995. Standard test methods for chemical oxygen demand (dichromate oxygen demand) of water. ASTM Annual Book of Standards. Philadelphia, PA, USA, pp.1252–1295.
- Amin, M.M., Mofrad, M.M. G., Pourzamani, H., Sebaradar, S.M., Ebrahim, K. 2017. Treatment of industrial wastewater contaminated with recalcitrant metal working fluids by the photo-Fenton process as post-treatment for DAF. J. Ind. Eng. Chem. 45: 412–420.
- Cheng, M., Lai, C., Liu, Y., Zeng, G., Huang, D., Zhang, C., Xiong, W. 2018. Metal-organic frameworks for highly efficient heterogeneous Fenton-like catalysis. Coordin. Chem. Rev. 368: 80–92.
- Estrada-Arriaga, E.B., Cortés-Muñoz, J.E., González-Herrera, A., Calderón-Mólgora, C.G., de L. Rivera-Huerta, M., Ramírez-Camperos, E., García-Sánchez, L. 2016. Assessment of full-scale biological nutrient removal systems upgraded with physico-chemical processes for the removal of emerging pollutants present in wastewaters from Mexico. Sci. Total. Environ. 571: 1172–1182.
- Fu, H., Song, X.X., Wu, L., Zhao, C., Wang, P., Wang, C.C. 2020. Room-temperature preparation of MIL-88A as a heterogeneous photo-Fenton catalyst for degradation of rhodamine B and bisphenol a under visible light. Mater. Res. Bull. 125: 110806.

- Jagadevan, S., Jayamurthy, M., Dobson, P., Thompson, I. P. 2012. A novel hybrid nano zerovalent iron initiated oxidation–Biological degradation approach for remediation of recalcitrant waste metalworking fluids. *Water. Res.* 46: 2395–2404.
- Liang, K., Ricco, R., Doherty, C.M., Styles, M.J., Bell, S., Kirby, N., Falcaro, P. 2015. Biomimetic mineralization of metal-organic frameworks as protective coatings for biomacromolecules. *Nat. Commun.* 6: 1–8.
- Liao, X., Wang, F., Wang, F., Cai, Y., Yao, Y., Teng, B. T., Shuxiang, L. 2019. Synthesis of (100) surface oriented MIL–88A-Fe with rod-like structure and its enhanced fenton-like performance for phenol removal. *Appl. Catal. B-Environ.* 259: 118064.
- Ministry of Environment Republic of Korea. 2004. Environmental Statistics Yearbook, Ministry of Environment Republic, Seoul, Korean. [in Korean].
- Neyens, E., Baeyens, J. 2003. A review of classic Fenton’s peroxidation as an advanced oxidation technique. *J. Hazard. Mater.* 98: 33–50.
- Phaniendra, A., Jestadi, D.B., Periyasamy, L. 2015. Free radicals: Properties, sources, targets, and their implication in various diseases. *Indian J. Clin. Biochem.* 30: 11–26.
- Utset, B., Garcia, J., Casado, J., Domènech, X., Peral, J. 2000. Replacement of H_2O_2 by O_2 in Fenton and photo-Fenton reactions. *Chemosphere.* 41: 1187–1192.
- Vallyathan, V., Shi, X. 1997. The role of oxygen free radicals in occupational and environmental lung diseases. *Environ. Health. Persp.* 105: 165–177.
- Ye, Z., Padilla, J.A., Xuriguera, E., Brillas, E., Sirés, I. 2020. Magnetic MIL (Fe)-type MOF-derived N-doped nano-ZVI@C rods as heterogeneous catalyst for the electro-Fenton degradation of gemfibrozil in a complex aqueous matrix. *Appl. Catal. B-Environ.* 266: 118604.

การประเมินผลผลิตไม้ยืนต้นเพื่อเป็นหลักประกันทางธุรกิจ: กรณีศึกษาไม้สักในสวนป่าเกริงกระเวีย จังหวัดกาญจนบุรี

Wood assessment of standing trees to support business collateral: a case study of teak in Kroeng Krawia forest plantation, Kanchanaburi Province

อดิگانต์ บุรณะจันทร์, กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ*, ปัสสิ ประสมสินธ์

Atikarn Buranachan, Kritsadapan Palakit*, Patsi Prasomsin

ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: atikarn.bur@ku.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประเมินผลผลิตไม้ยืนต้นเพื่อเป็นหลักประกันทางธุรกิจ ดำเนินการศึกษาที่สวนป่าเกริงกระเวีย จ.กาญจนบุรี โดยสร้างตัวแบบประเมินปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อนำไปประเมินผลผลิตในปัจจุบัน และสร้างตัวแบบการเติบโตของไม้สักด้วยเทคนิครูทกษาลวิทยาและการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อนำไปประเมินผลผลิตในอนาคต ผลการศึกษาสามารถสร้างตัวแบบปริมาตรไม้ได้ 3 ช่วงอายุ ได้แก่ ช่วงอายุ < 21, 21-30 และ > 30 ปี โดยแต่ละช่วงอายุมีตัวแบบที่เหมาะสมที่สุด $V = -0.146 + 0.015dbh + 0.042dpos - 0.399dsi$, $V = -0.128 + 0.016dbh + 0.021dpos - 0.463dsi$ and $V = -0.147 + 0.02dbh + 0.056dpos - 0.367dsi$, ตามลำดับ ซึ่งไม้สักช่วงอายุ < 21, 21-30 และ > 30 ปี ช่วงละ 12 ต้น มีผลผลิตในปัจจุบันรวม เท่ากับ 2.42, 3.26 และ 5.85 ลบ.ม. ตามลำดับ และในอีก 3 ปีจะมีผลผลิตรวม เท่ากับ 3.18, 3.41 และ 5.96 ลบ.ม. ตามลำดับ

คำสำคัญ: การประเมินผลผลิตไม้ยืนต้น, ไม้สัก, หลักประกันทางธุรกิจ

Abstract

The aim of this research was to study wood assessment of standing trees to support business collateral. This study was conducted at Kroeng Krawia Forest Plantation, Kanchanaburi Province. Teak merchantable volume models were created by using regression analysis to assess the current yield. Teak growth models were created by using techniques of dendrochronological and regression analysis to assess the future yield. The results of the study were able to generate the volume models in 3 age ranges of < 21, 21-30, and > 30 years. The suitable model in each age range was $V = -0.146 + 0.015dbh + 0.042dpos - 0.399dsi$, $V = -0.128 + 0.016dbh + 0.021dpos - 0.463dsi$ and $V = -0.147 + 0.02dbh + 0.056dpos - 0.367dsi$, respectively. Total current yield of 12 teak trees in each age class of < 21, 21-30 and > 30 years was 2.42, 3.26 and 5.85 cubic meters, respectively. The total yield in the next 3 years of these trees will be 3.18, 3.41 and 5.96 cubic meters, respectively.

Keywords: Business collateral, Teak, Wood assessment of standing trees

คำนำ

การประเมินมูลค่าไม้ยืนต้นเพื่อเป็นหลักประกันทางธุรกิจในปัจจุบันมีการจำแนกต้นไม้และมูลค่าของต้นไม้ตามโครงการส่งเสริมปลูกต้นไม้เพื่อเป็นทุนระยะยาว ซึ่งมีวิธีการวัดต้นไม้เพื่อประเมินหาผลผลิตแบบเบื้องต้น และเป็นวิธีการวัดต้นไม้ที่สามารถวัดได้ง่าย แต่ผู้วิจัยนั้นสังเกตเห็นว่าวิธีการดังกล่าวนั้นอาจก่อให้เกิดความไม่เป็นธรรมแก่ผู้ขอสินเชื่อและสถาบันทางการเงิน เนื่องจากโครงการดังกล่าวมีกรอบแนวคิด คือ การประเมินมูลค่าของต้นไม้ขณะที่ต้นไม้ยังยืนต้นและมีชีวิต โดยมีธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร (ธ.ก.ส.) เป็นหน่วยงานสนับสนุนด้านการเงิน และองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (อ.อ.ป.) เป็นหน่วยงานผู้ทำสัญญาจะซื้อขายไม้เพื่อสร้างหลักประกันให้แก่ผู้ปลูกและสถาบันการเงิน (ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552) จะเห็นได้ว่ามีการประเมินมูลค่าต้นไม้ทุกส่วนขณะที่ไม้ยังยืนต้น แต่เมื่อถึงเวลาตัดต้นไม้ขายจะมีการตัดทอนไม้ออกเป็นท่อน ทำให้เกิดส่วนที่ไม่สามารถนำไปทำเป็นสินค้าส่งผลให้มูลค่าต้นไม้ที่ประเมินได้มีมูลค่าเกินจริงซึ่งส่งผลเสียแก่ผู้ขอสินเชื่อในการชำระหนี้เงินกู้ และช่องว่างอีกประการหนึ่ง คือ การนำไม้ยืนต้นมาเป็นหลักประกันทางธุรกิจนั้นตามหลักกฎหมายหลักประกันแล้ว ผู้ขอสินเชื่อยังคงมีสิทธิในการครอบครองใช้สอยพื้นที่ได้ อีกทั้งทรัพย์สินที่นำมาเป็นหลักประกันในที่นี้ คือ ต้นไม้ ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการเติบโต ประกอบกับมูลค่าของต้นไม้จะสูงขึ้นเมื่อต้นไม้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้การประเมินปริมาณไม้แค่เพียงในปัจจุบันไม่เพียงพอต่อการนำไม้ยืนต้นเป็นหลักประกัน เนื่องจากมูลค่าต้นไม้ที่ประเมินได้มีมูลค่าน้อยกว่าที่ควรซึ่งส่งผลเสียแก่สถาบันการเงิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการประเมินปริมาณไม้ในอนาคตด้วย เพื่อให้เกิดความไม่เป็นธรรมแก่ทั้งผู้ขอสินเชื่อและสถาบันการเงิน

ไม้สักเป็นพรรณไม้เศรษฐกิจที่มีคุณค่า ราคาแพง เป็นที่ต้องการของตลาด สามารถปลูกในรูปแบบวนเกษตรในระยะแรกได้ ทนไฟ และมีการพัฒนาองค์ความรู้ไม้สักอย่างต่อเนื่องมาตลอด (คณะวนศาสตร์, 2560) อีกทั้งยังมีการแก้ไข พ.ร.บ. ป่าไม้ พุทธศักราช 2484 ส่งผลทำให้การปลูกและจำหน่ายไม้สักในที่ดินกรรมสิทธิ์สะดวกแก่เกษตรกรมากขึ้น ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงดำเนินการในสวนป่าไม้สัก ที่สวนป่าเกริงกระเวีย จังหวัดกาญจนบุรี

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย: (1) แผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:50,000; (2) เครื่องมือวัดความสูง ได้แก่ Forestry Pro; (3) เทปวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter tape); (4) เครื่องมือวัดความโตที่ระดับความสูงเกินเอื้อม ได้แก่ Pentaprism caliper; (5) เครื่องมือวัดความหนาเปลือก ได้แก่ Swedish bark gauge; (6) ส่วนเจาะวัดความเพิ่มพูน (increment borer); (7) เครื่องมือวัดมุม ได้แก่ Suunto Tandem pm5+KB-14; (8) เครื่องบอกพิกัดทางภูมิศาสตร์ (Global Positioning System: GPS); (9) เทปวัดระยะ; (10) หลอดพลาสติกสำหรับเก็บใส่ไม้ตัวอย่าง; (11) แบบบันทึกข้อมูล; (12) ไม้สำหรับยึดใส่ไม้ตัวอย่าง; (13) เครื่องขัดกระดาษทรายแบบ belt sander, rotary sander และ กระดาษทราย; (14) กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 4–40 เท่า; (15) เครื่องมือวัดความกว้างวงปีต้นไม้ชนิด velmex measuring system; และ (16) โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์วงปีไม้

การวางแผนการสำรวจ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการศึกษาในพื้นที่สวนป่าไม้สักของสวนป่าเกริงกระเวีย จังหวัดกาญจนบุรี โดยมีพื้นที่ทั้งหมด 14,810.73 ไร่ ซึ่งประกอบด้วย 25 แปลงปลูก ได้แก่ แปลงปลูกปี พ.ศ. 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2535, 2536, 2537, 2540, 2543, 2544, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552,

2555 และ 2556 โดยใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างแบบหลายชั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยการสุ่ม 2 ชั้น ชั้นแรกการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิซึ่งมีอายุเป็นเกณฑ์ในการจำแนกชั้นภูมิจะได้ 3 ชั้นภูมิ ดังนี้

ชั้นภูมิที่ 1 อายุ < 21 ปี จำนวน 11 แปลงปีปลูก มีเนื้อที่ 3,482.3 ไร่

ชั้นภูมิที่ 2 อายุ 21–30 ปี จำนวน 4 แปลงปีปลูก มีเนื้อที่ 1,196.9 ไร่

ชั้นภูมิที่ 3 อายุ > 30 ปี จำนวน 10 แปลงปีปลูก มีเนื้อที่ 10,131.6 ไร่

ชั้นสองการสุ่มตัวอย่างแบบง่ายจากแปลงปลูกปีน้อยที่สุด กึ่งกลาง และมากที่สุดในแต่ละชั้นภูมิ และสุ่มเลือกแปลงย่อยของแต่ละแปลงปีปลูกมาเพื่อเป็นพื้นที่สำรวจ โดยใช้วิธีการสำรวจ Line plot survey ที่มีเปอร์เซ็นต์การสำรวจเบื้องต้นเท่ากับ 1.25 เปอร์เซ็นต์ ด้วยแปลงตัวอย่างวงกลม (Circular sample plot) รัศมี 12.62 เมตร จากนั้นคำนวณหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม (ขวัญชัย, 2556) ดัง Equation 1

$$n = \frac{t^2 cv^2}{AE^2} \quad (1)$$

โดย

n = ขนาดตัวอย่างหรือจำนวนหน่วยตัวอย่างที่เหมาะสม

t = ค่าคะแนนมาตรฐาน t ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

CV = ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของหน่วยตัวอย่าง

AE = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 5

การรวบรวมข้อมูลไม้ในแปลงตัวอย่าง

จุดบันทึกข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่สำรวจ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับ 1.30 เมตร หรือความโตเพียงอก (ซม.) และวัดความสูงทั้งหมดของต้นไม้ (เมตร)

การรวบรวมข้อมูลไม้ตัวแทน

นำขนาดความโตเพียงอกของต้นไม้ทุกต้นในแปลงตัวอย่างของแต่ละชั้นภูมิมาคำนวณหาค่าสูงสุด และต่ำสุด เพื่อจำแนกขนาดความโตเป็น 3 ชั้น แล้วคัดเลือกไม้ตัวแทนในแต่ละชั้นภูมิให้กระจายทุกชั้นความโต โดยเก็บรวบรวมข้อมูลชั้นความโตละ 8 ต้น ได้แก่ ไม้ตัวแทนที่มีตำหนิ 4 ต้น และไม้ตัวแทนที่ไม่มีตำหนิ 4 ต้น รวมทั้งหมดชั้นภูมิละ 24 ต้น จากนั้นบันทึกข้อมูลไม้ตัวแทน ได้แก่ ข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่สำรวจ, ขนาดความโตเพียงอก (ซม.), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงตอซึ่งสูงจากพื้นดิน 10 ซม. (ซม.), ความสูงทั้งหมด (ม.), ความสูงที่ทำเป็นสินค้าได้ (ม.) โดยวัดจากโคนต้นถึงจุดที่มีขนาดเส้นรอบวงเท่ากับ 30 ซม., ความหนาเปลือกที่ระดับ 1.30 ม. (ซม.), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงต่างๆ โดยแบ่งไม้ออกเป็นท่อนที่จะทำเป็นสินค้า บันทึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กลางท่อน (ซม.) และความยาวของไม้แต่ละท่อน (ม.) โดยจะมีการเผื่อความยาวท่อนไม้สำหรับการตกแต่งท่อนไม้เมื่อมีการตัดท่อนบริเวณโคนและปลายท่อนไม้ด้านละ 10 ซม., ประเภทตำหนิ, ความยาวตำหนิ (ม.), ตำแหน่งที่เกิดตำหนิบนลำต้นจากระดับพื้นดิน (ม.) และเจาะต้นไม้ บริเวณลำต้นที่ระดับความสูง 1.30 ม. โดยเจาะต้นละ 2 จุด ทิศทางตั้งฉากกันให้ครอบคลุมทุกชั้นความโตในแต่ละชั้นภูมิ

การรวบรวมข้อมูลไม้สำหรับประเมินผลผลิตและหาความสัมพันธ์จากการพยากรณ์

สุ่มเลือกไม้สักที่มีขนาดความโตเพียงอกให้ครอบคลุมทุกชั้นความโตในแต่ละชั้นภูมิ โดยใช้การสุ่มแบบง่ายสุ่มชั้นภูมิละ 12 ต้น ได้แก่ ต้นที่มีตำหนิ 6 ต้น ไม่มีตำหนิ 6 ต้น รวม 36 ต้น จากนั้นบันทึกข้อมูลไม้เหมือนการรวบรวมข้อมูลไม้ตัวแทน โดยที่ไม่ต้องทำการเจาะต้นไม้

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างตัวแบบประเมินปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สัก

นำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลไม้ตัวแทนมาคำนวณหาปริมาตรไม้ก่อนของแต่ละต้นที่หักส่วนที่เป็นตำหนิออกแล้วโดยใช้สูตร Huber's formula และนำปริมาตรไม้ก่อนแต่ละท่อนรวมกันเพื่อให้ได้ปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้รายต้น จากนั้นทำการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุดด้วยวิธี Stepwise Regression โดยประยุกต์จากฟังก์ชันของสมหญิง (2547) ดัง Equation 2 ตรวจสอบปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบพหุโดยพิจารณาจากค่า Variance Inflation Factor (VIF) และ Tolerance พร้อมทั้งประเมินค่าความผิดพลาดจากการพยากรณ์ด้วยค่า MAPE (Mean Absolute Percentage Error)

$$V = f(\text{dbh, form, d, dpos, dsi}) \quad (2)$$

โดย

$$V = \text{ปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ (ลูกบาศก์เมตร)}$$

$$\text{dbh} = \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับ 1.30 เมตรจากพื้น (เซนติเมตร)}$$

$$\text{form} = \text{ค่าลักษณะรูปร่าง คำนวณจาก ค่าลักษณะรูปร่าง} = \frac{\text{ปริมาตรจริงของต้นไม้}}{\text{ปริมาตรทรงกระบอกของต้นไม้}}$$

โดยปริมาตรจริงของต้นไม้หาได้จากการคำนวณปริมาตรไม้ก่อนด้วย Smalian's formula และหาขนาดความโตของต้นไม้ที่ระดับความสูงต่างๆ ได้จากตัวแบบของ Warner et al. (2016) และใช้สูตรปริมาตรทรงกรวยสำหรับไม้ก่อนที่เส้นรอบวง 30 เซนติเมตร ซึ่งอยู่บริเวณปลายยอดของต้นไม้

$$d = \text{การพบหรือไม่พบตำหนิ (0 = ไม่พบตำหนิ, 1 = พบตำหนิ)}$$

$$\text{dpos} = \text{ตำแหน่งที่เกิดตำหนิจากระดับพื้นดิน (เมตร)}$$

$$\text{dsi} = \text{ขนาดความยาวของตำหนิ (เมตร)}$$

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างตัวแบบการเติบโตของไม้สัก

เตรียมตัวอย่างไม้ด้วยวิธีการรุกขกาลวิทยา (นาฏสุดา, 2556) ณ ห้องปฏิบัติการรุกขกาลวิทยาเขตร้อน คณะวนศาสตร์ จากนั้นวัดความกว้างวงปีไม้ และนำข้อมูลความกว้างวงปีที่ได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของปี พ.ศ. แต่ละวงปี โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป COFECHA (Holmes, 1983)

นำข้อมูลความกว้างวงปีในอดีตมาคำนวณหาขนาดความโตเพียงอก จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราการเติบโตในอีก 3 ปีข้างหน้า เนื่องจากไม้ยืนต้นเป็นหลักประกันที่มีความถึในการประเมินราคาทุก 3 ปี (ธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2563) นำค่าอัตราการเติบโตของขนาดความโตเพียงอกมาสร้างตัวแบบการเติบโต ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) โดยมีตัวแปรอิสระ คือ อายุ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ Linear equation, Logarithm equation, S-Curve equation และ Exponential equation (จรัพร, 2550; พิษิต, 2552) จากนั้นพิจารณาเลือกตัวแบบที่เหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินผลผลิตไม้สักเพื่อเป็นหลักประกันทางธุรกิจ

นำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลไม้สำหรับประเมินผลผลิตมาคำนวณหาปริมาตรด้วยตัวแบบประเมินปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักที่สร้างขึ้นเพื่อคำนวณหาปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้รายต้นในปัจจุบัน จากนั้นคำนวณหาความโตเพียงอกในอีก 3 ปีข้างหน้าด้วยตัวแบบการเติบโตที่สร้างขึ้น และคำนวณหาปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ในอีก 3 ปีข้างหน้ารายต้นด้วยตัวแบบประเมินปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักที่สร้างขึ้น

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้แบ่งวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 3 ช่วงอายุ คือ ช่วงอายุ < 21, 21–30 และ > 30 ปี โดยจากผลการรวบรวมข้อมูลไม้ในแปลงตัวอย่างของช่วงอายุ < 21–30 ปี จำนวน 16 แปลง ช่วงอายุ 21–30 ปี จำนวน 15 แปลง และช่วงอายุ > 30 ปี จำนวน 20 แปลง พบว่าเก็บข้อมูลหน่วยตัวอย่างทั้งหมด 273, 328 และ 345 ต้น ตามลำดับ ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสม คือ 150, 180 และ 151 ต้น ตามลำดับ ดังนั้นขนาดหน่วยตัวอย่างมีความเพียงพอต่อการนำไปประเมินค่าประชากร เมื่อนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละช่วงอายุมาแบ่งเป็นช่วงจะได้ช่วงชั้นเส้นผ่านศูนย์กลางออกเป็น 3 ชั้น ดัง Table 1

Table 1 The DBH class of teak trees

Age class (years)	DBH class (cm)	Age class (years)	DBH class (cm.)	Age class (years)	DBH class (cm.)
	10.00–22.07		10.00–23.87		10.00–26.73
< 21	22.08–34.14	21–30	23.88–37.73	> 30	26.74–43.47
	34.15–46.2		37.74–51.60		43.48–60.20

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างตัวแบบประเมินปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สัก จากผลการวิเคราะห์จะได้หลายตัวแบบ ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกตัวแบบที่ดีที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2), ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE), ค่า F และระดับนัยสำคัญ จะได้ตัวแบบประเมินปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักช่วงอายุ < 21, 21–30, และ > 30 ปี ดัง Equation 3, 4 และ 5 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) เท่ากับ 28.57, 39.51 และ 39.96 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับการพยากรณ์ที่มีความสมเหตุสมผล (Lewis, 1982)

$$V = -0.146 + 0.015dbh + 0.042dpos - 0.399dsi \quad (r = 0.776) \quad (3)$$

$$V = -0.128 + 0.016dbh + 0.021dpos - 0.463dsi \quad (r = 0.830) \quad (4)$$

$$V = -0.147 + 0.02dbh + 0.056dpos - 0.367dsi \quad (r = 0.802) \quad (5)$$

จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ ได้แก่ ความโตเพียงอก ตำแหน่งตำหนิ และขนาดตำหนิ ซึ่งแตกต่างจากตัวแบบประเมินปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของสมหญิง (2547) ที่พบว่าตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ คือ ความโตเพียงอก การพบหรือไม่พบตำหนิ ลักษณะรูปทรง ตำแหน่งตำหนิ และขนาดตำหนิ โดย Equation 3, 4 และ 5 มีค่า r^2 เท่ากับ 0.78, 0.83, และ 0.80 ตามลำดับ มีค่า SE

เท่ากับ 0.10, 0.11, และ 0.21 ตามลำดับ และมีค่า F เท่ากับ 23.10, 32.46, และ 27.02 ที่ระดับนัยสำคัญ < 0.05 ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบพหุโดยพิจารณาจากค่า VIF และ Tolerance พบว่า ช่วงอายุ < 21 ปี VIF ของ dbh, dpos และ dsi มีค่า 1.23, 2.43, และ 2.16 ตามลำดับ Tolerance ของ dbh, dpos และ dsi มีค่า 0.81, 0.41, และ 0.46 ตามลำดับ ช่วงอายุ 21–30 ปี VIF ของ dbh, dpos และ dsi มีค่า 1.11, 2.40, และ 2.56 ตามลำดับ Tolerance ของ dbh, dpos และ dsi มีค่า 0.90, 0.42, และ 0.39 ตามลำดับ และช่วงอายุ > 30 ปี VIF ของ dbh, dpos และ dsi มีค่า 1.25, 2.09 และ 1.77 ตามลำดับ Tolerance ของ dbh, dpos และ dsi มีค่า 0.80, 0.48 และ 0.56 ตามลำดับ แสดงว่า ตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กัน หรือไม่เกิดปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบพหุ

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างตัวแบบการเติบโตไม้สัก พบว่าช่วงอายุ < 21 ปี มีความเหมาะสมอยู่ในรูปแบบ S-Curve มากที่สุดดัง Fig. 1 ช่วงอายุ 21–30 ปี และช่วงอายุ > 30 ปี มีความเหมาะสมอยู่ในรูปแบบ Exponential มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sangram (2016) และโชคดี (2560) ดัง Equation 6, 7 และ 8 ตามลำดับ โดยมีค่า r^2 เท่ากับ 0.85, 0.79 และ 0.88 ตามลำดับ มีค่า SE เท่ากับ 0.31, 0.53 และ 0.41 ตามลำดับ และมีค่า F เท่ากับ 143.00, 87.59 และ 237.37 ที่ระดับนัยสำคัญ < 0.05 ตามลำดับ

$$\text{Growth rate} = e^{(2.572+(3.588)/(\text{age}))} \quad (6)$$

$$\text{Growth rate} = 119.195 e^{-0.138(\text{age})} \quad (7)$$

$$\text{Growth rate} = 89.953 e^{-0.115(\text{age})} \quad (8)$$

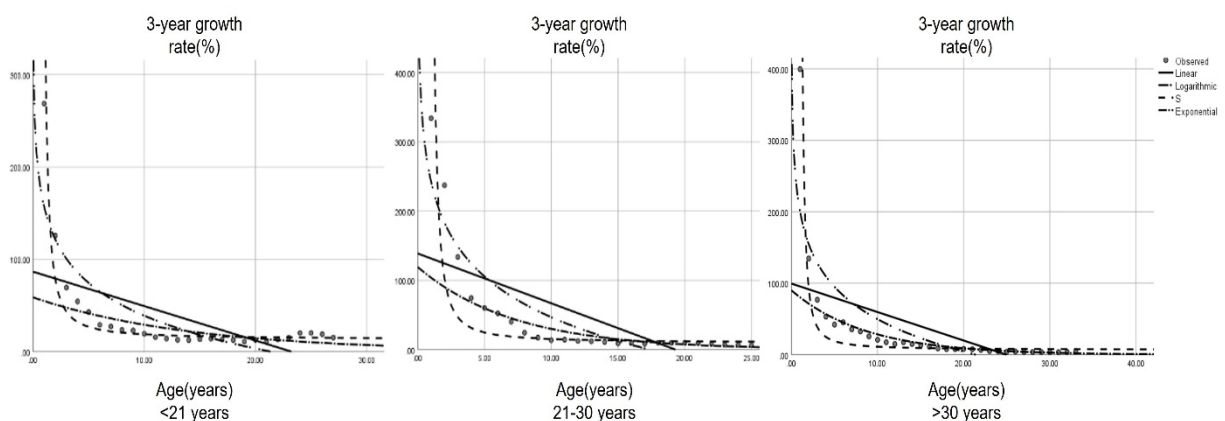


Fig. 1 Relationship between 3-year growth rate and age

เมื่อนำข้อมูลที่ได้รวบรวมมาประเมินหาผลผลิตที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักรายต้นในปัจจุบันและอนาคต พบว่า ไม้สักช่วงอายุ < 21 ปี จำนวน 12 ต้น มีผลผลิตที่ทำเป็นสินค้าได้ในปัจจุบันรวม เท่ากับ 2.42 ลบ.ม. และเมื่อเวลาผ่านไป 3 ปี จะมีผลผลิตที่ทำเป็นสินค้าได้เพิ่มขึ้นเป็น 3.18 ลบ.ม. ไม้สักช่วงอายุ 21–30 ปี จำนวน 12 ต้น มีผลผลิตที่ทำเป็นสินค้าได้ในปัจจุบันรวม เท่ากับ 3.26 ลบ.ม. และเมื่อเวลาผ่านไป 3 ปี จะมีผลผลิตที่ทำเป็นสินค้าได้เพิ่มขึ้นเป็น 3.41 ลบ.ม. และ ไม้สักช่วงอายุ > 30 ปี จำนวน 12 ต้น มีผลผลิตที่ทำเป็นสินค้าได้ในปัจจุบันรวม เท่ากับ 5.85 ลบ.ม. และเมื่อเวลาผ่านไป 3 ปี จะมีผลผลิตที่ทำเป็นสินค้าได้เพิ่มขึ้นเป็น 5.96 ลบ.ม. ดัง Fig. 2

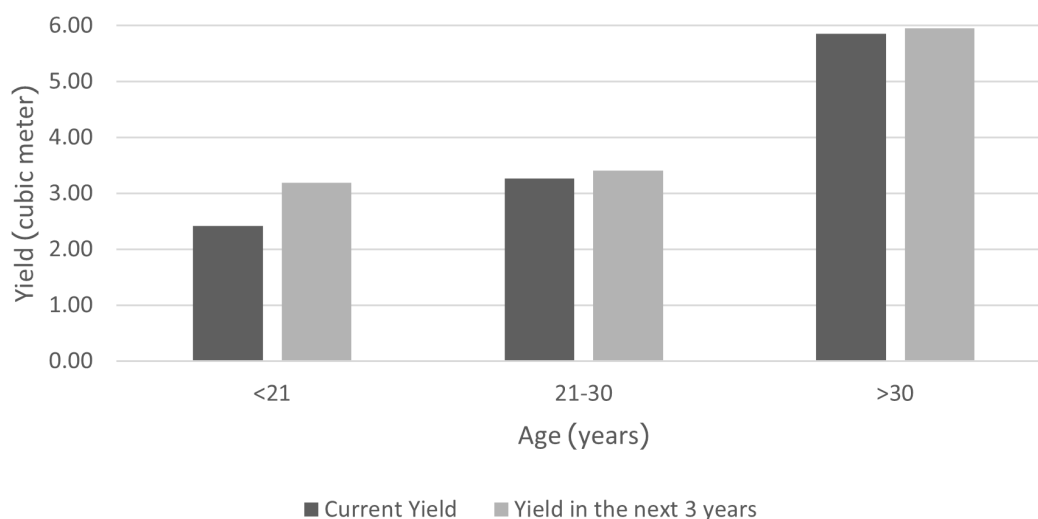


Fig. 2 Current yield and yield in the next 3 years of teak

สรุป

จากการศึกษาสามารถสร้างตัวแบบประเมินปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักได้ 3 ช่วงอายุ โดยตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ ได้แก่ ความโตเพียงอก ตำแหน่งตำหนิ และขนาดตำหนิ จะได้ตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับช่วงอายุ <21 ปี คือ $V = -0.146 + 0.015dbh + 0.042dpos - 0.399dsi$ ($r^2 = 0.776$, $p < 0.05$) ช่วงอายุ 21-30 ปี คือ $V = -0.128 + 0.016dbh + 0.021dpos - 0.463dsi$ ($r^2 = 0.830$, $p < 0.05$) และช่วงอายุ >30 ปี คือ $V = -0.147 + 0.02dbh + 0.056dpos - 0.367dsi$ ($r^2 = 0.802$, $p < 0.05$) และสามารถสร้างตัวแบบการเติบโตได้ 3 ช่วงอายุ โดยช่วงอายุ <21 ปี มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในรูปแบบ S-Curve คือ Growth rate = $e^{(2.572 + (3.588)/(age))}$ ($r^2 = 0.851$, $p < 0.05$) ช่วงอายุ 21-30 ปี มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในรูปแบบ Exponential คือ Growth rate = $119.195 e^{-0.138(age)}$ ($r^2 = 0.792$, $p < 0.05$) และช่วงอายุ >30 ปี มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในรูปแบบ Exponential คือ Growth rate = $89.953 e^{-0.115(age)}$ ($r^2 = 0.884$, $p < 0.05$) และเมื่อนำข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมมาไปประเมินผลผลิตไม้สักรายต้น จำนวนช่วงอายุละ 12 ต้น เพื่อเป็นหลักประกันทางธุรกิจ พบว่าไม้สักช่วงอายุ <21, 21-30, และ >30 ปี มีผลผลิตในปัจจุบันรวม เท่ากับ 2.42, 3.26, และ 5.85 ลบ.ม. ตามลำดับ และในอีก 3 ปีจะมีผลผลิตรวม เท่ากับ 3.18, 3.41, และ 5.96 ลบ.ม. ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรจาก สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2564

เอกสารอ้างอิง

ขวัญชัย ดวงสถาพร. 2556. การสำรวจแบบแปลงเป็นแนว. ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- คณะวนศาสตร์. 2560. (ร่าง)ยุทธศาสตร์และแผนงานการส่งเสริมไม้เศรษฐกิจแบบครบวงจร(พ.ศ.2561–2579). [http://rubber.oie.go.th/box/ELib_Document/5909/\(ร่าง\)ยุทธศาสตร์และแผนงานการส่งเสริมไม้เศรษฐกิจแบบครบวงจร_พ.ศ.2561–2574.pdf](http://rubber.oie.go.th/box/ELib_Document/5909/(ร่าง)ยุทธศาสตร์และแผนงานการส่งเสริมไม้เศรษฐกิจแบบครบวงจร_พ.ศ.2561–2574.pdf), 21 พฤษภาคม 2562.
- จรีพร สิริรัชชเยศ. 2550. ตัวแบบการเติบโตและผลผลิตของไม้สักในสวนป่าแม่เกาะ จังหวัดลำปาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- โชคดี คันธวัน. 2560. ความสัมพันธ์ระหว่างการกักเก็บคาร์บอนกับการเติบโตของไม้สักในป่าธรรมชาติและสวนป่า จังหวัดลำปาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2563. คู่มือการประเมินมูลค่าต้นไม้โครงการฝึกอบรมหลักสูตรผู้ประเมินมูลค่าต้นไม้. <https://anyflip.com/monex/vxan?fbclid=IwAR2NhWosTInnipuMTRTRJnm0yPbAqSM0ze635R8tCPABYUMVxtlaajk6tw>, 15 มิถุนายน 2564.
- นาฏสุดา ภูมิจำนงศ์. 2556. วงปีและการประยุกต์ในประเทศไทย. คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.
- พิชิต ลำไย. 2552. ผลของภูมิอากาศต่อการเติบโตของไม้สนสองใบในอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2552. โครงการส่งเสริมปลูกต้นไม้เพื่อเป็นทุนระยะยาว. ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สมหญิง ละการชั่ว. 2547. ชั้นคุณภาพและปริมาตรที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สัก: กรณีศึกษาสวนป่าทองผาภูมิ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Holmes, R. L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree. Ring. Bull.* 43: 69–78.
- Lewis, C. 1982. *Industrial and business forecasting methods*. Butterworth Scientific, London, UK.
- Sangram, N., Duangsathaporn, K., Poolsiri, R. 2016. Effect of gases and particulate matter from electricity generation process on the radial growth of teak plantations surrounding Mae Moh power plant, Lampang province. *Agr. Nat. Resour.* 50: 114–119.
- Warner, A.J., Jamroenprucksas, M., Puangchit, L. 2016. Development and evaluation of teak (*Tectona grandis* L.f.) taper equations in northern Thailand. *Agr. Nat. Resour.* 50: 362–367.

การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการปรากฏปัจจัยคุกคาม บริเวณอุทยานแห่งชาติทับลาน

Threatening factors to the existence of Thap Lan National Park

ปานเหนือ ชีวะธรรม^a, วรงค์ สุขเสวต^a, ปานวรวิศร์ ปานศรี^a, อิงอร ไชยยศ^b, ประทีป ดั่งวงศ์^{a,*}Panuae Chewatham^a, Warong Suksavate^a, Paanwaris Paansri^a, Aingorn Chaiyes^b, Prateep Duengkae^{a,*}^aคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900^bสาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี 11120^aFaculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand^bSchool of Agricultural and Cooperatives, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi 11120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: prateep.du@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำข้อมูลตำแหน่งของปัจจัยคุกคามที่ได้จากการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ และกล้องดักถ่ายอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ บริเวณพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลานระหว่าง ปี พ.ศ. 2559–2560 มาวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยแวดล้อมทางด้านกายภาพ 7 ปัจจัย ทางด้านเศรษฐกิจและสังคม 2 ปัจจัย โดยวิเคราะห์จากการสร้างแบบจำลองการกระจาย (Maximum entropy) และนำแบบจำลองการกระจายดังกล่าวมาสร้างเป็นแผนที่ชั้นความเสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคาม ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยแวดล้อมทางกายภาพที่มีผลต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามมากที่สุด คือ ระยะห่างจากหมู่บ้าน ระยะห่างจากถนน และความลาดชัน ในด้านของปัจจัยแวดล้อมด้านเศรษฐกิจสังคมของพื้นที่ พื้นที่เสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามส่วนกระจายอยู่ในพื้นที่ 26 ตำบล จากทั้งหมด 37 ตำบล ซึ่งมีรายได้เฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 70,508 บาทต่อคน ซึ่งต่ำกว่ารายได้เฉลี่ยทั้งหมดของตำบลในพื้นที่ศึกษาที่มีค่ารายได้เฉลี่ยอยู่ที่ 92,520 บาทต่อคน และมีความหนาแน่นของประชากรเฉลี่ยอยู่ 6,638 คนต่อตำบล ซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของประชากรเฉลี่ยทั้งหมดของตำบลในพื้นที่ศึกษาที่มีความหนาแน่นของประชากรเฉลี่ยอยู่ที่ 6,320 คนต่อตำบล

คำสำคัญ: การลาดตระเวนเชิงคุณภาพ, แบบจำลองการกระจายชนิดพินธุ์, ระบบเฝ้าระวังและต่อต้านการกระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

The research is based on qualitative reconnaissance of the location of threat factors and Real Time Camera Traps of Thap Lan National Park during the year 2016–2017 to analyze together with 7 physical environmental factors, 2 economic and social factors. The analysis was based on maximum entropy modeling and the model was used to create a risk layer map for the presence of threat factors. The results of the study found that the physical environmental factor that most influenced the appearance of the threat was distance from the village, distance from the road and slope. The socio-economic factors of the area at risk for the presence of threat factors scattered in 26 sub-districts out of 37 sub-districts. Which has an average annual income of 70,508 baht/person, which is lower than the average income of all sub-districts with an average income of 92,520 baht/person and an average population density of 6,638 people/sub-district, which is high than the average population density of all sub-districts with a mean population density of 6,320 people/sub-district.

Keywords: GIS, Maximum entropy, NCAPS, SMART Patrol

คำนำ

ในโลกปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านต่างๆ ให้มีความถูกต้อง แม่นยำและสามารถเรียกใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถที่จะนำมาช่วยในการตัดสินใจ และแก้ไขปัญหาการด้านการจัดการทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างทั่วถึงที่ หนึ่งในวิธีการที่นำการวิเคราะห์ปัจจัยคุกคามด้านต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการเฝ้าระวังพื้นที่คุ้มครองด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Maximum Entropy (Maxent) เช่น การศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยแวดล้อมที่มีผลกับการเกิดคดีป่าไม้โดยจุดที่เกิดคดีทางป่าไม้ประยุกต์เข้ากับแบบจำลอง Maximum Entropy และนำผลที่ได้จากแบบจำลองมาสร้างแผนที่ซึ่งแสดงถึงพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดคดีป่าไม้ ในเขตป่าสงวนแห่งชาติ จังหวัดตาก (พรพรรณ, 2554)

อุทยานแห่งชาติทับลาน เป็นอุทยานแห่งชาติที่มีเนื้อที่ใหญ่เป็นอันดับสองของประเทศ มีเนื้อที่ประมาณ 2,235.80 ตารางกิโลเมตร มีพื้นที่ครอบคลุมท้องที่อำเภอปักธงชัย อำเภอวังน้ำเขียว อำเภอครบุรี อำเภอเสิงสาง จังหวัดนครราชสีมา และอำเภอนาดูนี จังหวัดปราจีนบุรี ประกอบกับเป็นส่วนหนึ่งของกลุ่มป่าดงพญาเย็น – เขาใหญ่ ที่ได้รับการจารึกให้เป็นแหล่งมรดกโลกทางธรรมชาติโดยองค์การการศึกษา วิทยาศาสตร์ และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ (UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) สภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปประกอบด้วยภูเขาใหญ่น้อยสลับซับซ้อนต่อเนื่องกันเป็นบริเวณกว้างขวางและเป็นเทือกเขายาวต่อเนื่องกันทำให้มีหุบเขาตามธรรมชาติ เหว และน้ำตก เป็นแหล่งกำเนิดของต้นน้ำลำห้วย ซึ่งเป็นต้นน้ำของแม่น้ำมูล และแม่น้ำบางปะกง นับได้ว่าเป็นพื้นที่อนุรักษ์ป่าไม้ สัตว์ป่า แหล่งน้ำ และธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์แห่งหนึ่งของประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามด้วยสภาวะเศรษฐกิจและสังคมในช่วงที่ผ่านมาทำให้เกิดต่อมาเกิดการขยายตัวของพื้นที่เกษตรกรรม จึงทำให้พื้นที่ป่าภายในอุทยานแห่งชาติทับลานประสบปัญหาต่างๆ ทั้งการลักลอบตัดไม้ ทั้งไม้กฤษณา ไม้พยุง การลักลอบล่าสัตว์ และการแผ้วถางพื้นที่ยึดครองทำสถานที่พักตากอากาศ (สำนักงานอุทยานแห่งชาติ, 2558) ทางราชการได้นำเทคนิคการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ (SMART Patrol) และระบบเฝ้าระวังการกระทำผิดทางป่าไม้ (Network Centric Anti-Poaching System : NCAPS) เข้ามาใช้ในการป้องกันภัยคุกคามต่างๆ มาเป็นเวลาหลายปี แต่ยังคงขาดการนำข้อมูลเหล่านี้มาพัฒนาใช้แบบจำลองเพื่อสร้างพื้นที่เสี่ยงต่อการคุกคาม

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้ใช้ตำแหน่งที่เกิดปัจจัยคุกคามจากข้อมูลของระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพ (SMART Patrol) และระบบเฝ้าระวังการกระทำผิดทางป่าไม้ (Network Centric Anti-Poaching System: NCAPS) นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลอง Maximum Entropy (Maxent) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อสร้างแผนที่แสดงชั้นความเสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลาน เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนด้านการป้องกันและปราบปรามได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. โปรแกรมสร้างแบบจำลองการกระจายชนิดพันธุ์ (MaxEnt version 3.4.4)
3. โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ (ArcGIS version 10.4.1)
4. ชุดอุปกรณ์กล้องดักถ่ายอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ (Real Time Camera Trap) ยี่ห้อ SPARTAN Camera
5. ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับปัจจัยแวดล้อมด้านกายภาพ และด้านเศรษฐกิจและสังคม ของพื้นที่ศึกษา

วิธีการ

1. การรวบรวมข้อมูลของปัจจัยคุกคาม โดยรวบรวมข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2559 ถึง ปี พ.ศ. 2560

1.1 รวบรวมตำแหน่งของปัจจัยคุกคามจากฐานข้อมูลการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ (SMART Patrol) ของอุทยานแห่งชาติทับลาน และจำแนกปัจจัยคุกคามออกเป็น 2 ประเภท คือ การล่าสัตว์ ซึ่งรวมถึงการพบห่างสองสัตว์ กับดักสัตว์ ซากสัตว์และอาวุธปืน และการทำไม้โดยตรง โดยรวมถึงปางพักที่มีการทำไม้ที่พบเห็นโดยตรงและตอไม้ที่ถูกตัดโดยวิธีต่างๆ

1.2 รวบรวมตำแหน่งของปัจจัยคุกคามจากกล้องดักถ่ายอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ (Real Time Camera Trap) โดยเป็นการนำกล้องดักถ่ายอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ไปติดตั้งไว้ในจุดต่างๆ โดยพิจารณาในพื้นที่ที่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ตเท่านั้น เช่น ด่านสัตว์ เส้นทางที่ใช้ในการเข้าไปยังพื้นที่ป่า ถนนตรวจการ รวมถึงเส้นทางลาดตระเวนของเจ้าหน้าที่ด้วย และเมื่อได้รับการแจ้งเตือนจากกล้องดักถ่ายอัตโนมัติว่าการเคลื่อนไหวของบุคคลผ่านบริเวณกล้องดักถ่ายนั้น ให้ถือว่าบริเวณที่ติดตั้งกล้องนั้นๆ มีปัจจัยคุกคามเกิดขึ้น จากนั้นนำภาพที่ได้รับจากกล้องดักถ่ายแบบอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ มาจำแนกประเภทของปัจจัยคุกคาม และตำแหน่งที่ติดตั้งกล้องนั้นๆ โดยจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ การล่าสัตว์ และการทำไม้

2. การรวบรวมปัจจัยแวดล้อมทั้งด้านกายภาพ และด้านเศรษฐกิจและสังคม

สมโภชน์ (2560) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพต่อประสิทธิภาพการคุ้มครองเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานีและตาก โดยจากการศึกษาพบว่าปัจจัยคุกคามต่างๆ สามารถพบได้ทั้งบริเวณด้านในและด้านนอกโดยรอบของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้งที่ติดกับชุมชน จากการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการรวบรวมข้อมูลปัจจัยแวดล้อมด้านกายภาพ และด้านเศรษฐกิจและสังคมที่มีความสัมพันธ์กับการปรากฏของปัจจัยคุกคามในระยะขยายออกจากพื้นที่ศึกษาออกไป 5 กิโลเมตร โดยจะแบ่งเป็นด้านกายภาพ 7 ปัจจัย ดังต่อไปนี้: (1) ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม; (2) ระยะห่างจากหมู่บ้าน; (3) ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์ฯ; (4) ระยะห่างจากแหล่งน้ำ; (5) ความลาดชัน; (6) ความสูงจากระดับน้ำทะเล; และ (7) ประเภทของป่า ด้านเศรษฐกิจและสังคม 2 ปัจจัย ดังต่อไปนี้ (1) ความหนาแน่นประชากรเฉลี่ยรายตำบล; และ (2) รายได้เฉลี่ยต่อปีรายตำบล โดยรวบรวมและจัดทำข้อมูลปัจจัยแวดล้อมทั้งหมดให้อยู่ในรูปข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดปัจจัยคุกคามที่ได้จากฐานข้อมูลการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ (SMART Patrol) และจากกล้องดักถ่ายอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ (Real Time Camera Trap) ร่วมกับปัจจัยแวดล้อมด้านกายภาพ 7 ปัจจัย ด้านเศรษฐกิจและสังคม 2 ปัจจัย โดยการวิเคราะห์ด้วยการสร้างแบบจำลอง Maximum Entropy เพื่อจะได้แบบจำลองการกระจายของปัจจัยคุกคามจากแหล่งของข้อมูลทั้งสอง Phillips (2006) แบบจำลอง Maximum Entropy (Maxent) เป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้จากข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองที่มีเฉพาะลักษณะที่ให้ความสนใจปรากฏอยู่เท่านั้น โดยแบบจำลองดังกล่าวถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่นิยมเฉพาะในการศึกษาการกระจายของสิ่งมีชีวิต

4. ขั้นตอนการทำแผนที่ชั้นความเสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคาม

นำแบบจำลองการกระจายของปัจจัยคุกคามที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง Maximum Entropy มาเข้าสู่โปรแกรมทางด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อทำแผนที่ชั้นความเสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคาม โดยแบ่งชั้นความเสี่ยงต่อการปรากฏ ออกเป็น 5 ระดับ ดังต่อไปนี้: (1) ระดับความเสี่ยงน้อยที่สุด; (2) ระดับความเสี่ยงน้อย; (3) ระดับความเสี่ยงปานกลาง; (4) ระดับความเสี่ยงมาก; และ (5) ระดับความเสี่ยงมากที่สุด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยคุกคามบริเวณอุทยานแห่งชาติทับลานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559-พ.ศ. 2560 ระยะเวลา 2 ปี โดยแบ่งประเภทปัจจัยคุกคามเป็น 2 ประเภท (1) การล่าสัตว์; และ (2) การทำไม้ โดยเป็นข้อมูลการปรากฏของปัจจัยคุกคามจากกล้องดักถ่ายอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ทั้งหมด 246 จุด โดยเป็นการล่า 67 จุด และการทำไม้ 179 จุด และเป็นข้อมูลการปรากฏของปัจจัยคุกคามจากการเดินลาดตระเวนเชิงคุณภาพทั้งหมด 1,102 จุด โดยเป็นการล่า 164 จุด และการทำไม้ 938 จุด รวมจากทั้ง 2 แหล่งข้อมูล คิดเป็น 1,348 จุด แบ่งเป็นการล่า 231 จุด และการทำไม้ 1,117 จุด

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ โดยใช้แบบจำลองการกระจายชนิดพันธุ์ (Maximum entropy : Maxent) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแวดล้อมด้านกายภาพกับการปรากฏของปัจจัยคุกคาม โดยปัจจัยด้านกายภาพที่นำมาใช้มีทั้งหมด 7 ปัจจัย ดังต่อไปนี้: (1) ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม; (2) ระยะห่างจากหมู่บ้าน; (3) ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์ฯ; (4) ระยะห่างจากแหล่งน้ำ; (5) ความลาดชัน; (6) ความสูงจากระดับน้ำทะเล; และ (7) ประเภทของป่า โดยจากการสร้างแบบจำลองพบว่าปัจจัยแวดล้อมทางกายภาพที่มีค่า Percent contribution ที่มากจะส่งผลต่อการปรากฏที่มากด้วยเช่นกัน (นนท์, 2551) โดยจากการศึกษาในครั้งนี้ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด 3 ปัจจัย คือ ระยะห่างจากหมู่บ้าน, ระยะห่างจากถนน และความลาดชัน ตามลำดับ แสดงดัง Table 1

Table 1 Percent contribution of environmental factors

Variable	Percent contribution	Permutation importance
Distance from village	22.6	30.5
Distance from road	19.2	17.9
Slope	19.2	11.8
Elevation	15.3	15.3
Distance from ranger station	14.7	19
Forest type	4.6	1.9
Stream	4.4	3.6

2.2 ระยะห่างจากหมู่บ้าน จากการศึกษพบว่า การปรากฏของปัจจัยคุกคามบริเวณอุทยานแห่งชาติทับลานจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะห่างที่มากขึ้นจากหมู่บ้าน เป็นผลมาจากพื้นที่บริเวณโดยรอบอุทยานแห่งชาติทับลานมีพื้นที่ชุมชน

อยู่เป็นจำนวนมาก การเลือกจุดติดตั้งกล้องดักถ่ายอัตโนมัติแบบเรียลไทม์และการเดินลาดตระเวนจึงเลือกในพื้นที่ห่างจากพื้นที่ชุมชน เพื่อเป็นการลดการถูกสังเกตเห็นจากราษฎรในพื้นที่ อีกทั้งด้านในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลานมีการกระจายตัวของไม้พะยุงอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ในระยะห่างจากหมู่บ้านที่มากขึ้นจึงมีความน่าจะเป็นในการปรากฏของปัจจัยคุกคามที่มากขึ้นอีกด้วย โดยแกน X คือระยะห่างจากหมู่บ้าน และแกน Y คือค่าความน่าจะเป็นในการปรากฏของปัจจัยคุกคาม แสดงดัง Fig. 1

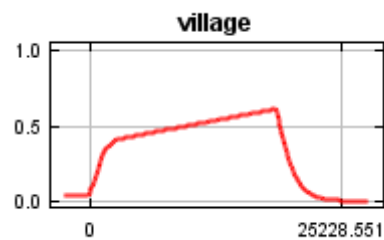


Fig. 1 Relationship between distance from villages and the occurrence of threat factors

2.3 ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม จากการศึกษาพบว่า ที่ระยะห่างใกล้เส้นทางคมนาคมที่น้อยก็ยังมีโอกาสพบการปรากฏของปัจจัยคุกคามเพิ่มมากขึ้นเท่านั้นและจะค่อยๆ ลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณอุทยานแห่งชาติทับลานมีเส้นทางคมนาคมอยู่บริเวณพื้นที่เป็นจำนวนมาก ทำให้ง่ายต่อการลักลอบเข้าไปในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลาน อีกทั้งเส้นทางคมนาคมเหล่านั้นก็ถูกใช้โดยสัตว์ป่าที่ออกมาหากิน ทำให้เกิดการติดต่อกับดักสัตว์ ทำห้วงดักยิงสัตว์ เพื่อล่าสัตว์ป่าเหล่านั้นในบริเวณใกล้ๆ เส้นทางคมนาคม และในระยะที่ไกลออกจากเส้นทางคมนาคมออกก็มีโอกาสพบการปรากฏของปัจจัยคุกคามที่เพิ่มขึ้นมาอีก เป็นผลเนื่องมาจากบริเวณพื้นที่ด้านในของอุทยานแห่งชาติทับลานมีการกระจายตัวของไม้พะยุงอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีโอกาสเกิดการปรากฏของปัจจัยคุกคามด้านการทำไม้ซึ่งอยู่ข้างในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลานอีกเป็นจำนวนมาก โดยแกน X คือระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม และแกน Y คือค่าความน่าจะเป็นในการปรากฏของปัจจัยคุกคาม แสดงดัง Fig. 2

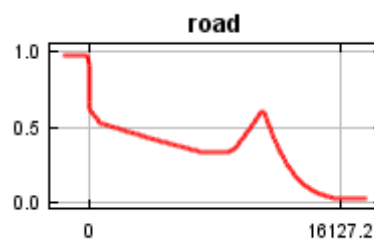


Fig. 2 Relationship between distance from road and the occurrence of threat factors

2.4 ความลาดชัน จากการศึกษาพบว่า ในที่ระดับความลาดชันน้อยมีโอกาสพบการปรากฏของปัจจัยคุกคามที่มาก เนื่องจากบริเวณพื้นที่ที่มีความลาดชันน้อยนั้นมีความเหมาะสมแก่การติดต่อกับดักสัตว์ป่า การตั้งที่ปักสำหรับเป็นปางพักไม้หรือปางพักพราน ในส่วนที่มีความลาดชันมากและมีโอกาสที่จะมีการปรากฏของปัจจัยคุกคามที่มากเป็นผลเนื่องจาก ภายในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลานที่มีการกระจายตัวของไม้พะยุงมีสภาพภูมิประเทศเป็นลักษณะเขาสูงชัน โดยแกน X คือค่าความลาดชัน และแกน Y คือค่าความน่าจะเป็นในการปรากฏของปัจจัยคุกคามแสดงดัง Fig. 3

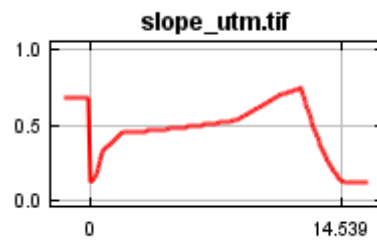


Fig. 3 Relationship between slope and the occurrence of threat factors

2.5 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ โดยการซ้อนทับกันระหว่างพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามในระดับมากที่สุด และระดับมาก โดยพบว่าจะอยู่ในพื้นที่ 26 ตำบลจากทั้งหมด 37 ตำบล เป็นตำบลที่มีความหนาแน่นของประชากรรายตำบลอยู่ที่ 4,025–12,167 คนต่อตำบล เฉลี่ยอยู่ที่ 6,638 คนต่อตำบล และมีรายได้รายปีต่อตำบลอยู่ที่ 56,384–98,696 บาทต่อคนต่อปี เฉลี่ยอยู่ที่ 70,508 บาทต่อคนต่อปี โดยทั้ง 26 ตำบล เป็นตำบลที่มีพื้นที่ส่วนใหญ่หรือพื้นที่ทั้งหมดอยู่ภายในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลาน และพื้นที่ศึกษา อีกทั้งราษฎรในพื้นที่เป็นกลุ่มคนที่อาศัยอยู่กับติดบริเวณป่าอนุรักษ์ ทำให้มีโอกาสสูงที่ราษฎรในพื้นที่จะลักลอบกระทำผิดทางด้านป่าไม้ แสดงดัง Fig. 4

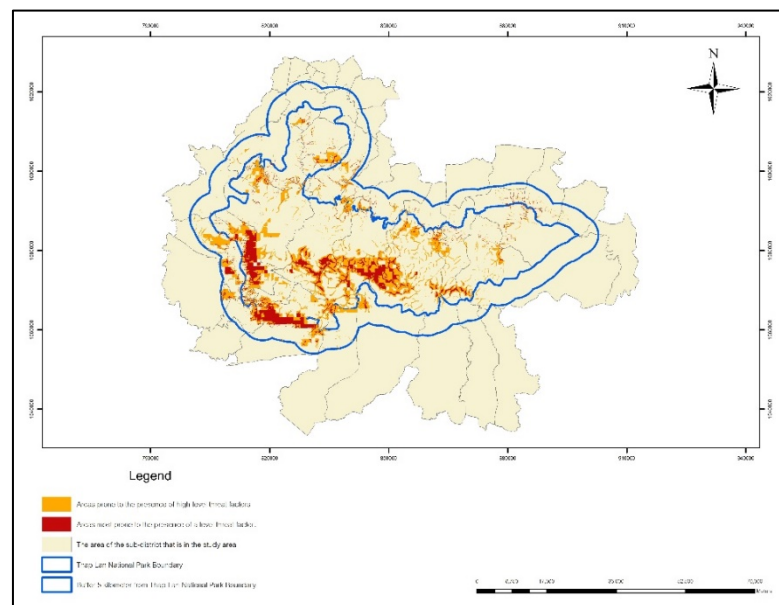


Fig.4 A map showing relationship between risk area and socio-economic environmental factors

2.6 จัดทำแผนที่แสดงความเสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ จากการนำแบบจำลองที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการกระจายชนิดพันธุ์ (Maximum entropy : Maxent) โดยแบ่ง 5 ระดับดังต่อไปนี้ และแสดงดัง แสดงดัง Fig. 5

- 1) ระดับความเสี่ยงน้อยที่สุด (Probability: 0.0–0.2) มีขนาดพื้นที่ 810,998 ไร่
- 2) ระดับความเสี่ยงระดับน้อย (Probability: 0.2–0.4) มีขนาดพื้นที่ 608,927 ไร่
- 3) ระดับความเสี่ยงระดับปานกลาง (Probability: 0.4–0.6) มีขนาดพื้นที่ 612,067 ไร่

- 4) ระดับความเสี่ยงระดับมาก (Probability :0.6–0.8) มีขนาดพื้นที่ 273,629 ไร่
- 5) ระดับความเสี่ยงมากที่สุด (Probability: 0.8–0.1) มีขนาดพื้นที่ 110,005 ไร่

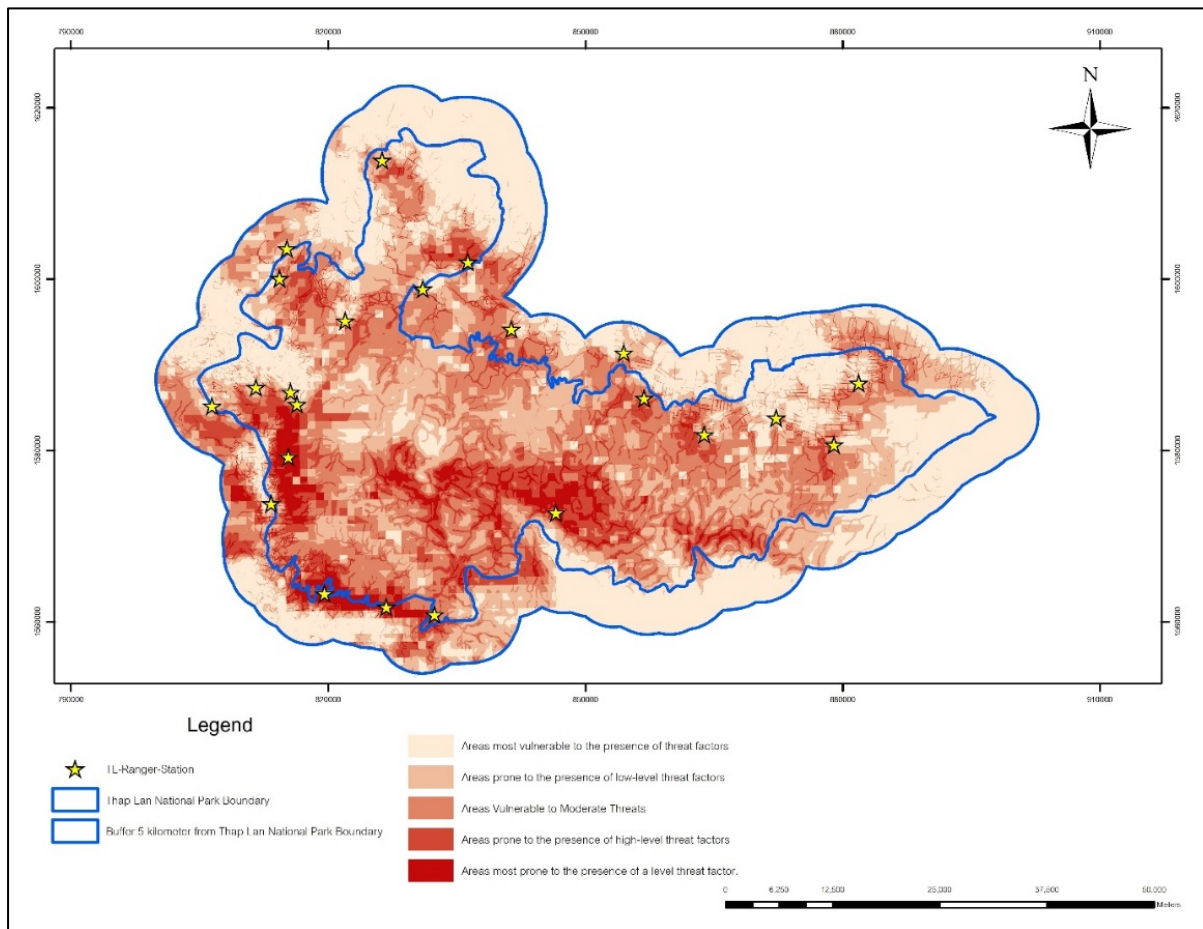


Fig. 5 A map showing areas of risk for the presence of threat factors in Thap Lan National Park

สรุป

การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามบริเวณอุทยานแห่งชาติทับลาน โดยใช้แบบจำลองการกระจายชนิดพันธุ์ (Maximum entropy) พบว่าปัจจัยแวดล้อมทางด้านกายภาพที่มีค่า Percent contribution ที่มากที่สุดส่งผลต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามที่มากด้วยเช่นกัน โดยปัจจัยแวดล้อมด้านกายภาพที่มีผลมากที่สุด 3 ปัจจัยจากทั้งหมด 7 ปัจจัย คือ ระยะห่างจากหมู่บ้าน, ระยะห่างจากถนน และความลาดชัน มีค่า Percent contribution เท่ากับ 22.6, 19.2 และ 19.2 ตามลำดับ และปัจจัยแวดล้อมด้านเศรษฐกิจสังคม จากการวิเคราะห์ซึ่งพื้นที่ โดยการซ้อนทับกันระหว่างพื้นที่เสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามในระดับมากที่สุด และระดับมาก โดยพบว่าจะอยู่ในพื้นที่ 26 ตำบลจากทั้งหมด 37 ตำบลของพื้นที่ศึกษา โดยเป็นตำบลที่มีความหนาแน่นของประชากรรายตำบลอยู่ที่ 4,025–12,167 คนต่อตำบล เฉลี่ยอยู่ที่ 6,638 คนต่อตำบล และมีรายได้รายปีต่อตำบลอยู่ที่ 56,384–98,696 บาทต่อคนต่อปี เฉลี่ยอยู่ที่ 70,508 บาทต่อคนต่อปี จากการนำแบบจำลองการกระจายมาเข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อสร้างแผนที่ขึ้นความเสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคาม พบว่าพื้นที่เสี่ยงต่อการปรากฏของปัจจัยคุกคามในระดับน้อยที่สุด, ความเสี่ยงในระดับน้อย, ความเสี่ยงในระดับปานกลาง, ความเสี่ยงในระดับมาก และความเสี่ยงในระดับมากที่สุด มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 810,998 ไร่, 608,927 ไร่, 612,067 ไร่, 273,629 ไร่, และ 110,005 ไร่ ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- นนท์ เขียวหวาน. 2551. การประเมินความหนาแน่น และการกระจายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่บริเวณลุ่มน้ำเพชรบุรีตอนบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรพรรณ เจ็ดอัสสิน. 2554. การวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการเกิดคตีป่าไม้ โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในเขตป่าสงวนแห่งชาติ จังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานอุทยานแห่งชาติ. 2558. ทับลาน (Thap Lan). กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. <http://portal.dnp.go.th/Content/nationalpark?contentId=986>
- สมโภชน์ มณีรัตน์. 2560. ระบบลาดตระเวนเชิงคุณภาพต่อประสิทธิภาพการคุ้มครองเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี และตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

การประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ของปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

Spatial risk assessment of threaten factor in Khao Yai National Park

วัฒน์ โรจนเกษตร^a, วรงค์ สุขเสวต^a, ปานวริศร์ ปานศรี^a, อิงอร ไชยยศ^b, ประทีป ด้วงแค^{a,*}

Wattana Rotjanakaset^a, Warong Suksavate^a, Paanwaris Paansri^a, Aingorn Chaiyes^b, Prateep Duengkae^{a,*}

^aคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

^bสาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี 11120

^aFaculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bSchool of Agricultural and Cooperatives, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi, 11120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: prateep.du@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาเรื่องการประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ของปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบสถานที่ในการลักลอบเข้ามากระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้โดยทำการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ เพื่อรวบรวมข้อมูลตั้งแต่ พ.ศ. 2561 ถึง 2563 ระยะเวลา 3 ปี โดยทำการศึกษาด้วยการวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยเชิงพื้นที่จำนวน 8 ปัจจัย โดยใช้โมเดลเชิงเส้นโดยนัยทั่วไป ผลการศึกษาพบว่าข้อมูลภาพถ่ายของการลักลอบเข้ามากระทำผิด ทั้งสิ้น จำนวน 86 ครั้ง โดยพบว่าปัจจัยเชิงพื้นที่ 3 ปัจจัย ความสูงจากระดับน้ำทะเล ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม และ ระยะห่างจากโป่ง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในการบริหารจัดการพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยสามารถวางแผน ปรับเปลี่ยนสถานที่ในการลาดตระเวนโดยสามารถตอบสนองต่อบริเวณพื้นที่ที่มีความเสี่ยงได้อย่างทันท่วงที และใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: ปัจจัยคุกคาม, ระบบเฝ้าระวังและต่อต้านการกระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้

Abstract

The study on the spatial risk assessment of threat factors in Khao Yai National Park had the objective to detect the area of illegal forest resources offenses by the installation of a real-time camera to collect data from 2018 to 2020, totaling 3 years. The study was carried out by analyzing 8 spatial factors using a generalized linear model (GLMs). The results revealed that there were photographic data showing smuggling 86 times. It was found that 3 spatial factors, including meters above sea level, distance from the route, and distance from mineral lick, were related with statistical significance. The results would be useful in the management of Khao Yai National Park in terms of planning, relocating patrol to immediately respond to risky areas, and utilizing technology for maximization.

Keywords: Network centric anti poaching system, Threaten factors

คำนำ

ภัยคุกคามของทรัพยากรป่าไม้และสัตว์ป่าในปัจจุบันนั้น มาจากสาเหตุหลักจากการเพิ่มขึ้นของประชากรของพลเมืองโลกอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าธรรมชาติเพื่อไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม การตัดไม้โดยไม่มีหลักการ การลักลอบล่า และค้าสัตว์ป่าข้ามชาติ จนส่งผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพและการสูญเสียพันธุ์ของสัตว์ป่าหลายชนิด ซึ่งเป็นปัญหาระดับโลกจนถึงในระดับพื้นที่ผืนป่า หลายประเทศจึงได้ร่วมกันดำเนินการเพื่อแก้ไขปัญหานี้เพื่อต่อต้านการกระทำผิดเกี่ยวกับกฎหมายป่าไม้ ให้มีประสิทธิภาพและทันต่อสถานการณ์ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่และกำลังเจ้าหน้าที่ที่หลากหลายรูปแบบประเทศไทยเองก็ได้ทดลองนำระบบเหล่านี้มาใช้ในระยะหนึ่งแล้ว แต่ยังไม่มีการวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นรูปแบบในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่เป็นหนึ่งในอุทยานแห่งชาติที่อยู่ในกลุ่มป่ามรดกโลกคงพญาเย็น-เขาใหญ่ เป็นอุทยานแห่งชาติแห่งแรกของประเทศไทย และเป็นอุทยานมรดกของกลุ่มประเทศอาเซียน โดยอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มีเนื้อที่ประมาณ 1,353,471.53 ไร่ โดยครอบคลุมพื้นที่ 4 จังหวัด โดยอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ได้มีการนำระบบการลาดตระเวนเชิงคุณภาพ (SMART Patrol System) ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคุ้มครองพื้นที่ และทรัพยากรธรรมชาติต่างๆ ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2557 และในปี พ.ศ. 2561 มีการนำระบบเฝ้าระวังและต่อต้านการกระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้ (Network Centric Anti-Poaching System; NCAPS) มาประยุกต์ใช้จนถึงปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยคุกคามที่มีต่อพื้นที่แห่งนี้ยังคงพบเจออยู่อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าในการประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ของปัจจัยคุกคามในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่สามารถทำให้ทราบพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการลักลอบเข้ามากระทำผิดในเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่และนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ มาวางแผนในการป้องกันการลักลอบกระทำผิดในแต่ละพื้นที่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในงานด้านการป้องกันทรัพยากรป่าไม้และสัตว์ป่าต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. กล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติแบบเรียลไทม์
2. คอมพิวเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล
3. โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
4. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ
5. ข้อมูลพื้นฐานของหมู่บ้าน เส้นทางคมนาคม ที่อยู่รอบแนวเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ในระยะ 5 กิโลเมตร

วิธีการ

1. การรวบรวมข้อมูล

1.1 ติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ ยี่ห้อ Spartan รุ่น GoCam 4G/LTE โดยทำการติดตั้งบนต้นไม้ที่มีความประมาณ 2-3 เมตร เหนือพื้นดิน โดยหันกล้องไปยังทิศทางบริเวณที่มีปัจจัยคุกคามที่สำคัญ เช่น ต้นพะยูน ต้นกฤษณา ตลอดจนบริเวณโป่งที่พบร่องรอยของสัตว์ป่า และบริเวณที่มักพบปัจจัยคุกคาม เช่น ร่องรอยการตัดไม้ ปางพัก

และร่องรอยปลอกกระสุนปืน เป็นต้น ในช่วงปี พ.ศ. 2561-2563 โดยติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ในปี 2561 จำนวน 10 ตัว ปี 2562 จำนวน 14 ตัว และปี 2563 จำนวน 5 ตัว รวมทั้งสิ้น จำนวน 29 ตัว

1.2 รวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่เป็นปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องและมีความสัมพันธ์ต่อการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการลักลอบเข้ามากระทำผิด โดยจัดเตรียมข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ทั้งหมด 8 ปัจจัย ได้แก่: (1) ความสูงจากระดับน้ำทะเล; (2) ความลาดชัน; (3) การปกคลุมเรือนยอด; (4) ระยะห่างจากโป่ง; (5) ระยะห่างจากแหล่งน้ำ; (6) ระยะห่างจากหมู่บ้าน; (7) ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ; และ (8) ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ที่ดักถ่ายภาพการลักลอบเข้ามากระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ร่วมกับ 8 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ (1) ความสูงจากระดับน้ำทะเล; (2) ความลาดชัน; (3) การปกคลุมเรือนยอด; (4) ระยะห่างจากโป่ง; (5) ระยะห่างจากแหล่งน้ำ; (6) ระยะห่างจากหมู่บ้าน; (7) ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ; และ (8) ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวพยากรณ์กับตัวแปรเกณฑ์ และทำการประเมินปัจจัยที่มีผลต่อการลักลอบเข้ามากระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยการใช้วิเคราะห์โมเดลสมการเชิงเส้นโดยนัยทั่วไป (Generalized Linear Models: GLM) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตามที่ไม่ใช่ข้อจำกัดว่าการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนในตัวแปรตามจะต้องเป็นแบบปกติเท่านั้น และข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เป็นได้ทั้งตัวเลข และไม่เป็นตัวเลข (Fox, 2008)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการเก็บรวบรวมข้อมูล

การศึกษาครั้งนี้กำหนดพื้นที่ศึกษาในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ บริเวณที่มีการลักลอบเข้ามากระทำผิดระหว่างปี พ.ศ. 2561-2563 ระยะเวลา 3 ปี โดยทำการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติแบบเรียลไทม์พร้อมบันทึกพิกัดติดตั้ง จำนวน 28 ตัว ในแต่ละเขตการจัดการอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ที่มีความเสี่ยงต่อการกระทำผิด พบว่ามีจำนวนข้อมูลภาพถ่ายของการลักลอบเข้ามากระทำผิด ทั้งสิ้น จำนวน 86 ภาพ โดยสามารถจำแนกประเภทการกระทำผิดออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่: (1) ทำไม้; (2) ล่าสัตว์ป่า; (3) เก็บหาของป่า; และ 4) การลักลอบเข้าพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Data photo form Real-time camera trap threaten factors

Year	Threaten factors			
	Logging	Hunting	Harvesting of non-timber forest products	Smuggling into national park areas
2018	7	3	2	14
2019	7	3	5	27
2020	-	2	2	14
Total	14	8	9	55

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์เชิงพื้นที่ โดยใช้โมเดลเชิงเส้นโดยนัยทั่วไป (Generalized Linear Models: GLM) เพื่อหาที่ตัวแปรข้อมูลพื้นฐานที่มีความสัมพันธ์มากที่สุดต่อการลักลอบเข้ามากระทำผิด โดยวิเคราะห์จากทั้งหมด 8 ปัจจัย ได้แก่: (1) ความสูงจากระดับน้ำทะเล; (2) ความลาดชัน; (3) การปกคลุมเรือนยอด; (4) ระยะห่างจากโป่ง; (5) ระยะห่างจากแหล่งน้ำ; (6) ระยะห่างจากหมู่บ้าน; (7) ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ; และ (8) ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม โดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานที่มีความสัมพันธ์มากที่สุดต่อการลักลอบเข้ามากระทำผิด 3 ปัจจัย คือ (1) ความสูงจากระดับน้ำทะเล; (2) ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม; และ (3) ระยะห่างจากโป่ง ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Analysis of threaten factor in Khao Yai National Park

Observation	Estimate	Std. Error	p-value
DEM	-2.899	1.088e-01	0.00939
Road	8.680	2.995e-04	0.00487
Salt	-2.600	8.695e-05	0.00373

Note: DEM = height above sea level, Road = distance from a transportation route, Salt = distance from the bulge

1. ความสูงจากระดับน้ำทะเล จากการศึกษาระยะห่างและวิเคราะห์ผลพบว่ายิ่งพื้นที่ที่มีความสูงน้อยมีโอกาสพบการกระทำผิดที่มากกว่าพื้นที่ที่มีความสูงมาก เนื่องจากผู้กระทำความผิดสามารถเข้าไปกระทำความผิดได้ง่ายสอดคล้องกับการศึกษาของ ธิวิลาส (2559) ในพื้นที่ศึกษาอุทยานแห่งชาติเขื่อนศรีนครินทร์ และ อนุรุทธ์ (2548) กล่าวว่าพื้นที่ที่มีการบุกรุกส่วนใหญ่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลน้อย ในพื้นที่ศึกษาอุทยานแห่งชาติพุเตย และ จรรย์ธร (2541) ที่กล่าวไว้ว่าระดับค่าความสูงของพื้นที่ที่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบุกรุกพื้นที่ป่า และ สุภาภรณ์ (2559) พื้นที่ป่าที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางมาก โอกาสที่จะพบการบุกรุกจะน้อยลง เนื่องจากมีความยากลำบากในการเข้าถึง

2. ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม จากการศึกษาระยะห่างและวิเคราะห์ผลพบว่าหากมีระยะห่างจากเส้นทางคมนาคมมากขึ้น ทำให้มีโอกาสพบการกระทำผิดที่มากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากในพื้นที่ศึกษาอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ได้มีการตั้งหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติใกล้กับเส้นทางคมนาคม และมีเจ้าหน้าที่ออกตรวจการณ์ด้วยรถยนต์บริเวณเส้นทางคมนาคมรอบแนวเขตอุทยานแห่งชาติเป็นประจำ และมีรถยนต์ของนักท่องเที่ยวที่สัญจรเป็นจำนวนมาก ไม่เหมาะแก่การที่จะลักลอบเข้ามากระทำความผิด หรือกระทำความผิดที่ใกล้กับเส้นทางคมนาคมของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ผู้กระทำความผิดจึงหลีกเลี่ยงที่จะกระทำความผิดใกล้กับเส้นทางคมนาคม สอดคล้องกับ ธนวัฒน์ (2551) ว่าพื้นที่ที่มีช่วงระยะห่างจากเส้นทางคมนาคมที่มีความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าอนุรักษ์อุทยานแห่งชาติแก่งจามมากที่สุดอยู่ที่ช่วงระยะห่างจากเส้นทางคมนาคมมากกว่า 3,000 เมตร และละม่อม (2548) ได้ทำการศึกษาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดที่ตั้งหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยพบว่าในพื้นที่บ้านคลองปลากั้งเป็นหมู่บ้านที่อยู่ห่างไกลจากเส้นทางคมนาคมสายหลัก แต่อยู่ใกล้กับอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ มีการเข้าใช้ประโยชน์จากป่าได้ตลอดเวลา และ

จรัณธร (2541) ได้ทำการศึกษาโดยได้ทำ Buffer ออกจากแนวเส้นทางคมนาคมข้างละ 2 กิโลเมตร พบว่า พื้นที่ที่อยู่ในแนวรัศมีของเส้นทางคมนาคม มีการบุกรุกน้อยกว่าพื้นที่อื่นที่ไม่ได้อยู่ในรัศมี 2 กิโลเมตร จากแนวเส้นทางคมนาคม

3. ระยะห่างจากโป่ง จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลพบว่า ยิ่งเข้าไปใกล้โป่งมากยิ่งพบการกระทำผิดที่มากขึ้น ซึ่งโป่งนั้นจัดเป็นปัจจัยนิเวศของสัตว์ป่าที่ต้องการเสริมแร่ธาตุให้กับร่างกาย โดยเฉพาะสัตว์กินพืช และสัตว์จำพวกสัตว์ปีก สัตว์ป่าจึงมีการเข้ามาใช้ประโยชน์จากโป่ง โป่งจึงเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การดักซุ่มเพื่อทำการล่าสัตว์ป่า โดยในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่นั้นพบว่ามีการเข้ามากระทำผิดโดยการล่าสัตว์ พบว่าสัตว์ป่าที่ถูกล่ามีทั้ง สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดกลาง และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ และสัตว์ปีก สอดคล้องกับงานวิจัยของอำนาจ (2546) ทำการศึกษาที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าคลองเคียวเฉลิมพระเกียรติ ที่กล่าวว่า การล่าสัตว์ป่าในพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม รองลงมาเป็นสัตว์จำพวกสัตว์ปีก

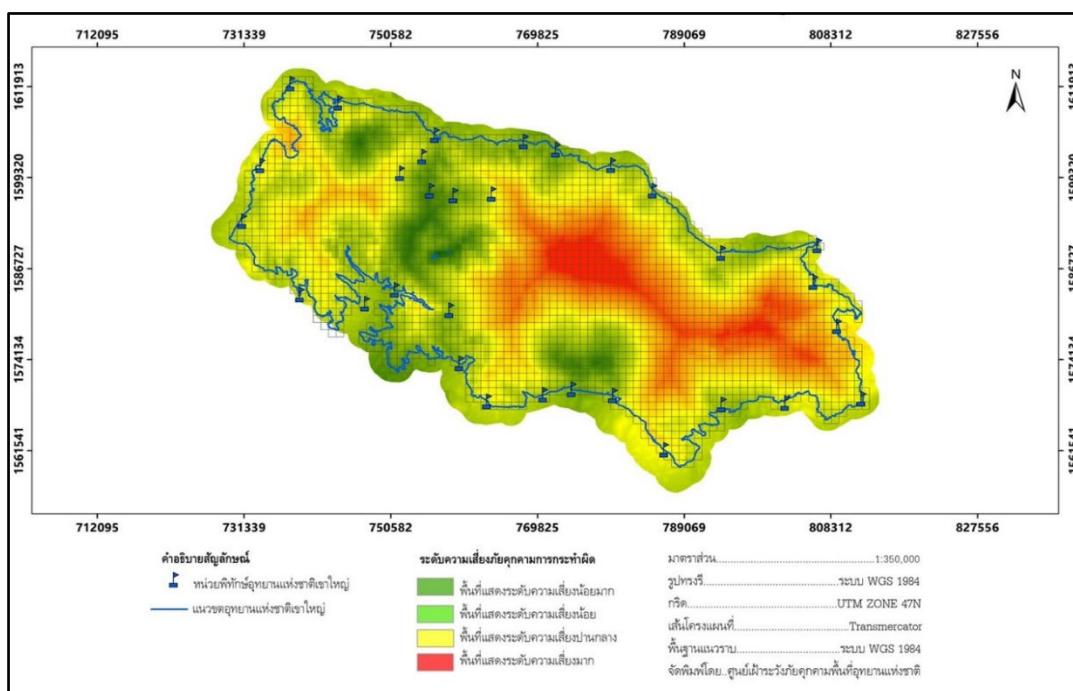


Fig. 1 Map showing area at risk of threaten factor in Khao Yai National Park

สรุป

พื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการลักลอบเข้ามากระทำผิดด้านทรัพยากรป่าไม้ในเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ พบว่ามี 3 ปัจจัยจากทั้งหมด 8 ปัจจัย ที่มีความสัมพันธ์มากที่สุด คือ: (1) ความสูงจากระดับน้ำทะเล หากพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลต่ำมีโอกาสที่พบการกระทำผิดที่มากกว่าพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูง เนื่องจากผู้กระทำผิดสามารถเข้าไปกระทำผิดได้โดยสะดวก; (2) ระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม หากมีระยะห่างจากเส้นทางคมนาคมมากขึ้น ทำให้มีโอกาสพบการกระทำผิดที่มากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากในพื้นที่ศึกษาอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ได้มีการให้เจ้าหน้าที่ขับรถคอยตรวจถนนรอบแนวเขตอุทยานแห่งชาติเป็นประจำ และยังมีรถยนต์ของนักท่องเที่ยวที่สัญจรเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่เหมาะแก่การที่จะลักลอบเข้ามากระทำผิด หรือกระทำความผิดที่ใกล้กับถนนของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่; และ (3) ระยะห่างจากโป่ง หากมีระยะห่างจากโป่งน้อย มีโอกาสพบการกระทำผิดที่มากขึ้น ซึ่งโป่งนั้น

จัดเป็นปัจจัยนิเวศของสัตว์ป่าที่ต้องการเสริมแร่ธาตุให้กับร่างกายโดยในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่นั้นพบว่าการที่มีการเข้ามากระทำคามผิดโดยการล่าสัตว์นั้นพบว่าสัตว์ป่าที่ถูกล่ามากที่สุด คือ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก

เอกสารอ้างอิง

- จรัญธร บุญญาภาพ. 2541. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุกของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธวัชฉวี ประไพ. 2551. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุกพื้นที่ป่าอนุรักษ์และพื้นที่โดยรอบของอุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิภาส ศิริเลิศ. 2559. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตอุทยานแห่งชาติเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ละม่อม วรพุท. 2548. ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดที่ตั้งหน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภาภรณ์ ผ่องศาลา. 2559. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่จาวฝั่งขวา จังหวัดลำปาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนุรุทธิ์ สุทธิวารินทร์กุล. 2548. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกของอุทยานแห่งชาติพุเตย จังหวัดสุพรรณบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อำนาจ ม่วงปรางค์. 2546. ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการลักลอบล่าสัตว์ป่าในพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าคลองเคียวเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Fox, J. 2008. Applied regression analysis and generalized linear models. SAGE Publication. USA.

ความมากมายและช่วงเวลาการทำกิจกรรมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมด้วยการติดกล้องดักถ่ายภาพ บริเวณจัดการทุ่งหญ้า ในอุทยานแห่งชาติทับลาน

Study of abundance and activity patterns of mammals using camera trap in managed tropical grassland in Thap Lan National Park

ภาคภูมิ อร่ามศิริรุจิเวทย์^a, วรงค์ สุขเสวต^a, อิงอร ไชยยศ^b, ประทีป ดั่งแคว^{a,*}

Pakpoom Aramsirujijwet^a, Warong Suksavate^a, Aingorn Chaiyes^b, Prateep Duengkae^{a,*}

^aคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^bสาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี 11120

^aFaculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

^bSchool of Agricultural and Cooperatives, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi 11120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: prateep.du@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาความมากมายสัมพันธ์และช่วงเวลาการทำกิจกรรมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ด้วยการติดกล้องดักถ่ายภาพ บริเวณจัดการทุ่งหญ้า จำนวน 28 ตำแหน่ง ครอบคลุมพื้นที่ 1.2 ตารางกิโลเมตร ในห้วงเดือนกุมภาพันธ์ 2563–2564 รวม 9,008 กับดักคืน สามารถบันทึกภาพสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมได้ จำนวน 9,392 ภาพ รวมจำนวน 2,477 เหตุการณ์ที่เป็นอิสระต่อกัน ผลการศึกษาสามารถจำแนกสัตว์ป่าได้ 6 อันดับ 13 วงศ์ 21 ชนิด โดยพบค่าความมากมายสัมพันธ์ของหมูป่ามีค่าสูงที่สุด รองลงมา เป็น กวางป่า 5.66% และกระทิง 2.49 ตามลำดับ ในขณะที่เสือโคร่งพบค่าความมากมายสัมพันธ์ 0.17% การศึกษาช่วงเวลาการทำกิจกรรมพบสัตว์ป่าส่วนใหญ่มีช่วงเวลากิจกรรมในเวลากลางคืน (Nocturnal) ยกเว้น เก้ง หมูป่า และเสือโคร่ง มีช่วงกิจกรรมทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน (Cathemeral) โดยพบว่าเสือโคร่งมีช่วงเวลาการซ้อนทับกับหมูป่า 48% เก้ง 45% กระทิง 44% และ กวางป่า 34% การศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของพื้นที่จัดการทุ่งหญ้า ซึ่งนำไปถึงการวางแผนการจัดการในการอนุรักษ์ สัตว์ผู้ล่าขนาดใหญ่ และรวมถึงการปกป้องถิ่นที่อยู่อาศัยที่สำคัญ

คำสำคัญ: ความมากมาย, ช่วงเวลาการทำกิจกรรม, สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่

Abstract

The research on abundance of wildlife and their temporal activity patterns at Thap Lan National Park using camera trapping technique was conducted during February 2020 to February 2021. Twenty-eight camera trap stations were set up in wildlife habitat management areas resulted in 9,008 trap nights, 9,392 wildlife images were identified with 2,477 independent events. Results of species abundance of mammal showed that, there were six orders, 13 families, 21 species. Results of species richness showed that, wild pig is the highest abundance 11.36%, sambar deer 5.66% and gaur 2.49%, tiger 0.17% respectively. The analysis of the activity patterns of large mammals were most active at night which identified as nocturnal. In contrast, tiger, red muntjac and wild pig varied throughout the day and night, considered as cathemeral. The temporal overlap between tiger and wild pig 48%, muntjac 45%, gaur 44% and sambar 34% respectively. Results of usages of wildlife in habitat management areas is an important step to guide managers to develop strategic plans to conserve large predators and protect their habitats.

Keywords: Abundance, Activity patterns, Large mammals

คำนำ

อุทยานแห่งชาติทับลาน เป็นพื้นที่อนุรักษ์ขนาดใหญ่และมีภูมิประเทศตั้งอยู่ใจกลางในผืนป่ามรดกโลกดงพญาเย็น-เขาใหญ่ มีสภาพธรรมชาติที่มีความอุดมสมบูรณ์ มีทรัพยากรธรรมชาติหลากหลาย สังคมป่าไม้ส่วนมากเป็นป่าดิบแล้งผสมกับป่าเบญจพรรณสลับกับทุ่งหญ้าตามธรรมชาติ โดยเฉพาะทุ่งหญ้าตามธรรมชาติ มีความสำคัญต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกลุ่มกินพืชเป็นอย่างมาก แต่ปัจจุบันทุ่งหญ้าตามธรรมชาติพบได้น้อยกว่าสังคมป่าชนิดอื่น สาเหตุหลักเกิดจากการรุกรานจากกิจกรรมมนุษย์ ทั้งในรูปแบบการยึดครองพื้นที่ และการเผาเพื่อการเก็บหาของป่าโดยไม่มี การควบคุม อีกทั้งอุทยานแห่งชาติทับลานยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศ อาทิเช่น เสือโคร่ง โดยเสือโคร่งจำเป็นต้องใช้ฐานจำนวนประชากรเหยื่อที่มีปริมาณเหมาะสมในการดำรงชีพ และประชากรเหยื่อหลักของเสือโคร่งส่วนใหญ่ได้แก่สัตว์ป่ากลุ่มกินพืชเป็นหลัก โดยเฉพาะกลุ่มสัตว์กีบ อาทิ ช้าง วัวแดง กระตัง กวาง หมูป่า เก้ง เป็นต้น (สมพร, 2560)

การศึกษาค้นคว้าความหลากหลายสัมพันธ์และช่วงเวลาการทำกิจกรรมของสัตว์ป่ากลุ่มสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่เข้ามาใช้ประโยชน์ในบริเวณจัดการทุ่งหญ้าซึ่งเป็นพื้นที่ที่อุทยานแห่งชาติทับลานได้จัดการโดยการชิงเผาในพื้นที่ป่าทุ่งหญ้าเดิม จึงนำไปสู่แผนการจัดการทรัพยากรสัตว์ป่าโดยเฉพาะสัตว์ผู้ล่าขนาดใหญ่ และจัดการพื้นที่ทุ่งหญ้าตามธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ข้อจำกัดในการศึกษาการทำกิจกรรมของสัตว์ป่า ทั้งในเรื่องของสภาพภูมิประเทศที่เข้าถึงยาก สภาพการมองเห็นที่จำกัดด้วยความรกทึบ รวมทั้งพฤติกรรมสัตว์ป่าที่มักหลบซ่อนเมื่อรับรู้การปรากฏของทีมนักสำรวจ ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้ใช้กล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่า (Camera traps) เป็นอุปกรณ์การศึกษาเนื่องจากเป็นวิธีการที่ส่งผลกระทบต่อสัตว์ป่าน้อย โดยผลการศึกษาจะใช้เป็นข้อมูลการติดตาม ความมากมายของกลุ่มสัตว์ป่า ช่วงเวลาที่สัตว์ป่าใช้ประโยชน์ในพื้นที่จัดการทุ่งหญ้า รวมทั้งประชาสัมพันธ์เพื่อการอนุรักษ์สัตว์ป่า ตลอดจนการจัดการถิ่นอาศัยและรักษาพื้นที่ทุ่งหญ้าตามธรรมชาติที่ทรงคุณค่านี้ให้อำนวยประโยชน์สืบต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. กล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่าอัตโนมัติ ยี่ห้อ Cuddeback และ Bushnell สามารถบันทึกภาพได้ในเวลากลางคืนพร้อมหน่วยความจำ 32 GB และแบตเตอรี่ ขนาด AA 1.5 V
2. เข็มทิศ, เครื่องหาพิกัดตำแหน่งภูมิศาสตร์ (GPS)
3. โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, โปรแกรม R, โปรแกรม DigiKam

วิธีการ

1. วางแผนกำหนดพื้นที่ศึกษาเพื่อให้เหมาะสมต่อสภาพพื้นที่ และจำนวนกล้องที่มีการกำหนดขอบเขตของพื้นที่ติดตั้งกล้อง จึงกำหนดด้วยโปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในพื้นที่จัดการทุ่งหญ้า ครอบคลุมพื้นที่ 1.2 ตารางกิโลเมตร และกำหนดห่างกันประมาณ 200 เมตร อย่างเป็นระบบ (systematic system) เพื่อให้สามารถบันทึกภาพและอยู่ภายในอาณาเขต (home range) ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทุกชนิด จำนวน 28 จุด จำนวนจุดละ 1 ตัว ระยะเวลาในการติดตั้งกล้อง 12 เดือน และเปลี่ยนถ่ายเมมโมรี่และแบตเตอรี่เดือนละ 1 ครั้ง เพื่อป้องกันการสูญหายข้อมูลจากช่างป่าทำลายกล้อง และพืชพรรณที่ขึ้นปกคลุมหน้ากล้อง

2. การตั้งกล้องดักถ่ายภาพ กำหนดความสูงหน้ากล้องที่ความสูง 80 เซนติเมตร และหันหน้ากล้องไปในทิศทางที่มีความโล่งเตียนมากที่สุด และกล้องทุกตัวจะถูกตั้งค่าเพื่อถ่ายภาพนิ่งจำนวน 1 ภาพ โดยแต่ละภาพนิ่งห่างกัน 2 วินาที และปิดระบบ DST อัตโนมัติเพื่อป้องกันการบวกลบเวลา

3. การวิเคราะห์ข้อมูล ทำการจำแนกภาพสัตว์ป่า ที่บันทึกได้โดยอ้างอิงเอกสารของ (Lekagul & Mcneely, 1997) เป็นหลัก โดยใช้เป็นรูปภาพหรือเหตุการณ์ที่มีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งดูจากการบันทึกวันที่ และเวลาที่ปรากฏที่รูป เกณฑ์ที่ใช้แยกเหตุการณ์หรือรูปภาพสัตว์ที่เป็นอิสระต่อกัน (criterion for independency of animal photographs) (O'Brien et al., 2003)

3.1) ถ้าเป็นสัตว์ป่าชนิดเดียวกันบันทึกภาพได้ในจุดตั้งกล้องเดียวกันภายในเวลา 30 นาที นับเป็นแค่ 1 เหตุการณ์

3.2) ถ้าเป็นสัตว์ป่าชนิดเดียวกันบันทึกภาพได้ในจุดตั้งกล้องเดียวกัน แต่สามารถแยกได้ว่าเป็นคนละตัว จะนับเป็น 2 เหตุการณ์

3.3) ถ้าเป็นสัตว์ป่าชนิดเดียวกันแต่บันทึกภาพได้ต่างวันและเวลาคนละจุดตั้งกล้องจะนับทั้ง 2 เหตุการณ์ การประเมินความมากมายสัมพัทธ์ (Relative abundance index: RAI) ของสัตว์แต่ละชนิด เป็นการประเมินจากอัตราการถ่ายภาพ ซึ่งเป็นดัชนีที่มีความสัมพันธ์กับจำนวนหรือความหนาแน่นของประชากรสัตว์ป่า โดยค่าดัชนีจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัตว์ป่ามีความหนาแน่นมากขึ้น (Mohd-Azlan and Sharma, 2006)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความมากมายสัมพัทธ์ (\% RAI)} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ถ่ายภาพสัตว์ได้} \times 100}{\text{จำนวน Trap night ทั้งหมด}}$$

4. นำเวลาที่บันทึกในภาพสัตว์ป่าแต่ละชนิด มาจัดเรียงความถี่ของแต่ละช่วงเวลา โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสำเร็จรูปทางสถิติ (R) เพื่อวิเคราะห์ช่วงเวลาการกิจกรรมในรอบ 24 ชั่วโมง และช่วงเวลาการซ่อนทับ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่าในบริเวณจัดการทุ่งหญ้าในอุทยานแห่งชาติทับลาน สามารถบันทึกภาพชนิดสัตว์ป่ากลุ่มสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จำนวน 9,392 ภาพ จำนวน 2,477 เหตุการณ์ที่เป็นอิสระต่อกันจำแนกได้ 6 อันดับ 13 วงศ์รวม 21 ชนิด ดังแสดงใน Table 1 และในการศึกษายังพบรายชนิดสัตว์ป่าที่ไม่ได้อาศัยในสังคมทุ่งหญ้าเป็นหลัก อาทิเช่น นากใหญ่ขนเรียบ, หมาไม้, กระจงหนู, ลิงกัง, หมีควาย, และ หมีหมา โดยสามารถบันทึกภาพในกล้องดักถ่ายภาพในบริเวณพื้นที่รอยต่อระหว่างทุ่งหญ้าตามธรรมชาติและป่าธรรมชาติ หรือในพื้นที่ป่าธรรมชาติเดิมซึ่งอยู่ใกล้แหล่งน้ำ ซึ่งบันทึกจำนวนเหตุการณ์ไม่เกิน 2 ครั้งต่อปี และพบจำนวนเหตุการณ์ฟังพอนธรรมชาติ จำนวน 3 ครั้งต่อปี เนื่องจากนิเวศวิทยาฟังพอนธรรมดามักหลบอาศัยในโพรงดิน (Lekagul, Mcneely, 1997) จึงทำให้ไม่สามารถบันทึกภาพได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาของสมพร (2564) ที่ศึกษาประชากรเสือโคร่งและการกระจายของเหยื่อในผืนป่ามรดกโลกดงพญาเย็น - เขาใหญ่ ด้วยการตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่าจำนวน 242 จุด ครอบคลุม 5 พื้นที่ป่าอนุรักษ์ พบสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจำนวน 33 ชนิด นับว่าภายในพื้นที่จัดการทุ่งหญ้าภายในอุทยานแห่งชาติทับลานพบจำนวนสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 63 % ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทั้งหมดในพื้นที่ทั้งกลุ่มป่า

Table 1 Diversity of large mammals using camera traps in managed tropical grassland

No.	Common name	Scientific name	No. of Photo	No. of Independence
Order Artiodactyla				
Family Suidae				
1.	Boar Wild	<i>Sus scrofa</i>	3,742	1,023
Family Cervidae				
2.	Sambar Deer	<i>Rusa unicolor</i>	2,061	510
3.	Muntjac Red	<i>Muntiacus muntjak</i>	286	76
Family Bovidae				
4.	Gaur	<i>Bos gaurus</i>	1,111	224
Family Tragulidae				
5.	Lesser mouse deer	<i>Tragulus kanchil</i>	2	1
Order Proboscidea				
Family Elephantidae				
6.	Elephant	<i>Elephas maximus</i>	1,188	68
Order Carnivora				
Family Viverridae				
7.	Civet Small Indian	<i>Viverricula indica</i>	405	217
8.	Large Spotted Civet	<i>Viverra megaspila</i>	47	21
9.	Palm Civet Common	<i>Paradoxurus hermaphroditus</i>	259	110
10.	Common Mongoose	<i>Herpestes javanicus</i>	3	3
Family Felidae				
11.	Tiger	<i>Panthera tigris</i>	68	15
12.	Leopard Cat	<i>Prionailurus engalensis</i>	14	7
Family Canidae				
13.	Jackal Golden	<i>Canis aureus</i>	18	15
14.	Dhole	<i>Cuon affinis</i>	23	7
Family Mustelidae				
15.	Yellow throated Marten	<i>Martes flavigula</i>	2	2
16.	Smooth coated Otter	<i>Lutrogale perspicillata</i>	2	1
Family Ursidae				
17.	Black Bear Asiatic	<i>Ursus thibetanus</i>	2	2
18.	Sun Bear Malayan	<i>Helarctos malayanus</i>	1	1
Order Primates				
Family Cercopithecidae				
19.	Macaque Pig Tail	<i>Macaca nemestrina</i>	1	1
Order Lagomorpha				
Family Leporidae				
20.	Hare Burmese	<i>Lepus peguensis</i>	40	10
Order Rodentia				
Family Hystricidae				
21.	Porcupine Malayan	<i>Hystrix brachyura</i>	113	51

ความมากมายสัมพันธ์

ความมากมายสัมพันธ์ของสัตว์ป่าทุกชนิดในบริเวณจัดการทุ่งหญ้า มีค่า 27.36% โดยความมากมายสัตว์ป่าระดับอันดับ พบอันดับสัตว์ปีกคู่ มีค่ามากมายสูงสุด 20.35% รองลงมาได้แก่อันดับสัตว์กินเนื้อ 4.45%, อันดับช้าง 1.86%, อันดับสัตว์ฟันแทะ 0.56% อันดับสัตว์กระต่าย 0.11% และอันดับลิง 0.01% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสัตว์ป่ารายชนิดพบว่าหมูป่ามีค่าความมากมายสัมพันธ์มากที่สุด ร้อยละ 11.36 รองลงมา กวางป่า (5.66), กระตึง (2.49) ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Relative abundance index of large mammal in managed tropical grassland.

No.	Common name	% RAI	No.	Common name	% RAI
1	Boar Wild	11.36	12	Hare Burmese	0.11
2	Sambar Deer	5.66	13	Dhole	0.08
3	Gaur	2.49	14	Leopard Cat	0.08
4	Civet Small Indian	2.41	15	Common Mongoose	0.03
5	Elephant	1.87	16	Black Bear Asiatic	0.02
6	Palm Civet Common	1.22	17	Yellow throated Marten	0.02
7	Muntjac Red	0.84	18	Lesser mouse deer	0.01
8	Porcupine Malayan	0.57	19	Smooth coated Otter	0.01
9	Large Spotted Civet	0.23	20	Sun Bear Malayan	0.01
10	Tiger	0.17	21	Macaque PigTail	0.01
11	Jackal Golden	0.17			

ช่วงเวลาการทำกิจกรรมในรอบวัน

การศึกษาช่วงเวลาที่บ้านที่ภาพสัตว์ในเวลาต่างๆ ที่เข้ามาทำกิจกรรมในพื้นที่ทุ่งหญ้าธรรมชาติตลอด 24 ชั่วโมง จากข้อมูลภาพแต่ละเหตุการณ์ที่เป็นอิสระต่อกัน สามารถจัดทำข้อมูลกิจกรรมของสัตว์ป่าที่เข้ามากิจกรรมได้ทั้งหมด 12 ชนิด ได้แก่ ช้างป่า, กระตึง, กวางป่า, เก้ง, หมูป่า, เสือโคร่ง, อีเห็นข้างลาย, ชะมดแผงสันหางดำ, ชะมดขีด, เม่นใหญ่แผงคอยาว, กระต่ายป่า, และหมาจิ้งจอก โดยไม่นำชนิดสัตว์ป่าที่ข้อมูลเหตุการณ์น้อยกว่า 15 ครั้ง มาทำข้อมูลกิจกรรมในรอบวัน พบว่า ช้างป่า, กระตึง, กวางป่า, อีเห็นข้างลาย, ชะมดขีด และ เม่นใหญ่แผงคอยาว พบกิจกรรมในเวลากลางคืน (Nocturnal, > 61% ในช่วงเวลา 18:00 น. ถึง 05:59 น.) ในขณะที่ เก้ง หมูป่า และ เสือโคร่ง พบกิจกรรมในตลอดทั้งวัน (Cathemeral, 40–60% ช่วงเวลา 6:00 น. ถึง 18:00 น.)

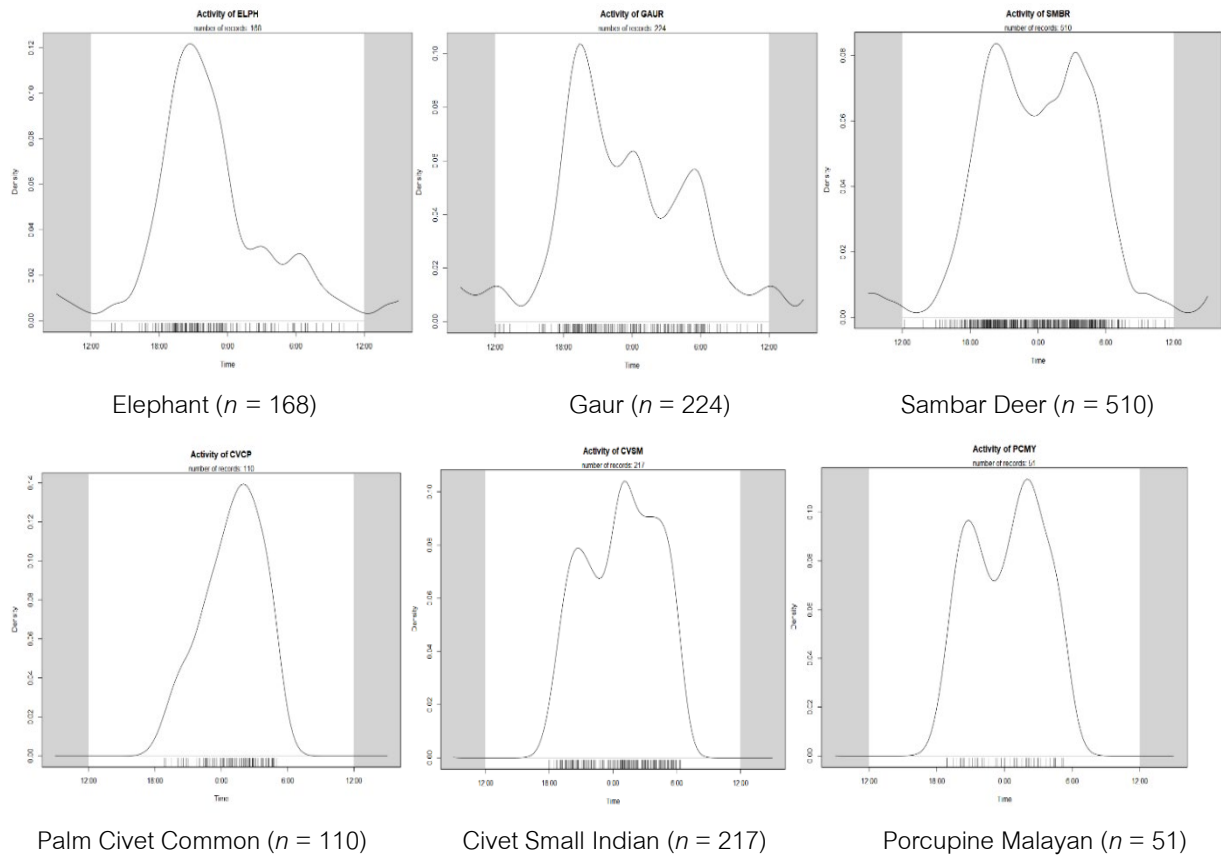


Fig. 1 Temporal activity patterns of nocturnal mammal species estimated by kernel density estimates

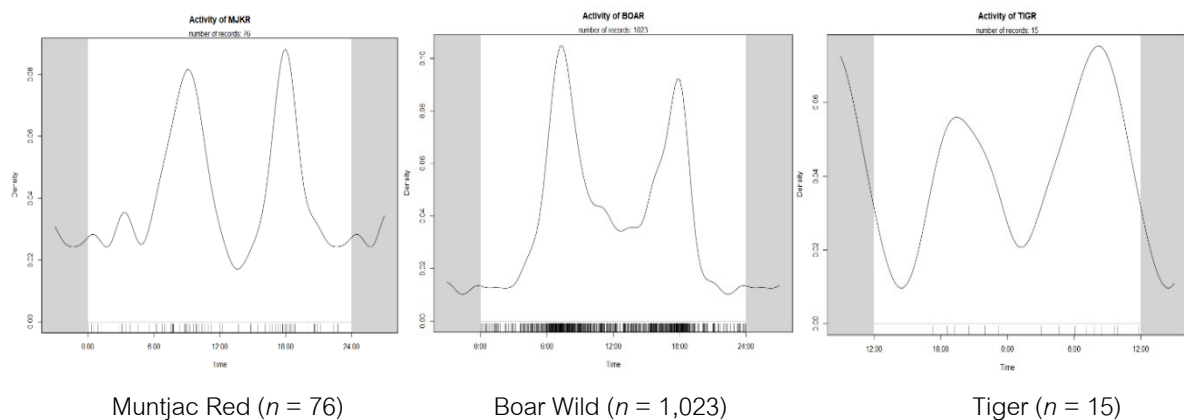


Fig. 2 Temporal activity patterns of cathemeral mammal species estimated by kernel density estimates

ช่วงเวลากิจกรรมระหว่างเสือโคร่งและเหยื่อหลัก

จากการวิเคราะห์ช่วงเวลากิจกรรมระหว่างเสือโคร่งและเหยื่อหลักทั้ง 4 ชนิด พบว่า เสือโคร่งและหมูป่ามีช่วงเวลาซ้อนทับกันคิดเป็นร้อยละ 48, เสือโคร่งและแก้งร้อยละ 45, เสือโคร่งและกระทิงร้อยละ 44 และเสือโคร่งและคววางป่าร้อยละ 34 ตามลำดับ

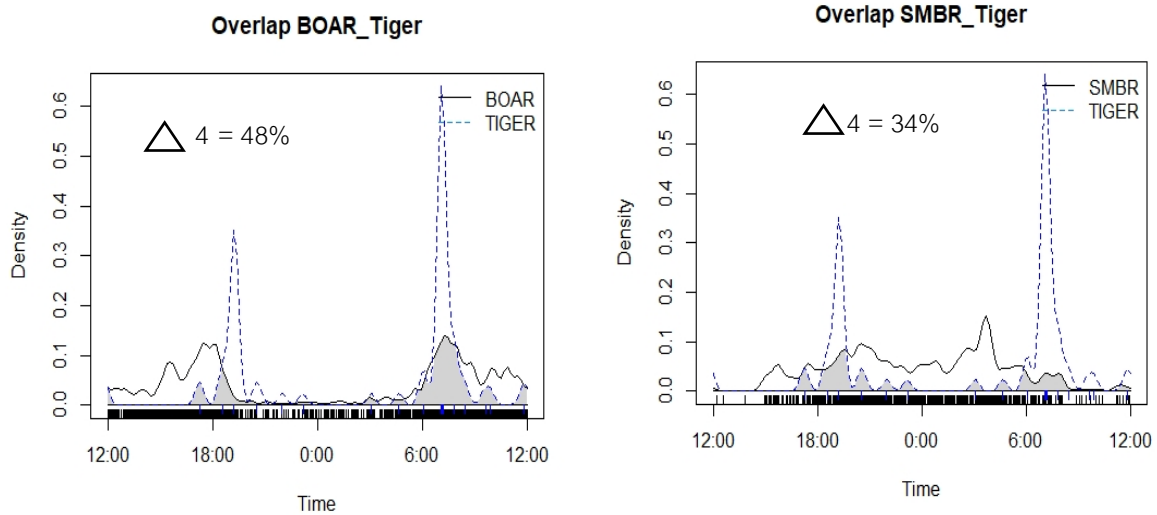


Fig. 3 Temporal activity overlaps among the tiger and prey estimated by kernel density estimates

จากการศึกษาของ Apinya (2019) ศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่และเวลาของเสือดาวและเหยื่อที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง พบว่ากวางป่าหากินในช่วงเวลากลางคืนและในทางโซนใต้ของพื้นที่หากินทั้งกลางวันและกลางคืน, หมูป่าและแก้งหากินเฉพาะในเวลากลางวัน ในขณะที่เสือดาวซึ่งเป็นสัตว์ผู้ล่าหากินทั้งวัน ซึ่งแสดงถึงสัตว์กลุ่มผู้ล่าจะใช้เวลาในการทำกิจกรรมทั้งวันแตกต่างกับกลุ่มเหยื่อ และสภาพแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ส่งผลให้สัตว์ป่าแต่ละถิ่นหากินแตกต่างกัน และการศึกษาของสมพร (2564) ศึกษาช่วงเวลากิจกรรมระหว่างเสือโคร่งและเหยื่อหลักในผืนป่ามรดกโลกดงพญาเย็น-เขาใหญ พบว่า เสือโคร่งและแก้งมีช่วงเวลาซ้อนทับกันคิดเป็นร้อยละ 79.70 หมูป่าร้อยละ 78.49 กระตังร้อยละ 74.58 กวางป่าร้อยละ 46.82 ตามลำดับ ซึ่งกวางป่าทั้งในพื้นที่ป่าและพื้นที่ทุ่งหญ้ามีความสัมพันธ์ในช่วงเวลาซ้อนทับกันน้อยที่สุด และในพื้นที่ทุ่งหญ้า เสือโคร่งจะมีช่วงกิจกรรมในเวลาช่วง 18.00–20.00 น. และช่วง 06.00–08.00 น.มากที่สุด

สรุป

จากการศึกษาพบสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 6 อันดับ 13 วงศ์ รวม 21 ชนิด และความมากมายสัมพันธ์พบว่า หมูป่ามีค่ามากที่สุด 11.36 % รองลงมาเป็น กวางป่า 5.66 % กระตัง 2.49 % ตามลำดับ และพบว่าอันดับสัตว์กีบคู่ เข้ามาใช้ประโยชน์ในพื้นที่จัดการทุ่งหญ้ามากที่สุด 20.35 % รองลงมาเป็นอันดับสัตว์กินเนื้อ 4.45 % และจากการศึกษาช่วงเวลาทำกิจกรรมของสัตว์ป่าในพื้นที่จัดการทุ่งหญ้าพบ 2 ลักษณะ คือสัตว์ที่หากินช่วงเวลากลางคืน (Nocturnal) และสัตว์ที่หากินทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน (Cathemeral) สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของช่วงเวลาทับซ้อนระหว่างเสือดาวและเหยื่อหลักพบว่าเสือดาวและหมูป่ามีช่วงเวลาทับซ้อนมากที่สุด และเสือดาวและกวางป่ามีช่วงเวลาทับซ้อนน้อยที่สุด การศึกษาในครั้งนี้แสดงถึงจำนวนชนิดและความมากมายสัมพันธ์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่เข้ามาใช้ประโยชน์ในพื้นที่จัดการทุ่งหญ้าในพื้นที่ 1.2 ตารางกิโลเมตรซึ่งเป็นพื้นที่ขนาดเล็กแต่สามารถรองรับการใช้ประโยชน์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมได้เป็นอย่างดี รวมทั้งความสัมพันธ์ด้านเวลาของกลุ่มสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในระบบนิเวศทุ่งหญ้า ซึ่งนำไปสู่ให้มีการจัดการพื้นที่ทุ่งหญ้า และการรักษาสังคมทุ่งหญ้าให้คงอยู่ในป่าธรรมชาติ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- สมพร พากเพียร. 2560. ชนิดเหยื่อและการเลือกพื้นที่ล่าเหยื่อของเสือโคร่ง (*panthera tigris linnaeus*, 1758) ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมพร พากเพียร. 2564. รายงานผลการสำรวจ ประชากรเสือโคร่งและการกระจายของเหยื่อในผืนป่ามรดกโลก ดงพญาเย็น-เขาใหญ่มาก ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพมหานคร.
- Saisamorn, A. 2019. Spatial and temporal analysis of leopards (*Panthera pardus*), their prey and tigers (*Panthera tigris*) in Huai Kha Khaeng Wildlife Sanctuary, Thailand. *Folia Oecologica* 46: 73–82.
- Lekagul, B., McNeely, J.A. 1977. Mammals of thailand. Association for the Conservation of Wildlife, Bangkok, Thailand.
- Mohd-Azlan, J., Sharma, D.S.K. 2006. The diversity and activity patterns of wild felids in a secondary forest in peninsular malaysia. *Oryx*. 40: 36–41.
- O'Brien, T.G., Kinnaird, M.F., Wibisono, H.T. 2003. Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a broptical forest landscape. *Anim. Conserv.* 6: 131–139.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
(Subject: Natural Resources and Environment)

ภาคโปสเตอร์
(Poster Presentation)

การกำจัดสารปฏิชีวนะออกซีเตตราไซคลินโดยสารสกัดหยาบจากเชื้อ *Xylaria* sp. ที่ตรึงในแคลเซียมแอลจีเนต

Removal of antibiotic oxytetracycline by *Xylaria* sp. crude extract immobilized in calcium alginate

ปิยาภรณ์ สมสมัคร*, ชาญวิช อมาตยกุล, เกศรัตน์ คำเสนาะ, กัญทิกา นนทามิตร, ชนกนันท์ ก้องสมุทร, ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร

Piyapawn Somsamak*, Chanvich Amatyakul, Katesarat Kamsanaoh, Kanthika Nonthamit,

Chanoknan Kongsamoot, Prapaipid Chairattanamanokorn

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Management and Technology, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. Email address: piyapawn.s@ku.th

บทคัดย่อ

เชื้อ *Xylaria* sp. ที่สามารถผลิตเอนไซม์แลคเคสถูกนำมาศึกษาเพื่อประยุกต์ในการกำจัดสารปฏิชีวนะในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ตรึงสารสกัดหยาบบนแคลเซียมแอลจีเนต นำไปทดสอบการกำจัดออกซีเตตราไซคลิน (Oxytetracycline, OTC) ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด OTC 85–89% และ 75–79% ตามลำดับ เมื่อทดสอบปัจจัยที่สัมพันธ์กับสภาวะในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่า pH เป็นกรด และความเค็ม 0.0–0.4 กรัมต่อลิตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมของสารสกัดหยาบ *Xylaria* sp. การตรึงสารสกัดหยาบบนแคลเซียมแอลจีเนตสามารถลดการยับยั้งกิจกรรมของสารสกัดหยาบภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มที่ดีที่จะนำไปพัฒนาเป็นเทคโนโลยีสีเขียวและประยุกต์ในการกำจัดสารปฏิชีวนะตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

คำสำคัญ: เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ, แลคเคส, สารปฏิชีวนะ, ออกซีเตตราไซคลิน, เอนไซม์ที่ถูกตรึง

Abstract

Laccase-producing *Xylaria* sp. was studied for applying in antibiotic removal from aquaculture ponds. Crude extracts were immobilized on calcium alginate. Oxytetracycline (OTC) removal efficiencies of the capsules were investigated. With initial concentrations of 7 and 20 mg/L, the OTC removal efficiencies of 85–89% and 75–79% were achieved, respectively. Upon testing environmental factors relating to aquaculture pond, acidic pH and salinity 0.0–0.4 g/L were demonstrated to be optimal conditions for *Xylaria* sp. crude extracts. Immobilization reduced inhibitory effects on crude extracts activities under suboptimal conditions. The results are very promising for further development as green technology and application for removing antibiotic residues in aquaculture ponds.

Keywords: Antibiotics, Aquaculture, Immobilized enzyme, Laccase, Oxytetracycline

คำนำ

สารปฏิชีวนะเป็นสารประกอบที่มีสามารถฆ่าหรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์มักออกฤทธิ์กับแบคทีเรียหรือเชื้อราในร่างกายเซลล์เจ้าบ้าน (Kummerer, 2009) บริเวณที่ตรวจพบจะเป็นพื้นที่ที่มีกิจกรรมของมนุษย์ที่สัมพันธ์กับการใช้ เช่น โรงพยาบาล การบำบัดน้ำเสีย การเลี้ยงสัตว์ หรือการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Kay et al., 2004; Orya et al. 2016; Patrolecco et al., 2015) การได้รับสารปฏิชีวนะทำให้เกิดผล 2 ประเด็นหลัก คือ ผลระยะสั้นจะทำให้จุลินทรีย์บางกลุ่มที่ตอบสนองต่อยาตายลง ในสิ่งแวดล้อมจะทำให้จุลินทรีย์บางกลุ่มลดจำนวนและเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ของกลุ่มจุลินทรีย์ต่างๆ ดังที่ Roose-Amsaleg and Laveman (2016) ได้รายงานไว้ว่า ฟลูออโรควิโนน และ ซัลโฟนาไมด์จะยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันบางส่วน ในขณะที่ Laveman et al. (2015) รายงานว่าการปนเปื้อน แวนโคไมซินทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลุ่มจุลินทรีย์ แต่ไม่มีผลต่ออัตราปฏิกิริยาไนเตรตรีดักชันในตะกอนแม่น้ำ ส่วนผลระยะยาวจะทำให้เกิดการคัดเลือกสิ่งมีชีวิตที่ดื้อยาในสิ่งแวดล้อม การได้รับสารปฏิชีวนะเตตราไซคลิน ในระดับไมโครกรัมต่อลิตรสามารถนำไปสู่การถ่ายทอดยีนดื้อยาจากตัวหนึ่งไปสู่อีกตัวหนึ่ง หรือ horizontal transfer (Jutkina et al., 2016) ทำให้เกิดความกังวลว่าจะมีการแพร่กระจายของยีนดื้อยา tetracycline ไปสู่จุลินทรีย์ในวงกว้าง ยีนดื้อยาอาจถูกถ่ายทอดไปสู่จุลินทรีย์ก่อโรคในคนได้ Grenni et al. (2018) ได้ถือว่ายีนดื้อยาเป็นมลสารสิ่งแวดล้อมประเภทหนึ่ง การย่อยสลายของสารปฏิชีวนะในตัวอย่างจากธรรมชาติเกิดขึ้นได้ Harrabi et al. (2019) รายงานการย่อยสลายเอนโรฟลอคซาซินและออกซีเตตราไซคลินในตะกอนปากแม่น้ำ 2 แห่ง พบว่าจุลินทรีย์ในตะกอนสารย่อยสลายสารปฏิชีวนะทั้งสองชนิดได้ ทั้งนี้การดูดซับก็เป็นกลไกสำคัญในการกำจัดสารปฏิชีวนะจากน้ำแต่จะสะสมในส่วนตะกอนแทนโดยเฉพาะตะกอนละเอียดและมีอินทรีย์วัตถุมาก การจัดการปัญหาสารปฏิชีวนะตกค้างจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถดำเนินการใน 2 แนวทางคือ การห้ามหรือจำกัดการใช้สารปฏิชีวนะในการเพาะเลี้ยง และการบำบัดพื้นฟูน้ำและตะกอนที่มีสารปฏิชีวนะตกค้างให้มีคุณภาพดีขึ้นเพื่อลดการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม การฟื้นฟูทางชีวภาพนับว่าเป็นกระบวนการฟื้นฟูที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม Chang and Ren (2015) ได้สกัดเอนไซม์จากก้อนเชื้อเห็ดนางรมหลวง (*Pleurotus eryngii*) ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิดหลังจากนำไปตรึงให้อยู่ในรูปเม็ดแอลจีเนตไมโครแคปซูลขนาด 250 ไมครอน จากนั้นได้ทดสอบการสลาย พบว่าการเติมเอนไซม์จากก้อนเห็ดทั้งในรูปสารละลายเอนไซม์และเอนไซม์ที่ถูกตรึงกับแอลจีเนตสามารถเพิ่มอัตราการย่อยสารปฏิชีวนะเตตราไซคลิน ออกซีเตตราไซคลิน และ คลอโรเตตราไซคลิน ในตะกอนแม่น้ำในถังปฏิกรณ์ ถึงระดับ 100 mg/kg ทั้งนี้การใช้เอนไซม์ที่ถูกตรึงจะเร่งอัตราการสลายได้ดีกว่าในรูปสารละลาย ส่วนหนึ่งเนื่องจากยังคงรักษาระดับกิจกรรมของเอนไซม์แลคเคสในระดับสูง สามารถสลายได้หลังจากการเติมสารปฏิชีวนะลงไป เพิ่มอีกรอบ นอกจากนี้การตรึงเอนไซม์ยังมีกลไกการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการกำจัดสารปฏิชีวนะ แลคเคส (E.C. 1.10.3.2, *p*-benzenedial: oxygen oxidoreductase) เป็นเอนไซม์ออกซิเดสที่มีคอปเปอร์เป็นองค์ประกอบที่สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบทั้งกลุ่มฟีนอลิกและไม่ใช่ฟีนอลิกที่หลากหลาย รวมถึงสีย้อมและมลพิษในสิ่งแวดล้อมด้วย เอนไซม์แลคเคสใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทน ซึ่งถือว่าการย่อยสลายทางชีวภาพและการฟื้นฟูที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกเชื้อรา *Xylaria* sp. ที่สามารถผลิตเอนไซม์แลคเคส จากนั้นทำการตรึงกับแคลเซียมแอลจีเนต เนื่องจากเกิดในสภาวะปกติและมักไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางด้านกายภาพ เคมีและชีวภาพของสิ่งแวดล้อมจึงทำให้สามารถดำเนินการฟื้นฟูไปพร้อมกับการเพาะเลี้ยงได้ การใช้เอนไซม์กลุ่มออกซิเดสที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างลิกนินในการฟื้นฟูน้ำและตะกอนในบ่อเลี้ยงกุ้งพร้อมกันระหว่างการเลี้ยงและสามารถนำกลับคืนออกมาจากบ่อหลังใช้งานเสร็จ โดยไม่เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศธรรมชาติและระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยรวม โดยเน้นการใช้ immobilised laccase ในรูปไมโครแคปซูลในการบำบัดสารปฏิชีวนะตกค้าง วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตกค้างในตะกอนสูงกว่าการใช้สารละลายเอนไซม์ นอกจากนี้การไม่ใช้จุลินทรีย์สลายสารปฏิชีวนะโดยตรงทำให้ไม่มีการส่งต่อยีน

ดื้อยา (antibiotic resistant genes) ออกสู่กลุ่มจุลินทรีย์ในพื้นที่และนอกพื้นที่ในกรณีที่มีการระบายน้ำหรือตะกอนออกจากบ่อ ทำให้ยาปฏิชีวนะยังใช้ควบคุมการระบาดของโรคสัตว์น้ำได้ตามปกติ

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมหัวเชื้อ

นำเชื้อ *Xylaria sp.* (TBRC 6864) จากจานเพาะเชื้อถ่ายลงในอาหารเหลวสำหรับเลี้ยงเชื้อรา Potato Dextrose Broth (PDB) (Fig. 1A and 1B) โดยละลาย PDB 24 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตรแล้วนำไป autoclave ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ที่ทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงประมาณ 40–50 องศาเซลเซียส เทใส่ขวดเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการ autoclave แล้วขวดละ 30 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ทดสอบการผลิตเอนไซม์โดยเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์แลคเคสทุก 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 10 วัน (ดัดแปลงจากวิธีของ Perdani et al. 2019) พบว่าสารสกัดหยาบมีกิจกรรมเอนไซม์แลคเคสสูงสุดในวันที่ 5 ของการบ่ม จึงใช้ระยะเวลา 5 วันในการเก็บเกี่ยวเอนไซม์ครั้งต่อไป สกัดเอนไซม์หยาบด้วยการเติม sodium acetate buffer 50 มิลลิลิตรต่ออาหารเลี้ยงเชื้อ 30 มิลลิลิตรและกวนผสม 45 นาที กรองกากอาหารเลี้ยงเชื้อออกและปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จะได้ส่วนของเหลวที่เป็นสารสกัดหยาบและนำไปใช้ในการศึกษาต่อเพื่อเตรียมทำเม็ดแคปซูลต่อไป

การผลิตแคปซูลรีงสารสกัดหยาบและทดสอบการสลาย OTC โดยแคปซูลขนาดต่างๆ

ละลาย โซเดียมแอลจีเนต 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ (หรือสารสกัดหยาบ) ลงไป 10%V ของปริมาตรสารละลายแอลจีเนต หลังจากผสมกันดีแล้วดูดส่วนผสมใส่หลอดแล้วบีบปล่อยลงไปในสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ (1.5 wt%) คนตลอดเวลา ใช้ปลายเข็มขนาดต่างๆ เพื่อให้ได้ไมโครแคปซูลขนาดต่างๆ กัน 3 ขนาด คือ ขนาด < 2, 2–5, และ > 5 มิลลิเมตร (Fig. 1c) จากนั้นนำแคปซูลทั้งหมดในแต่ละชุดไปทดสอบการสลาย OTC ปริมาตร 30 มิลลิลิตร โดยศึกษาความเข้มข้นสารละลาย OTC 7 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 4.8 เขย่าขวดทดลองในอัตรา 120 รอบต่อนาที ทดลองเป็นระยะเวลา 25 วัน โดยเก็บตัวอย่างส่วนของเหลวทุก 5 วัน เพื่อวิเคราะห์ OTC ที่เหลืออยู่ ทำการทดสอบเทียบกับการเติมสารละลายเอนไซม์แลคเคสทางการค้า (Sunson Industry group, ประเทศจีน) หรือสารสกัดหยาบที่ไม่ได้รีงในไมโครแคปซูล โดยทดสอบในระดับกิจกรรมเอนไซม์แลคเคสเท่ากับกิจกรรมของเอนไซม์แลคเคสของสารสกัดหยาบจาก *Xylaria sp.* ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ

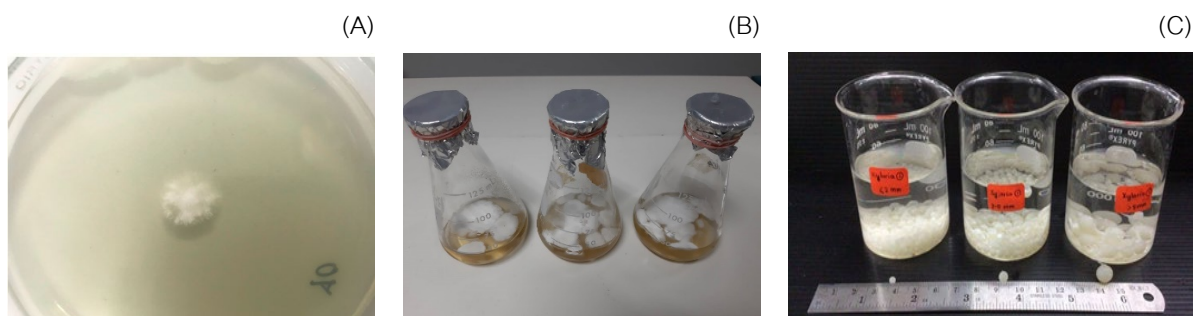


Fig. 1 *Xylaria sp.* colony on agar plate (A); *Xylaria sp.* cultured in PDB (B); and three different sizes of immobilized *Xylaria sp.* crude extracts capsules (C)

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลาย OTC โดยแคปซูลขนาดต่างๆ

เตรียมแคปซูลตามวิธีที่กล่าวแล้วข้างต้น ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด OTC ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลายออกซีเตตราไซคลิน ในน้ำปราศจากไอออน (DI water) การศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการกำจัด OTC ที่ความเข้มข้น OTC เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) 5, 6.5, 7.5, 9 และ ความเค็ม (salinity) โดยโซเดียมคลอไรด์ 0, 0.4, 1, 5, 10 กรัมต่อลิตร ทดลองเป็นระยะเวลา 25 วัน โดยเก็บตัวอย่างส่วนของเหลวทุก 5 วัน เพื่อวิเคราะห์ OTC ที่เหลืออยู่ ช่วงค่าปัจจัยที่กำหนดในการศึกษาค้นคว้าอ้างอิงจาก Vijuksungsith et al. (2021) ที่ได้ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในอำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม โดยเกษตรกรทำการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นรูปแบบการเลี้ยงแบบผสมผสานคือ เลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม่รวมกับการเลี้ยงปลาหลายชนิด เช่น ปลาดุก ปลาหมอ และปลานิล ซึ่งได้รายงานว่ามีค่า pH 7.5 และความเค็ม 0.20 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้ตรวจไม่พบ OTC ในน้ำตัวอย่างดังกล่าว

การวิเคราะห์ OTC

วิเคราะห์ OTC ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีด้วยเครื่องวิเคราะห์ของเหลวสมรรถนะสูง (Agilent HPLC) โดยใช้คอลัมน์ชนิด C18 (Cosmosil 5C18-MS-II, 5 ไมโครเมตร, 150×4.6 มิลลิเมตร) สภาวะสำหรับกรวิเคราะห์ใช้สารชะ Phosphate buffer (0.02 M) pH 2.5: Methanol (75:25) อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลาที่ใช้วิเคราะห์ 10 นาที ตรวจวัดค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารที่แยกได้จากตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (Vijuksungsith et al., 2021)

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เปรียบเทียบผลการศึกษาดังวิธี One Way Anova เลือกวิธี LSD และ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษานี้ได้ผลิตแคปซูลที่ตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria* sp. 3 ขนาด คือ < 2, 2–5, และ > 5 มิลลิเมตร เมื่อนำแคปซูลตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria* sp. หรือตรึงเอนไซม์แลคเคสทางการค้าทั้ง 3 ขนาดมาทดสอบการกำจัด OTC 7 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาแสดงว่า ไมโครแคปซูลที่ผลิตขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัด OTC ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นที่ทดสอบ (Fig. 2) ผลการทดลองยังแสดงว่าขนาดของไมโครแคปซูลไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัด OTC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ภายใต้สภาวะที่ทำการทดลอง แคปซูลตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria* sp กำจัด OTC ในอัตราเร็วที่ต่ำกว่าการใช้สารสกัดหยาบ *Xylaria* sp. ในรูปสารละลายโดยตรง อย่างไรก็ตามข้อได้เปรียบหลักของการตรึงเอนไซม์คือทำให้สามารถใส่ซ้ำ ป้องกันเอนไซม์จากสภาวะที่ยับยั้งหรือทำลายเอนไซม์ และการลดข้อจำกัดเรื่องการเจือจางเอนไซม์ อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการทดลองประสิทธิภาพการกำจัด OTC ของชุดการทดลองที่ตรึงและไม่ตรึงสารสกัดหยาบที่ความเข้มข้น OTC เริ่มต้น 7 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยชุดการทดลองตรึงสารสกัดหยาบคงเหลือ OTC ในน้ำตัวอย่าง 0.76–1.03 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 85–89% ส่วนที่ระดับความเข้มข้น OTC เริ่มต้น 20 ppm การกำจัด OTC ชุดการทดลองที่ตรึงและไม่ตรึงสารสกัดหยาบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยชุดการทดลองตรึงสารสกัดหยาบคงเหลือ

OTC ในน้ำตัวอย่าง 4.15–4.93 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 75–79% นอกจากนี้การทดลองยังแสดงให้เห็นว่า ตัวแคปซูลที่ไม่มีเอนไซม์สามารถกำจัด OTC ออกจากน้ำได้มากกว่า 40% ในระยะเวลา 25 วันที่ทำการทดลอง สอดคล้องกับการรายงานของ Chang and Ren (2015) ที่ชี้ให้เห็นกลไกการดูดซับของเม็ดแคลเซียมแอลจีเนตที่ส่งเสริมประสิทธิภาพการกำจัดสารปฏิชีวนะ ทั้งนี้แม้ว่าความเข้มข้น OTC ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารสกัดหยาบหรือแคปซูลลงไปลดลงไป 25–30% แสดงถึงกลไกการกำจัดตามธรรมชาติ แต่ระดับความเข้มข้นของสารปฏิชีวนะที่เหลืออยู่ก็สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้หากสิ่งแวดล้อมได้รับสารปฏิชีวนะอย่างต่อเนื่องก็อาจส่งผลกระทบต่อมนุษย์และระบบนิเวศได้เช่นกัน ดังนั้นจากการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารปฏิชีวนะก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งจำเป็น

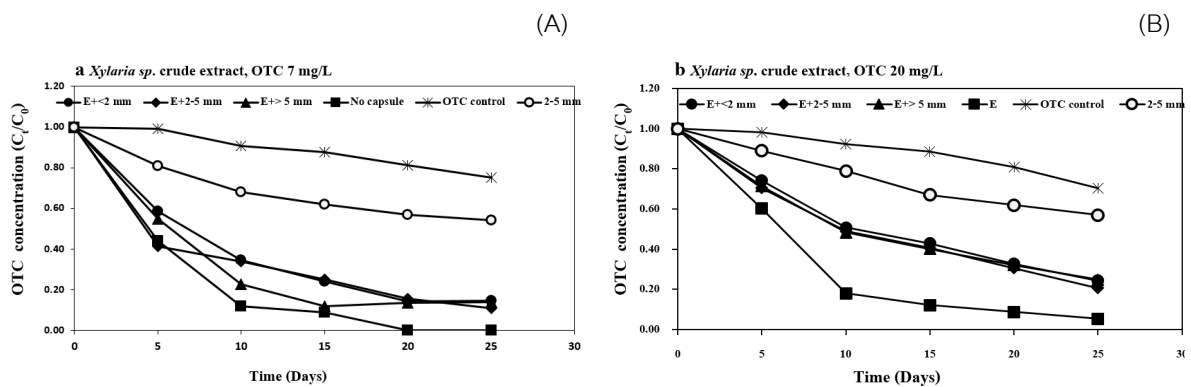


Fig. 2 Effects of different immobilized *Xylaria sp.* crude extract sizes on OTC removal at initial OTC concentration 7 mg/L (A); and 20 mg/L (B)

การศึกษานี้มีเป้าประสงค์เพื่อประยุกต์การตรึงเอนไซม์ในแคปซูลเพื่อกำจัดสารปฏิชีวนะตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นจึงเลือกลักษณะสมบัติที่สำคัญของน้ำบ่อเลี้ยงเป็นปัจจัยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด OTC ซึ่งได้แก่ pH และความเค็ม ผลของ pH ต่อการกำจัด OTC แสดงใน Fig. 3 กิจกรรมของเอนไซม์แลคเคสจะทำงานได้ในช่วง pH 4–7 โดยมีช่วง pH ที่เหมาะสมอยู่ที่ pH 4–5 ทั้งนี้ขึ้นกับแหล่งที่มาของเอนไซม์แลคเคส ในขณะที่ pH ของน้ำในบ่อเลี้ยงกึ่งอยู่ในช่วง pH เป็นกลาง เมื่อทดสอบแคปซูลตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* 3 ขนาด (Fig. 3A) ในช่วง pH 5–9 ผลการทดลองแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ชุดการทดลองสารสกัดหยาบทั้งที่ตรึงและไม่ตรึง สามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ pH 5 การเพิ่มขึ้นของ pH ส่งผลต่อการกำจัด OTC ที่ pH 6.5 สารสกัดหยาบที่ไม่ตรึงบนแคปซูลมีประสิทธิภาพการกำจัด OTC ลดลง 30% ส่วนชุดการทดลองสารสกัดหยาบที่ตรึงแคปซูลยังคงมีประสิทธิภาพในระดับสูงสุด ผลของ pH ที่สูงขึ้นส่งผลอย่างชัดเจนเมื่อทดสอบที่ pH 7.5 ซึ่งเป็นค่าเท่ากับน้ำตัวอย่างจากบ่อเพาะเลี้ยงที่รายงานโดย Vijuksungsith et al. (2021) สารสกัดหยาบที่ไม่ตรึงบนแคปซูลมีประสิทธิภาพการกำจัด OTC เหลือเพียง 22% ของประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนชุดการทดลองสารสกัดหยาบตรึงแคปซูล ขนาด 2–5 และ > 5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพคงเหลือ 62–64% ส่วนชุดการทดลองสารสกัดหยาบตรึงแคปซูล ขนาด < 2–5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพ 48% ส่วนที่ pH 9 ประสิทธิภาพการกำจัด OTC โดยสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* มีค่าลดลงจนมีประสิทธิภาพเท่ากับชุดการทดลองที่เติมเฉพาะแคปซูลที่ไม่มีสารสกัดหยาบ ทั้งนี้ความเข้มข้นของ OTC ที่ลดลงคาดว่าเกิดจากกลไกการดูดซับบนตัวแคปซูลเป็นหลักที่ pH นี้กิจกรรมของสารสกัดหยาบที่ไม่ตรึงบนแคปซูลถูกยับยั้งเกือบสมบูรณ์

ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัด OTC ของเอนไซม์แลคเคสทางการค้าคล้ายคลึงกับผลของสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* การนำเอนไซม์มาตรึงในโซเดียมแอลจีเนตจะทำให้เอนไซม์สามารถทำงานได้แม้ว่า pH สูงขึ้น (Fig. 3B) เอนไซม์แลคเคสทางการค้าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ทำงานที่ pH 7.5 ได้ดีกว่าสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* อย่างมีนัยสำคัญ เอนไซม์แลคเคสทางการค้าที่ตรึงแคปซูล ขนาด 2–5 และ > 5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพคงเหลือ 73–74% แต่การดูดซับก็เป็นกลไกหลักในการกำจัด OTC ที่ pH 9 เช่นกัน

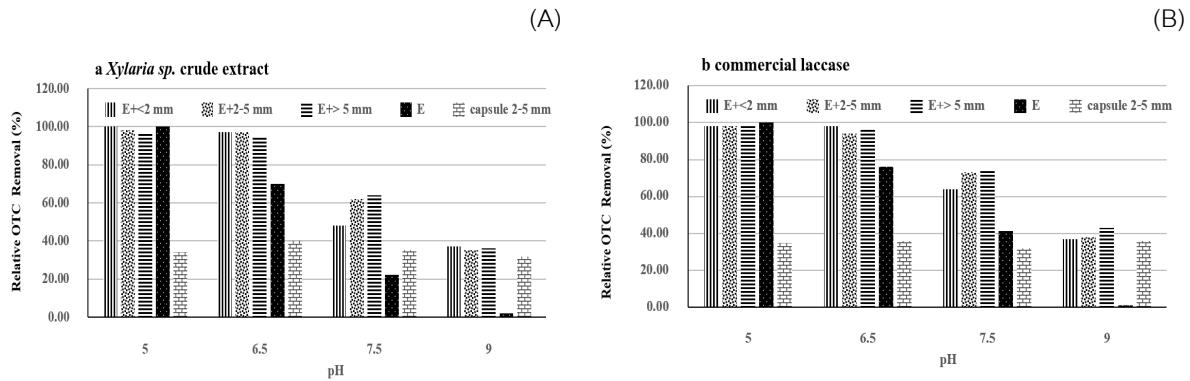


Fig. 3 Effects of pH on OTC removal by immobilized *Xylaria sp.* crude extract (A), and immobilized commercial laccase (B) at different capsules sizes

เนื่องจากตัวอย่างน้ำเสียบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีค่าความเค็ม 0.2 กรัมต่อลิตร (Vijuksungsith et.al, 2021) จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด OTC ของแคปซูลตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ที่ระดับความเค็ม 0, 0.4 และ 1 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังได้ทดสอบที่ระดับความเค็ม 5 และ 10 กรัมต่อลิตร เพื่อประเมินศักยภาพในการประยุกต์กับการเพาะเลี้ยงกุ้งน้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม ผลการทดลองแสดงให้เห็นชัดเจนว่าการตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ในโซเดียมแอลจีเนตจะทำให้เอนไซม์สามารถทำงานได้แม้ว่าค่าความเค็มจะสูงขึ้น (Fig. 4A) โดยความเค็ม 0.4 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด OTC ของสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ที่ไม่ตรึงในโซเดียมแอลจีเนตในการกำจัด OTC ลดลง 22% จากค่าสูงสุด แต่ระดับความเค็มดังกล่าวไม่มีต่อผลชุดการทดลองแคปซูลตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ที่ความเค็ม 1 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัด OTC ของชุดการทดลองสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ลดลงในทุกชุดการทดลอง โดยจะส่งผลกับแคปซูลขนาดเล็กมากกว่าแคปซูลขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้แคปซูลตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* สามารถกำจัด OTC ในช่วง 69–80% ของค่าสูงสุด ส่วนสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ที่ไม่ตรึงในโซเดียมแอลจีเนตมีประสิทธิภาพในการกำจัด OTC 48% เอนไซม์แลคเคสทางการค้าสามารถทำงานที่ระดับความเค็มสูงได้ดีกว่าสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* (Fig. 4b) จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเอนไซม์แลคเคสทางการค้าที่ตรึงในโซเดียมแอลจีเนตเพื่อผลิตแคปซูลจะสามารถป้องกันเอนไซม์และทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด OTC ใกล้เคียง 100% เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ระดับความเค็ม 5 และ 10 กรัมต่อลิตร ส่งผลอย่างมากต่อการกำจัด OTC ของชุดการทดลองสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* (Fig. 4a) ทั้งนี้แคปซูลตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* มีประสิทธิภาพกำจัด OTC เหลือเพียง 34–40% ของค่าสูงสุด ที่ระดับความเค็ม 5 กรัมต่อลิตร ส่วนสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ที่ไม่ตรึงมีประสิทธิภาพเหลือเพียง 23% เท่านั้น ส่วนระดับความเค็ม 10 กรัมต่อลิตร มีผลยับยั้งกิจกรรมของสารสกัดหยาบเกือบสมบูรณ์ นอกจากนี้การดูดซับของแคปซูลมีแนวโน้มลดลงที่ความเค็ม 2 ระดับนี้ด้วย เอนไซม์แลคเคสทางการค้าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีประสิทธิภาพการกำจัด OTC สูงกว่าสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ที่ระดับความเค็ม 5 กรัมต่อลิตร (Fig. 4B) ทั้งนี้เอนไซม์แลคเคสทางการค้าที่ตรึงใน

แคลเซียมแอลจีเนตสามารถกำจัด OTC ในช่วง 56–70% ของค่าสูงสุด ส่วนระดับความเค็ม 10 กรัมต่อลิตร มีผลยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์แลคเคสทางการค้า เช่นกัน

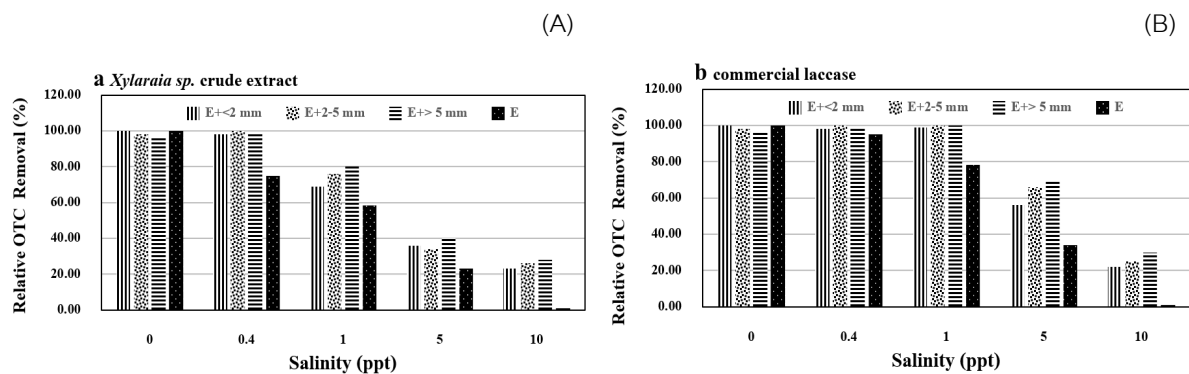


Fig. 4 Effects of salinity on OTC removal by immobilized *Xylaria sp.* crude extract (B), and immobilized commercial laccase (A) at different capsule sizes

สรุป

สารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* มีประสิทธิภาพในการกำจัด OTC และการตรึงสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ในแคลเซียมแอลจีเนตช่วยให้เอนไซม์ในสารสกัดหยาบสามารถทำงานนอกสภาวะที่เหมาะสมได้ดีขึ้น การนำสารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* มาตรึงในโซเดียมแอลจีเนตจะทำให้เอนไซม์สามารถทำงานได้แม้ว่า pH สูงขึ้น ที่ pH 7.5 สารสกัดหยาบที่ไม่ตรึงมีประสิทธิภาพเหลือเพียง 22% ของประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนชุดการทดลองสารสกัดหยาบที่ถูกตรึงในแคปซูล ขนาด 2–5 และ > 5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพ 62–64% ในขณะที่ความเค็ม 1 กรัมต่อลิตร สารสกัดหยาบ *Xylaria sp.* ที่ถูกตรึงสามารถกำจัด OTC 69–80% ของค่าสูงสุด ส่วนสารสกัดหยาบที่ไม่ตรึงในแคลเซียมแอลจีเนตมีประสิทธิภาพในการกำจัดเพียง 48% ผลการศึกษามีแนวโน้มที่ดีที่จะนำไปพัฒนาและประยุกต์ในการกำจัดสารปฏิชีวนะตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้สภาวะที่เหมาะสมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 และคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- Chang, B., Ren, Y. 2015. Biodegradation of three tetracyclines in river sediment. *Ecol. Eng.* 75: 272–277.
- Grenni, P., Ancona, V., Caracciolo, B. 2018. Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review. *Microchem. J.* 136: 25–39.
- Harrabi, M., Alexandrino, D.A.M., Aloulou, F., Elleuch, B., Jia, Z., Almeida, C.M.R., Mucha, A.P., Carvalho, M.F. 2019. Biodegradation of oxytetracycline and enrofloxacin by autochthonous microbial communities from estuarine sediments. *Sci. total Environ.* 648: 962.

- Jutkina, J., Rutgersson, C., Flash, C.F., Larsoon, D.G.J. 2016. An assay for determining minimal concentrations of antibiotics that drive horizontal transfer of resistance. *Sci. total Environ.* 131–138
- Kay, P., Blackwell, P. A., Boxall, A. B. 2004 Fate of veterinary antibiotics in a macroporous tile drained clay soil. *Environ. Toxicol. Chem.* 23: 1136–1144.
- Kummerer, K. 2009. Antibiotics in the aquatic environment- a review-part I. *Chemosphere* 75: 417–434.
- Laveman, A. M., Cazier, T., Yan, C., Roose-Amsaleg, C., Petit, F. Ganier, J., Berthe.T. 2015. Exposure to vancomycin causes a shift in the microbial community structure without affecting nitrate reduction rates in river sediment. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 22:13702–13709.
- Orya, J., Bricheux, G., Togola, A., Bonnet, J. L., Donnadiuu- Bernard, F., Forester, C., Traore, O. 2016. Ciprofloxacin residue and antibiotic-resistant biofilm bacteria in hospital effluent. *Environ. Pollut.* 214: 635–645
- Patrolecco, L., Capri, S., Ademollo, N. 2015. Occurrence of selected pharmaceuticals in the principal sewage treatment plants in Rome (Italy) and in the receiving waters. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22: 5864–5875.
- Roose-Amsaleg, C., Laveman. A. M. 2016. Do antibiotics have environmental side-effect? Impact of synthetic antibiotics on biogeochemical processes. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23: 4000–4012.
- Vijuksungsith, P., Satapanajaru, T., Chokejaroenrat, C., Jarusutthirak, C., Sakulthaew, C., Kambhu, A., Boonprasert, R. 2021. Remediating oxytetracycline-contaminated aquaculture water using nano calcium peroxide (CaO_2) produced from flue gas desulfurization (FGD) gypsum. *Environ. Technol. Innov.* 24: 101861.

การใช้ตะกั่วเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนชันเพื่อบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสีย

Use of iron slag as a catalyst in ozonation process for treatment of reactive dye in wastewater

ธัญกานต์ รัตนวรรณ, ชลอ จารุสุทธิรักษ์*

Tunyahun Rattanawan, 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: ecclj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ในน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนชันที่ใช้ตะกั่วเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าพีเอช ความเข้มข้นของสี ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและค่าพีเอช รวมทั้งการลดความเข้มข้นของสีส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น โดยที่สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 และความเข้มข้นของสี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 30 นาที ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี 84.17% และบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี 62.5% ซึ่งสูงกว่าการใช้โอโซนอย่างเดียว การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่า การบำบัดสีรีแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชันที่ใช้ตะกั่วเหล็กตัวเร่งปฏิกิริยาและโอโซนชันเพียงอย่างเดียวเป็นไปตามการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.060 และ 0.047 นาที⁻¹ ตามลำดับ การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้สารทีบีเอแสดงให้เห็นว่าการบำบัดสีรีแอกทีฟเกิดจากอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นหลัก

คำสำคัญ: แคะตะไลติกโอโซนชัน, ตะกั่วเหล็ก, สีรีแอกทีฟ

Abstract

This research studied removal efficiency of reactive black 5 (RB5) dye in wastewater by ozonation using iron slag as a catalyst. Factors affecting the removal efficiency, including catalyst dosage, pH, and dye concentration, were investigated. The results showed that removal efficiencies increased as the catalyst dosage and pH increased, as well as initial dye concentration decreased. At optimum condition, i.e. catalyst dosage of 0.1 gram per liter, pH of 9, and initial concentration of 300 milligrams per liter, the removal efficiencies for RB5 and COD at 30 minutes were 84.17% and 62.5%, respectively, which were higher than that of ozonation alone. Kinetic study revealed that catalytic ozonation and ozonation alone followed the patterns of first-order kinetic with reaction rate constants of 0.060 and 0.047 min⁻¹, respectively. The study of removal mechanism by using tertiary butyl alcohol (TBA) proved that the RB5 treatment mechanism was mainly contributed by hydroxyl radicals.

Keywords: Catalytic ozonation, Iron slag, Reactive dye

คำนำ

สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมหนัง และอุตสาหกรรมกระดาษ เนื่องจากเป็นสีย้อมที่ให้สีสดใส ยึดเกาะกับเส้นใยเซลลูโลสได้ดี คงทนต่อการซักและมีราคาถูก (Hien et al., 2020) อย่างไรก็ตาม สีย้อมรีแอกทีฟที่ผ่านกระบวนการฟอกย้อมบางส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับเส้นใยมีโอกาสปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยทั่วไปสีย้อมรีแอกทีฟมีความสามารถในการละลายน้ำสูงและมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ การปนเปื้อนของสีรีแอกทีฟในน้ำเสียอุตสาหกรรมเมื่อถูกปล่อยลงสู่ระบบนิเวศทางน้ำย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ เช่น ทำให้การส่องผ่านของแสงและการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตในน้ำลดลง รวมทั้งทำให้แหล่งน้ำมีทัศนียภาพที่ไม่น่ามอง (Van et al., 2019) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมีหลายวิธี ได้แก่ การบำบัดทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ โดยการบำบัดทางชีวภาพจะมีราคาถูกกว่าวิธีการบำบัดอื่น แต่วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ เนื่องจากสีย้อมในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อนและอาจความเป็นพิษ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ธัญวรรณ และชลอ, 2560) วิธีการทางกายภาพ เช่น การดูดซับ การตกตะกอน และเยื่อกรองเมมเบรน แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูง แต่วิธีการเหล่านี้ไม่ได้มีการทำลายโครงสร้างสี ประกอบกับมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพื่อกำจัดวัสดุดูดซับ ตะกอนหรือน้ำเสียเข้มข้นที่เกิดขึ้น (Wu et al., 2008) กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม เนื่องจากมีศักยภาพสูงในการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันมีหลายวิธี เช่น การใช้ไฮเพอร์ออกไซด์เปอร์ออกไซด์ โซโดเนียมเปอร์ออกไซด์ แสงอัลตราไวโอเล็ต และกระบวนการโอโซนชัน เป็นต้น ทั้งนี้กระบวนการโอโซนชันเป็นที่นิยมใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ เนื่องจากก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีค่าศักยภาพในการออกซิเดชันสูงและไม่มีสารตกค้าง เช่น คลอรีน และแมงกานีส (Leusink, 2016) อย่างไรก็ตามการบำบัดสารอินทรีย์โดยใช้กระบวนการโอโซนชันมีข้อจำกัด ได้แก่ เกิดปฏิกิริยาซ้ำ มีความจำเพาะต่อสารในการเกิดปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนชันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก โดยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเร่งการย่อยสลายตัวของโอโซนก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลที่มีประสิทธิภาพการออกซิเดชันดีกว่าโอโซน (ศิริ, 2562 และ Van et al., 2019) อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการโอโซนชันส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพ ทำให้มีต้นทุนการบำบัดน้ำเสียสูง การประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต้นทุนต่ำสำหรับกระบวนการโอโซนชันจึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าตะกัณฑ์เหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมผลิตโลหะ สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการโอโซนชันได้ โดยสามารถช่วยเร่งการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์เป็นการลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ซ้ำเพื่อเพิ่มมูลค่า และแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี (Hien et al., 2020)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชันที่มีตะกัณฑ์เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและเวลา ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชันที่มีตะกัณฑ์เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซนชันเพียงอย่างเดียว ผลการวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีรีแอกทีฟจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมหรืออุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเป็นการใช้ประโยชน์จากเศษตะกัณฑ์เหล็ก ซึ่งเป็นแนวทางในการหมุนเวียนของเสียให้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

เศษตะกอนเหล็กที่ใช้ในการทดลองนำมาจากอุตสาหกรรมผลิตโลหะ การเตรียมเศษตะกอนเหล็ก สามารถเตรียมได้โดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดแล้วกรองด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

การติดตั้งและเดินระบบโอโซนเนชั่น

กระบวนการโอโซนเนชั่นใช้เป็นระบบเวนจูร์ดัง Fig.1 ประกอบด้วย ถังปฏิกิริยาทำด้วยอะคริลิกกว้าง 12 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ซึ่งมีแผ่นกั้นเจาะรูอยู่ตรงกลางและทำหน้าที่กั้นตัวเร่งปฏิกิริยา บั๊มสูบน้ำแบบจุ่ม และเครื่องผลิตก๊าซโอโซน กำลังผลิต 183. มิลลิกรัมต่อนาที ต่อกับอุปกรณ์เวนจูร์ ในการเดินระบบถังปฏิกิริยาน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร น้ำเสียจะถูกสูบด้วยปั๊มสูบน้ำผ่านอุปกรณ์เวนจูร์ ซึ่งจะเกิดสุญญากาศ ทำให้ก๊าซโอโซนไหลเข้าสู่ท่อและละลายในสารละลายก่อนไหลวนกลับถึงปฏิกรณ์ สำหรับก๊าซโอโซนที่ไม่ละลายน้ำจะทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

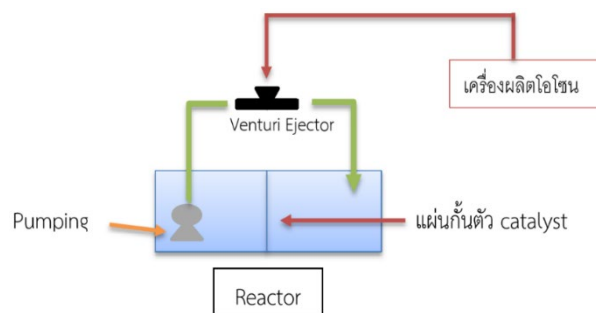


Fig. 1 Schematic diagram of catalytic ozonation

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟโดยการผสมสีรีแอกทีฟแบดิก 5 (RB5) กับน้ำอาร์โธตามความเข้มข้นที่ต้องการ เตรียมกราฟมาตรฐานจากสารละลายสีรีแอกทีฟที่ความเข้มข้น 300, 400, และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นสีด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

1) ผลของค่าพีเอช

เติมสารละลายสีรีแอกทีฟเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเป็น 5 เดินระบบโอโซนเนชั่น เก็บตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และเติมโซเดียมไธโอซัลเฟต 2-3 หยด เพื่อกำจัดโอโซนที่เหลือ (Van et al., 2019) ทำการทดลองซ้ำโดยปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 7 และ 9

2) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

เติมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเป็น 9 เป็นไปตามค่าที่เหมาะสม เก็บตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิตร ทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟด 2-3 หยด เพื่อกำจัดไอโซนที่เหลือ ทำการทดลองซ้ำโดยปรับความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟด้วยกระบวนการไอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

1) ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

เติมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชให้เป็นไปตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ทำการเดินระบบ เก็บตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิตร ทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟด 2-3 หยด เพื่อกำจัดไอโซนที่เหลือ ทำการทดลองซ้ำโดยปรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 และ 0.5 กรัมต่อลิตร

2) ผลของค่าพีเอช

เติมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเป็น 5 และเติมปริมาณตะกั่วหนัก 0.1 กรัมต่อลิตร ทำการเดินระบบ เก็บตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิตร ทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟด 2-3 หยด เพื่อกำจัดไอโซนที่เหลือ ทำการทดลองซ้ำโดยปรับค่าพีเอชเป็น 7 และ 9

3) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

เติมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร และเติมปริมาณตะกั่วหนัก 0.1 กรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชให้เป็นไปตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น ทำการเดินระบบ เก็บตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิตร ต่อลิตร ทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟด 2-3 หยด เพื่อกำจัดไอโซนที่เหลือ ทำการทดลองซ้ำโดยปรับความเข้มข้นเป็น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดสีรีแอกทีฟแบบล็อก 5

ทำการศึกษาเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีรีแอกทีฟแบบล็อก 5 โดยกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการไอโซเนชันกับกระบวนการไอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบบล็อก 5 ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา และนำสมการที่ได้มาเปรียบเทียบแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาที่อันดับต่างๆ ดัง Equations 1, 2 และ 3 โดยประเมินว่าข้อมูลผลการทดลองที่ได้มีความสัมพันธ์กับสมการของแบบจำลองอันดับปฏิกิริยาแบบใดมากที่สุด จากค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด จากนั้นทำการคำนวณค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) จากค่าความชันของสมการเส้นตรงของความเข้มข้นระหว่างความเข้มข้นกับเวลา

$$\text{ปฏิกิริยาอันดับศูนย์} \quad [RB5]_t = [RB5]_0 - kt \quad (1)$$

$$\text{ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง} \quad [RB5]_t = [RB5]_0 e^{-kt} \quad \text{หรือ} \quad \ln[RB5]_t = \ln[RB5]_0 - kt \quad (2)$$

$$\text{ปฏิกิริยาอันดับสอง} \quad \frac{1}{[\text{RB5}]_t} = \frac{1}{[\text{RB5}]_0} + kt \quad (3)$$

โดยที่ $[\text{RB5}]_0$ และ $[\text{RB5}]_t$ เท่ากับความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ที่เวลาเริ่มต้นและเวลาใดๆ ตามลำดับ ส่วน k เท่ากับค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 และ t เท่ากับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษากลไกการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

เติมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร และสารทีบีเอ (Tertiary-butyl alcohol: TBA) เข้มข้น 5% ปรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร และค่าพีเอชให้เป็นไปตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา เก็บตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2-3 หยด เพื่อกำจัดโอโซนที่เหลือ ทำการทดลองซ้ำโดยปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของทีบีเอเป็น 10% และ 20%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น

1) ผลของค่าพีเอช

การศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น ทำการแปรค่าพีเอชเท่ากับ 5, 7 และ 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาแสดงดัง Fig. 2 พบว่าการเพิ่มพีเอชส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น โดยที่ระยะเวลาการบำบัด 30 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 65.32%, 69.91% และ 75.48% ที่พีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะเบสมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนสูง ทำให้เกิดการสลายตัวของโอโซนเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งมีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูงกว่าโอโซน (Chen et al., 2016) จึงทำให้เกิดการสลายตัวของสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ได้มาก ในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ค่าพีเอชของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 9

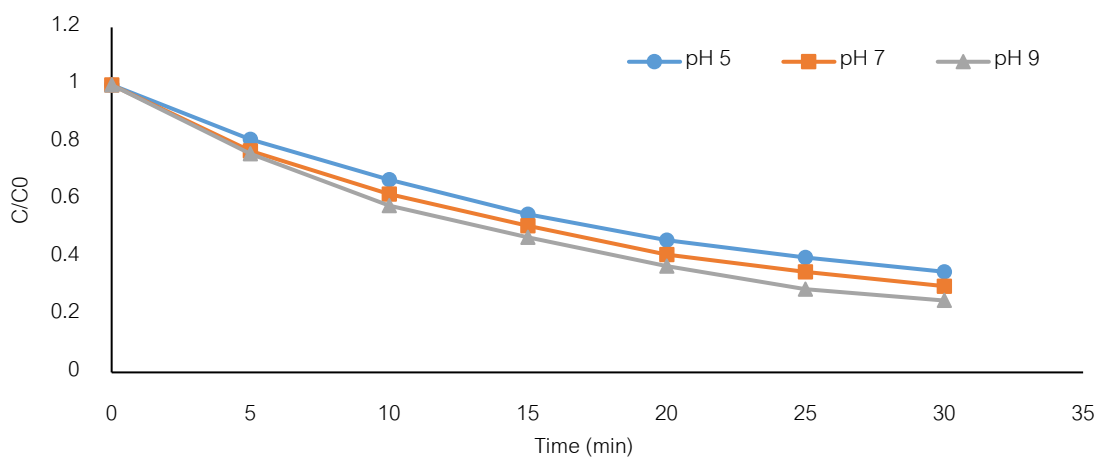


Fig. 2 Effect of pH on RB5 removal by ozonation ($\text{O}_3 = 30 \text{ mg/h}$ และ $[\text{RB5}] = 300 \text{ mg/L}$)

2) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ทำการแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 9 ผลการทดลองแสดงดัง Fig.3 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถถูกบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ความเข้มข้นสูงกว่า โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 75.48 ในขณะที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 65.15% และ 59.56% ตามลำดับ เนื่องจากการทดลองใช้ปริมาณโอโซนคงที่ เมื่อเพิ่มปริมาณสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 สูงขึ้น ปริมาณโอโซนที่ทำปฏิกิริยากับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 มีจำกัด จึงทำให้สีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ยังคงหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของธัญวรรณและชลอ (2559)

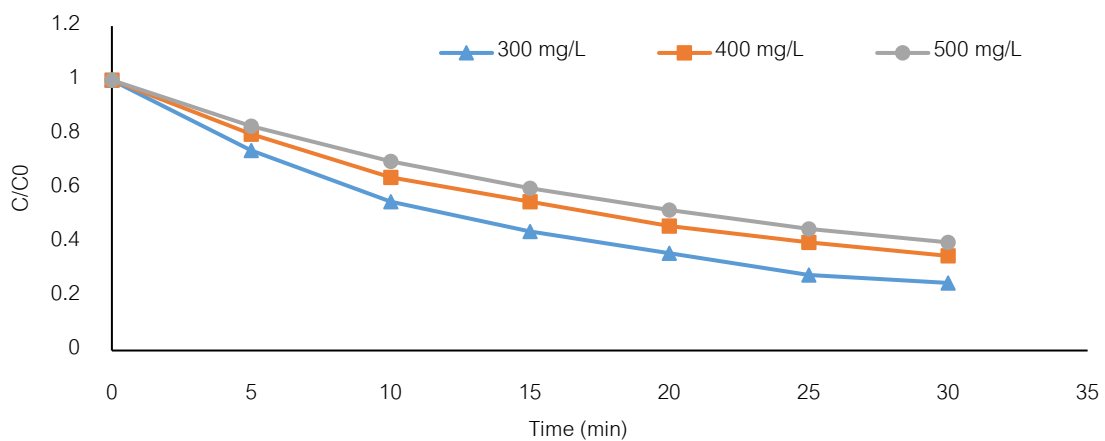


Fig. 3 Effect of initial concentration on RB5 removal by ozonation ($O_3 = 30 \text{ mg/h}$, $\text{pH} = 9$)

ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ใช้ตะกอนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1) ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ใช้ตะกอนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการแปรค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.5 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเท่ากับ 9 จาก Fig.4 พบว่าที่เวลา 30 นาที การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.05 เป็น 0.1 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ดีขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ระยะเวลา 30 นาที เท่ากับ 77.25% และ 84.17% ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งการย่อยสลายตัวโอโซนให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลได้มากขึ้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสีย้อมได้มากกว่า อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถึง 0.5 กรัมต่อลิตร ให้ผลการทดลองในทางกลับกัน โดยลดประสิทธิภาพการบำบัดลงเหลือ 72.95% เนื่องจากการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากเกินไป อาจทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่าง

กันเอง (Self scavenging) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kruanak and Jarusutthirak2019,) ในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ปริมาณตะกั่วเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร

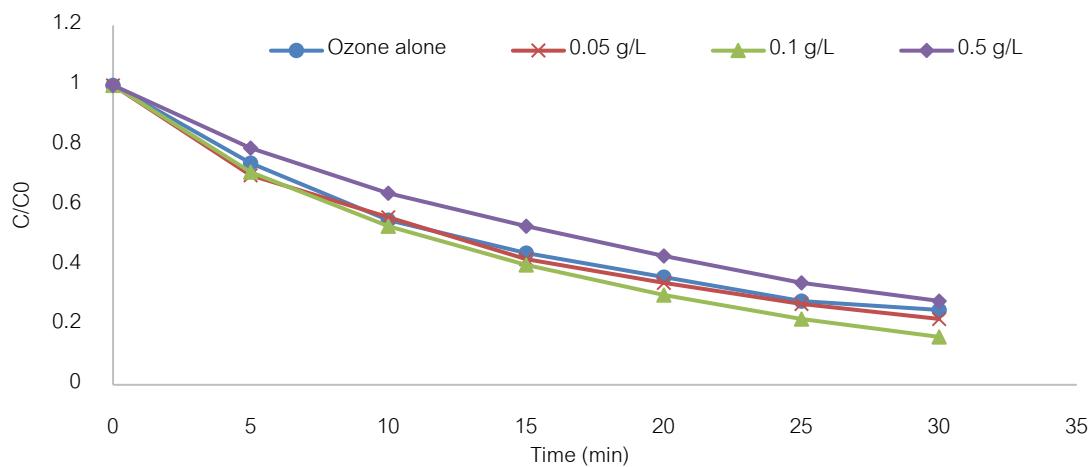


Fig. 4 Effect of catalyst dosage on RB5 removal efficiencies by catalytic ozonation ($O_3 = 30$ mg/h, pH = 9 and [RB5] = 300 mg/L)

2) ผลของพีเอช

การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนในขั้นที่ใช้เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการแปรค่าพีเอชเท่ากับ 5, 7 และ 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร จาก Fig. 5 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอช 9 มีค่ามากกว่าที่พีเอช 5 และ 7 เนื่องจากที่พีเอชเป็นเบส ทำให้เกิดการสลายตัวของโอโซนเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งมีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูง (Chen et al. 2016) ดังได้กล่าวมาแล้ว เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 30 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 โดยที่พีเอช 5, 7 และ 9 มีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 73.80%, 75.88%, และ 82.63% ตามลำดับ

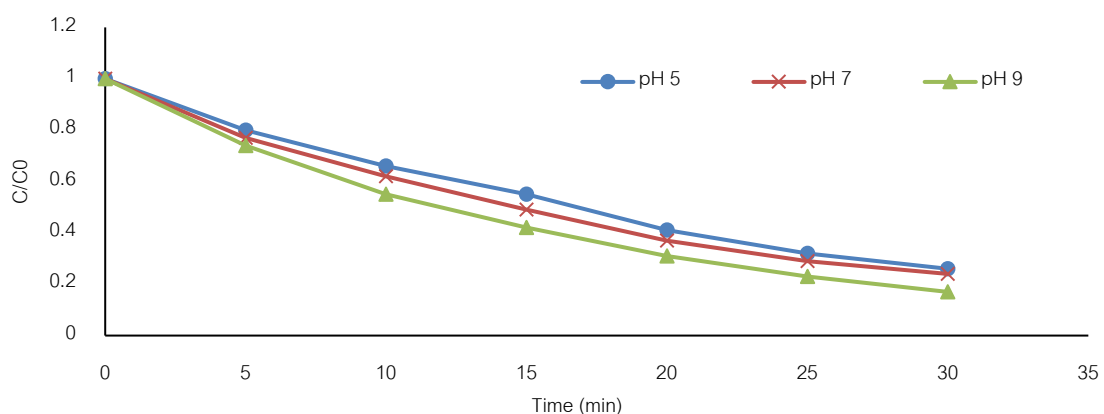


Fig. 5 Effect of pH on RB5 removal efficiencies by catalytic ozonation ($O_3 = 30$ mg/h, [Catalyst] = 0.1 g/L และ [RB5] = 300 mg/L)

3) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ใช้ตะกั่วเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดัง Fig. 6 โดยพบว่าสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 เข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถถูกบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งได้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 83.38% ในขณะที่ความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 72.95% และ 63.09% ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ในขณะที่ปริมาณก๊าซโอโซนที่ใช้ในการทดลองคงที่ ทำให้ก๊าซโอโซนที่ทำปฏิกิริยากับสีย้อมและอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยามีปริมาณจำกัดสำหรับเกิดปฏิกิริยากับสีย้อมและ/หรือสารมัธยันต์ (Intermediates) ที่เกิดจากการสลายตัวของสีย้อม จึงทำให้สีย้อมยังคงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้น เมื่อนำมาคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด จึงพบว่ามีค่าลดลง ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของธัญวรรณและชลอ (2559)

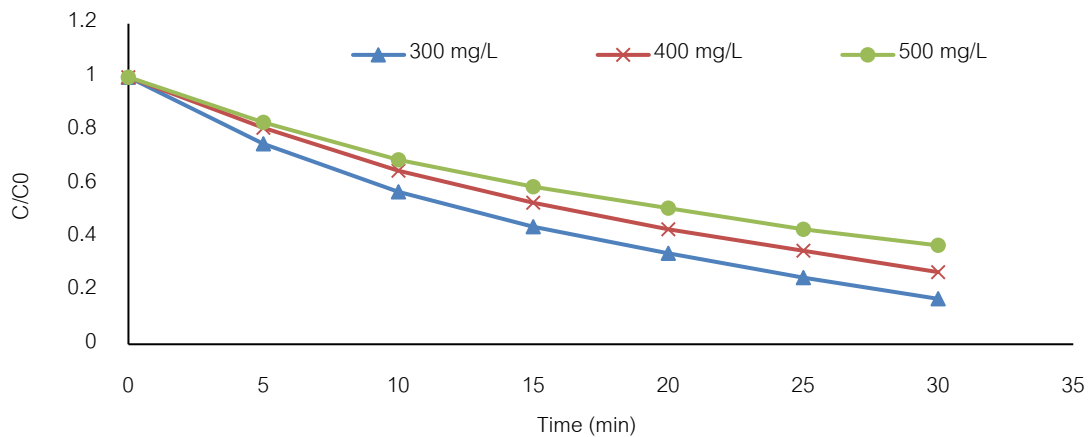


Fig. 6 Effect of initial concentration on RB5 removal efficiencies by catalytic ozonation ($O_3 = 30 \text{ mg/h}$, [Catalyst] = 0.1 g/L และ $\text{pH} = 9$)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ใช้ตะกั่วเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียว ได้ผลการศึกษาดัง Table 1 โดยพบว่าปฏิกิริยาการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 เป็นไปตามแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟแบล็ก 5 เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ใช้ตะกั่วเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าเท่ากับ 0.0601 นาที^{-1} ซึ่งสูงกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียวที่มีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา 0.0471 นาที^{-1} แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนเนชั่นสามารถเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าการใช้กระบวนการโอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukmilin et al. (2019)

Table 1 Kinetic study of RB5 removal by catalytic ozonation compared with ozonation alone

Parameters	Unit	Value	Rate constant (k, min ⁻¹)	
			Catalytic ozonation	Ozonation alone
Catalyst dosage	g/L	0.05	0.0492	-
		0.1	0.0601	-
		0.5	0.0430	-
pH	-	5	0.0450	0.0354
		7	0.0482	0.0400
		9	0.0583	0.0471
Initial RB5 concentration	mg/L	300	0.0578	0.0471
		400	0.0430	0.0350
		500	0.0324	0.0302

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ใช้ตะกอนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการโอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียว ใช้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 และความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการศึกษาดัง Fig. 7 พบว่า ที่ระยะเวลา 30 นาทีที่ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ระหว่างกระบวนการโอโซนเนชั่นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยากับกระบวนการโอโซนเนชั่นไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเท่ากับ 84.17% และ 75.48% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี พบว่ากระบวนการโอโซนเนชั่นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีได้ดีกว่ากระบวนการโอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีเท่ากับ 62.5% และ 37.5% ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการโอโซนเนชั่นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา มีการสลายตัวได้อินทรีย์ไฮดรอกซิลที่สามารถบำบัดสารมัธยันต์ (Intermediates) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบำบัดได้ดีกว่ากระบวนการโอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ตะกอนเหล็กสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ได้ดี เนื่องจากตะกอนเหล็กมีองค์ประกอบของเหล็กที่ช่วยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของโอโซนและช่วยผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ได้ดีกว่า ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Van et al. (2019)

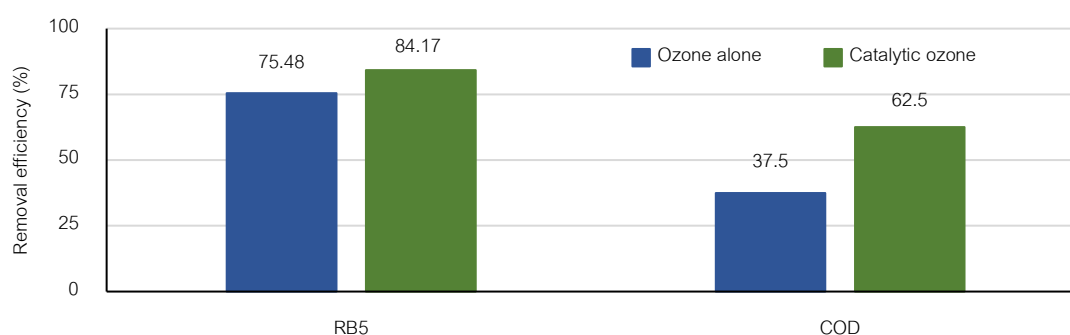


Fig. 7 RB5 and COD removal efficiencies by catalytic ozonation compared with ozonation alone ($O_3 = 30$ mg/h, [Catalyst] = 0.1 g/L, [RB5] = 300 mg/L, pH = 9, and reaction time = 30 min)

การศึกษากลไกการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษากลไกการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาใช้สารทีบีเอ (Tertiary-butyl alcohol: TBA) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับอนุมูลไฮดรอกซิล ในการทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแบล็ก 5 เข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 และใช้ตะกอนเหล็ก 0.1 กรัมต่อลิตรเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการแปรค่าความเข้มข้นของสารทีบีเอในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5%, 10%, และ 20% โดยปริมาตรและเดินระบบโอโซนชั้นเป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองแสดงดัง Fig. 8 โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารทีบีเอประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ลดลง โดยประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 78.16%, 71.25% และ 62.51% ที่ความเข้มข้นทีบีเอ 5%, 10%, และ 20% ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมต่ำกว่าการทดลองชุดควบคุมที่ไม่เติมสารทีบีเอ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 81% ทั้งนี้เนื่องจากสารทีบีเอเป็นสารรีดิวซ์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลได้ดี โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลสูง เท่ากับ $6.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารทีบีเอในระบบ สารทีบีเอสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลไม่สามารถออกซิไดส์สีย้อมได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟลดลง การทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อให้เห็นว่ากลไกหลักในการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่ใช้ตะกอนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดจากอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kruanak and Jarusutthirak (2019)

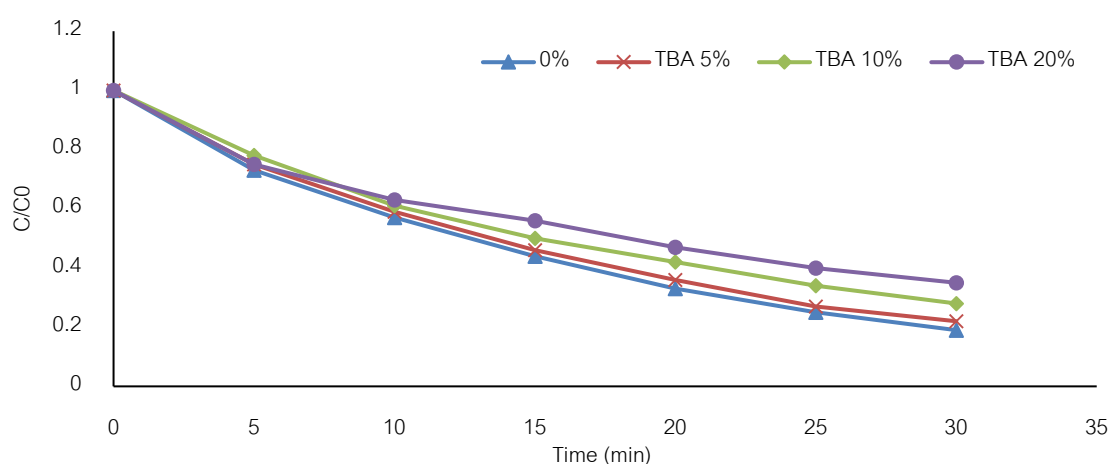


Fig. 8 Effect of TBA on RB5 removal efficiencies by catalytic ozonation ($\text{O}_3 = 30 \text{ mg/h}$, $[\text{Catalyst}] = 0.1 \text{ g/L}$, $[\text{RB5}] = 300 \text{ mg/L}$, and $\text{pH} = 9$)

สรุป

ตะกอนเหล็กสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนชั้นเพื่อบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าพีเอช และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.05 เป็น 0.1 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 77.25% เป็น 84.17% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.5 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมลดลงเหลือ 72.95% เนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างกันเอง การเพิ่มพีเอชส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น โดยในสภาวะเบสส่งผลให้การสลายตัวของโอโซนมากขึ้นเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลที่มีศักยภาพในการออกซิไดส์สูง ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ส่งผลให้ประสิทธิภาพ

การบำบัดลดลง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 83.38%, 72.95% และ 63.09% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองใช้ปริมาณก๊าซโอโซนคงที่ เมื่อปริมาณสีเพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซโอโซนที่ทำปฏิกิริยากับสีย่อมจึงมีจำกัด

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดสีด้วยแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต 5 ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโอโซนชั้น พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0601 นาที⁻¹ สำหรับกระบวนการโอโซนชั้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และ 0.0471 นาที⁻¹ สำหรับกระบวนการโอโซนชั้น การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดสีด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่ใช้ตะกอนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารที่บีเอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลง โดยที่ความเข้มข้นของสารที่บีเอที่ความเข้มข้น 0%, 5%, 10%, และ 20% โดยปริมาตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เท่ากับ 81%, 78.16%, 71.25%, และ 62.51% ตามลำดับ ด้วยกระบวนการ โอโซนชั้นที่ใช้ตะกอนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดจากการออกซิไดซ์ของอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นหลัก ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลสามารถกำจัดสารมัธยันต์ที่เกิดจากการสลายตัวของสียอมได้ดีทำให้กระบวนการโอโซนชั้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีสูงกว่าการใช้กระบวนการโอโซนชั้นเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเท่ากับ 62.5% และ 37.5% ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม และกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำโครงการวิทยาศาสตร์ในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ธัญวรรณ กฤษณะพุกต์, ชลอ จารุสุทธิรักษ์. 2560. การบำบัดสีในน้ำเสียสียอมสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาใน: รายงานประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54 (สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. หน้า 1107–1114.
- สิริ สโมสรสุข. 2562. การบำบัดไดโคฟีแนคในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการคะตะไลติกโอโซนชั้นที่มีตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. โครงการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Chen, W., Li, X., Pan, Z., Ma, S., Li, L. 2001. Effective mineralization of diclofenac by catalytic ozonation using Fe-MCM-41 catalyst. Chem. Eng. J. 304: 594–601. doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.139
- Hien, N.T., Nguyen, L.H., Van, H.T., Nguyen, T.D., Nguyen, T.H.V., Chu, T.H.H., Nguyen, T.V., Trinh, V.T., Vu, X.H., Aziz, K.H.H. 2020. Heterogeneous catalyst ozonation of direct black 22 from aqueous solution in the presence of metal slags originating from industrial solid wastes. Sep. Pur. Technol. 233: 115961. doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115961
- Kruanak, K., Jarusutthirak, C. 2019. Degradation of 2, 4, 6-trichlorophenol in synthetic wastewater by catalytic ozonation using alumina supported nickel oxides. J. Environ. Chem. Eng. 7: 102825. doi.org/10.1016/j.jece.2018.102825
- Leusink J. 2016. Oxidation potential of ozone. <https://www.oxidationtech.com/blog/oxidation-potential-of-ozone-2/>, September 16, 2019.

- Sukmilin, A., Boonchom, B., Jarusutthirak, C. 2019. Catalytic ozonation using iron-doped water treatment sludge as a catalyst for treatment of phenol in synthetic wastewater. *Environ. Nat. Res. J.* 17: 87–95. doi.org/10.32526/enrj.17.2.2019.15
- Van, H.T., Nguyen, L.H., Hoang, T.K., Tran, T.P., Vo, A.T., Pham, T.T., Nguyen, X.C. 2019. Using FeO-constituted iron slag wastes as heterogeneous catalyst for Fenton and ozonation processes to degrade reactive red 24 from aqueous solution. *Sep. Pur. Technol.* 224: 431–442. doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.048
- Wu, C., Kuo, C., Chang, C. 2008. Homogeneous catalytic ozonation of C. I. Reactive Red 2 by metallic ions in a bubble column reactor. *J. Haz. Mat.* 154: 748–755. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.087

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.ปกรณ วรรณอมร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
2. ผศ.ดร.พจนารถ สุวรรณรุจิ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
3. ผศ.ดร.วันชัย ปลื้มภาณุภัทร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
4. ผศ.ดร.วิชา อิมอร่าม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
5. รศ.ดร.กัญจนา ชีระกุล ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
6. ผศ.ดร.ชนิตา บุญมาก ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
7. รศ.ดร.ชอุภา ชีระภัทรสกุล ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
8. ผศ.ดร.เดือนรัตน์ ชลอุดมกุล ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
9. รศ.ดร.นันทนา สีสุข ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
10. รศ.ดร.เลอลักษณ์ จิตรดอน ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
11. ศ.ดร.สาวิตรี ลิ้มทอง ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
12. รศ.ดร.อิงอร กิมก ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
13. รศ.ดร.โชติกา หยกทองวัฒนา ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
14. รศ.ดร.ณัฐนันท์ ต.เทียนประเสริฐ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
15. รศ.ดร.ราตรี วงศ์ปัญญา ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
16. รศ.ดร.คณพล จุฑามณี ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
17. ดร.จรัสวัน วารากานนท์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
18. ดร.มินตา ชัยประสงศ์สุข ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
19. ผศ.ดร.ประดิษฐ์ แสงทอง ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
20. ดร.มิ่งขวัญ นิพิฐวัธนะผล ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
21. ศ.ดร.อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
22. รศ.ดร.อัญชณี คูเบอว่า ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
23. ผศ.ดร.จรินทร์ โอชะคลัง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
24. รศ.ดร.จิรโรจน์ ต.เทียนประเสริฐ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
25. รศ.ดร.ชัชวาล วงศ์ชูสุข ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
26. ผศ.ดร.ชัยยะ เหลืองวิริยะ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
27. ดร.ปพิชญา ชัยสกุล ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
28. รศ.ดร.พงศกร จันทรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
29. ผศ.ดร.วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

30. รศ.ดร.ศิริกาญญา ทงมี	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
31. ผศ.ดร.จันทิกา ชูโชติรส	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
32. ผศ.ดร.ณัฐสมน เพชรแสง	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
33. รศ.ดร.พงศ์เทพ ประจักษ์ศรี	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
34. ผศ.ดร.พิมพ์สิริ สุวรรณนะ	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
35. รศ.ดร.วรรณวิมล ปาสาณพันธ์	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
36. ผศ.ดร.เทพฤทธิ์ บัณฑิตวัฒนาวงศ์	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์
37. ผศ.ดร.ผกาเกษ วัตยา	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์
38. ผศ.ดร.สุชุมาล กิตติสิน	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

Editorial Board

Subject: Science (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Pakorn Wattana-Amorn	2. Asst.Prof.Dr.Potjanart Suwanruji
3. Asst.Prof.Dr.Wanchai Pluempanupat	4. Asst.Prof.Dr.Witcha Imaram
5. Assoc.Prof.Dr.Gunjana Theeragool	6. Asst.Prof.Dr.Chanita Boonmak
7. Asst.Prof.Dr.Churapa Teerapatsakul	8. Asst.Prof.Dr.Duenrut Chonudomkul
9. Assoc.Prof.Dr.Nantana Srisuk	10. Assoc.Prof.Dr.Lerluck Chitradon
11. Prof.Dr.Savitree Limtong	12. Assoc.Prof.Dr.Ingorn Kimkong
13. Asst.Prof.Dr.Chotika Yokthongwattana	14. Assoc.Prof.Dr.Nattanan T.Thienprasert
15. Assoc.Prof.Dr.Ratree Wongpanya	16. Assoc.Prof.Dr.Kanapol Jutamanee
17. Dr.Jaruswan Warakanont	18. Dr.Minta Chaiprasongsuk
19. Asst.Prof.Dr.Pradit Sangthong	20. Dr.Mingkwon Nipitwattanaphon
21. Prof.Dr.Arinthip Thamchaipenet	22. Assoc.Prof.Dr.Anchaneer Cubera
23. Asst.Prof.Dr.Jarin Osaklung	24. Assoc.Prof.Dr.Jiraroj T.Thienprasert
25. Assoc.Prof.Dr.Chatchawal Wongchoosuk	26. Asst.Prof.Dr.Chaiya Luengviriyaya
27. Dr.Papichaya Chaisakul	28. Assoc.Prof.Dr.Pongsakorn Jantaratana
29. Asst.Prof.Dr.Wiwat Wongkokua	30. Assoc.Prof.Dr.Sirikanjana Thongmee
31. Asst.Prof.Dr.Chantiga Choochottiros	32. Asst.Prof.Dr.Nattasamon Petchsang
33. Assoc.Prof.Dr.Pongthep Prajongtat	34. Asst.Prof.Dr.Pimsiree Suwanna
35. Assoc.Prof.Dr.Wanvimol Pasanapan	36. Asst.Prof.Dr.Thepparit Banditwattanawong
37. Asst.Prof.Dr.Pakaket Wattuya	38. Asst.Prof.Dr.Sukumal Kitisin

ผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
2. รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
3. ผศ.ดร.บารเมศ วรรณระภูติ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
4. รศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรรณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
5. ผศ.ดร.สมิสา รุ่งแจ้ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
6. ศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
7. ผศ.ดร.อนุเฝ้า อบแพทย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
8. ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
9. รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
10. รศ.ดร.เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กุล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
11. รศ.ดร.สันติ ชินานูวัตินวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
12. รศ.ดร.วีระเกษตร สอนผกา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
13. รศ.ดร.เขาวลิต มิตรสันติสุข ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
14. ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
15. ผศ.ดร.กาญจนพันธุ์ สุขวิชชัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
16. ผศ.ดร.ปฐมภรณ์ ศรีผดุงธรรม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
17. รศ.ดร.เฉลิมราช วันทวิน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
18. รศ.ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
19. รศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
20. ผศ.ดร.วรวุฒิ หวังวัชรกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
21. รศ.ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
22. ผศ.ดร.อมรรัตน์ เลิศวรศิริกุล ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
23. รศ.ดร.วีรชัย ชัยวรพฤษย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
24. ผศ.ดร.จิตรทัศน์ ผักเจริญผล ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ผศ.ดร.นิภาวรรณ กุลสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
2. ดร.อภิวัชรินทร์ โชติสังกาศ สำนักผู้อำนวยการความปลอดภัย กรมทางหลวง

- | | |
|----------------------------------|---|
| 3. ดร.สนธยา ทองอรุณศรี | สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก |
| 4. ผศ.ดร.พงษ์พิพัฒน์ อานันทนสกุล | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 5. ผศ.ดร.วันโชค เครือหงษ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก |
| 6. ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์ | กรมทางหลวง |
| 7. รศ.ดร.วิรุพพ์ คำชุม | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 8. ดร.สุกิจ ยินดีสุข | กรมทางหลวง |
| 9. ผศ.ดร.วนารัตน์ กรอิสรานุกุล | ภาควิชาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 10. ผศ.ศราวุฒิ สุพรรณวาท | สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตสกลนคร |
| 11. ผศ.ดร.ชัยฤกษ์ จักรพัฒน์จิต | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 12. รศ.ดร.ภารดี ช่วยบำรุง | สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 13. อ.ดร.สุเมธ วงศ์เขียว | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 14. รศ.ดร.ศุวศา กานตวนิชกูร | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 15. ผศ.ดร.อัษฎพร บุญมณีพิสุทธิ | ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 16. ผศ.ดร.เจษฎาภรณ์ ปรียด่าง | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 17. ผศ.วัชรพัฐ เมตตานันท | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |

Editorial Board

Subject: Engineering and Architecture (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Nuanwan Tuaycharoen

2. Assoc.Prof.Dr.Apiniti Jotisankasa

- | | |
|--|--|
| 3. Asst.Prof.Dr.Barames Vardhanabhuti | 4. Assoc.Prof.Dr.Kitjapat Phuvoravan |
| 5. Asst.Prof.Dr.Kanisa Rungjang | 6. Prof.Dr.Wanchai Yodsudjai |
| 7. Asst.Prof.Dr.Anuphao Aobpaet | 8. Asst.Prof.Dr.Saroch Boonsiripant |
| 9. Assoc.Prof.Dr.Korchoke Chantawarangul | 10. Assoc.Prof.Dr.Ackchai Sirikijpanichkul |
| 11. Assoc.Prof.Dr.Santi Chinanuwatiwong | 12. Assoc.Prof.Dr.Weerakaset Suanpaga |
| 13. Assoc.Prof.Dr.Chowarit Mitsantisuk | 14. Asst.Prof.Dr.Dusit Thanapatay |
| 15. Asst.Prof.Dr.Kanjanapan Sukvichai | 16. Asst.Prof.Dr.Patamaporn Sripadungtham |
| 17. Assoc.Prof.Dr.Chalermraj Wantawin | 18. Assoc.Prof.Dr.Pongsak Noophan |
| 19. Assoc.Prof.Dr.Ratcha Chaichana | 20. Asst.Prof.Dr.Worawut Wangwatcharakul |
| 21. Assoc.Prof.Dr.Chansiri Singhtaun | 22. Asst.Prof.Dr.Amornrat Lertworasirikul |
| 23. Assoc.Prof.Dr.Weerachai Chaiworapuek | 24. Asst.Prof.Dr.Jittat Fakcharoenphol |

Subject: Engineering and Architecture (External)

- | | |
|---|--|
| 1. Asst.Prof.Dr.Nipawan Kunsuwan | 2. Dr.Apivot Jotisankasa |
| 3. Dr.Sontaya Tongaroonsri | 4. Asst.Prof.Dr.Pongpipat Anantanasakul |
| 5. Asst.Prof.Dr.Wunchock Kroehong | 6. Dr.Auckpath Sawangsuriya |
| 7. Assoc.Prof.Dr.Viroon Kamchoom | 8. Dr.Sukit Yindeesuk |
| 9. Asst.Prof.Dr.Wanarat Konisranukul | 10. Asst.Prof.Sarawut Supunnarach |
| 11. Asst.Prof.Dr.Chairerg Jakpattanajit | 12. Assoc.Prof.Dr.Paradee Chuaybamroong |
| 13. Dr.Sumeth Wongkiew | 14. Assoc.Prof.Dr.Suwasa Kantawanichkul |
| 15. Asst.Prof.Dr.Anyaporn Boonmahitthisud | 16. Asst.Prof.Dr.Jetsadaporn Priyadumkol |
| 17. Asst.Prof.Vacharapat Mettanant | |

ผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

- | | |
|--|--|
| 1. ผศ.ดร.กนกรัตน์ ลิ้มปิไสภณ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 2. ผศ.ดร.กนิษฐพร วังไฉ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 3. ผศ.ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล | ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 4. ผศ.ดร.กุลนาถ ทองขาว | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 5. ผศ.ดร.ชนิษฐา วัชรภรณ์ | ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 6. ดร.จรีรัตน์ ฉันทวุฒิพร | ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร |
| 7. รศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์ | ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 8. ผศ.ดร.ณัฐกานต์ นิตยพันธ์ | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 9. อ.ณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร | ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 10. รศ.ดร.นพรัตน์ ปรายสงบ | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 11. รศ.ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 12. ดร.บัณฑิตา วานิก | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 13. ดร.ปฐมมา จาตกานนท์ | ฝ่ายเทคโนโลยีชีวมวลและพลังงานชีวภาพ
สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
และอุตสาหกรรมเกษตร |
| 14. รศ.ดร.ประภิต สุขไชย | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 15. น.ส.ประจเวท สาทมาลี | ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร
สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร |
| 16. ผศ.ดร.ประมุข ภระกุลสุขสถิตย์ | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 17. รศ.ดร.ปริศนา สุวรรณภรณ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 18. ผศ.ดร.ปิติยา กมลพัฒนะ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 19. ดร.พรพรรณภัทร พรหมเพ็ญ | ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 20. ผศ.ดร.มาศอุบล ทองงาม | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 21. รศ.ดร.รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 22. รศ.ดร.วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 23. ผศ.ดร.วศะพร เพรททิเชย์ จันทร์พุ่ม | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 24. ผศ.ดร.วิษฐิตา จันทราพรชัย | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |

- | | |
|----------------------------------|--|
| 25. รศ.ดร.วีระเชษฐ จิตตานิษฐ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 26. ผศ.ดร.ศศิธร ตรงจิตภักดี | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 27. ศ.ดร.สาโรจน์ ศิริคั่นสนียกุล | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 28. รศ.ดร.สาวิตรี รัตนสุมาวงศ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 29. รศ.ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 30. ผศ.ดร.สุดาทิพย์ แซ่ตัน | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 31. รศ.ดร.สุนทรี สุวรรณลิขิต | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 32. รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมศิริ | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 33. ผศ.ดร.อุศมา สุนทรนฤรังษี | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. ดร.กรกช ฮามสุโพธิ์ | สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 2. ดร.กิตติมา ไวไธสง | ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 3. ผศ.ดร.กิติพงษ์ อัครกุล | ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย | ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 5. รศ.ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์ | ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. รศ.ดร.จิราวัฒน์ อนันตกุล | ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 7. รศ.ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล | ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 8. รศ.ดร.ณัฐา เลานกุลจิตต์ | คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

- | | |
|----------------------------------|--|
| 9. ผศ.ดร.ตรีษ กวักเพชญ์ | ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 10. ดร.ปาริชาติ เทียนจุมพล | ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 11. ผศ.ดร.พนิตา งามเชื้อขีต | ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 12. ผศ.ดร.พิสิฐ ธรรมวิถิ | คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |
| 13. รศ.ดร.พิชญอร ไหมสุทธิสกุล | คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 14. รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย | สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 15. ผศ.ดร.ศิรินันท์ แก่นทอง | ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร |
| 16. ผศ.ดร.สุธีรา วัฒนกุล | สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต |
| 17. ผศ.ดร.สุพีชา คุ้มเกตุ | ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล |

Editorial Board

Subject: Agro-Industry (Internal)

- | | |
|---|---|
| 1. Asst.Prof.Dr.Kanokrat Limpisophon | 2. Asst.Prof.Dr.Kanithaporn Vangnai |
| 3. Asst.Prof.Dr.Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul | 4. Asst.Prof.Dr.Kullanart Tongkhao |
| 5. Asst.Prof.Dr.Kanitta Watcharaporn | 6. Dr.Jareerat Chunthawodtiporn |
| 7. Assoc.Prof.Dr.Jantip Setthayanond | 8. Asst.Prof.Dr.Nuttakan Nitayapat |
| 9. Mr.Nattadon Rungruangkitkrai | 10. Assoc.Prof.Dr.Nopparat Prabsangob |
| 11. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong | 12. Dr.Bandhita Wanikorn |
| 13. Dr.Pathama Chatakanonda | 14. Assoc.Prof.Dr.Prakit Sukyai |
| 15. Miss Prajongwate Satmalee | 16. Asst.Prof.Dr.Pramuk Parakulsuksatid |
| 17. Assoc.Prof.Dr.Prisana Suwannaporn | 18. Asst.Prof.Dr.Pitiya Kamonpatana |
| 19. Dr.Phannaphat Phromphen | 20. Asst.Prof.Dr.Masubon Thongngam |
| 21. Assoc.Prof.Dr.Rungnaphar Pongsawatmanit | 22. Assoc.Prof.Dr.Wannasawat Ratphitagsanti |
| 23. Asst.Prof.Dr.Wasaporn Preteseille Chanput | 24. Asst.Prof.Dr.Withida Chantrapornchai |

25. Assoc.Prof.Dr.Weerachet Jittanit
27. Prof.Dr.Sarote Sirisansaneeyakul
29. Assoc.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
31. Assoc.Prof.Dr.Suntaree Suwonsichon
33. Asst.Prof.Dr.Aussama Soonrunnarudrungsri

26. Asst.Prof.Dr.Sasitorn Tongchitpakdee
28. Assoc.Prof.Dr.Savitree Ratanasumawong
30. Asst.Prof.Dr.Sudathip Sae-tan
32. Assoc.Prof.Dr.Hathairat Rimkeeree

Subject: Agro-Industry (External)

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1. Dr.Korakoch Hamsupo | 2. Dr.Kittima Waithaisong |
| 3. Asst.Prof.Dr.Kitipong Assatarakul | 4. Asst.Prof.Dr.Kiattisak Duangmal |
| 5. Assoc.Prof.Dr.Kanitha Tananuwong | 6. Assoc.Prof.Dr.Jirarat Anuntagool |
| 7. Assoc.Prof.Dr.Chaleeda Borompichaichartkul | 8. Assoc.Prof.Dr.Natta Laohakunjit |
| 9. Asst.Prof.Dr.Daris Kuakpetoon | 10. Dr.Parichat Theanjumpol |
| 11. Asst.Prof.Dr.Panita Ngamchuachit | 12. Asst.Prof.Dr.Pisit Dhamvithee |
| 13. Assoc.Prof.Dr.Pitchaon Maisuthisakul | 14. Assoc.Prof.Dr.Saksit Chanthai |
| 15. Asst.Prof.Dr.Sirinun Keanthong | 16. Asst.Prof.Dr.Suteera Vatthanakul |
| 17. Asst.Prof.Dr.Supeecha Kumkate | |

ผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. รศ.ดร.รองลาภ สุขมาสงรวง | ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 2. รศ.ดร.ลดาวัลย์ พวงจิตร | ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์ |
| 3. ผศ.ดร.ขรรค์ชัย ประสานัย | ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 4. ผศ.ดร.นิสา เหล็กสูงเนิน | ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 5. ผศ.ดร.พิชิต ลำไย | ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 6. ผศ.ดร.สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ | ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์ |
| 7. ดร.กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ | ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 8. ดร.จิราภรณ์ เทียมพันธ์พงศ์ | ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ |
| 9. ดร.ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง | ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 10. ดร.ลัดดาวรรณ เจริญตระกูล | ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 11. ดร.วรงค์ สุขเสวต | ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ |
| 12. รศ.ดร.ฐิติมา รุ่งรัตนอุบล | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |

- | | |
|----------------------------------|--|
| 13. ผศ.ดร.ธนิศร์ ปัทมพิฑูร | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 14. ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตน์มโนกร | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 15. ผศ.ดร.อรอนงค์ ผิวนิล | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 16. ดร.ปวีร์ คล่องเวสสะ | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 17. ดร.มณีภาณุจณ์ อยู่เยี่ยม | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 18. ดร.สุธี จรรยาสุทธิวงศ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 19. ดร.แอน กำภู ณ อยุธยา | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. ดร.ฉัตรพรพรษ พงษ์เจริญ | สำนักวิชาการพิพิธภัณฑธรรมชาติวิทยา
องค์การพิพิธภัณฑวิทยาาสตร์แห่งชาติ |
| 2. ดร.โดม ประทุมทอง | องค์การพิพิธภัณฑวิทยาาสตร์แห่งชาติ |
| 3. ดร.ศุภลักษณ์ ศิริ | นักวิชาการอิสระ |
| 4. ดร.สมหญิง ทัทพิภรณ์ | สำนักอนุรักษ์สัตว์ป่า กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช |
| 5. น.สพ.ดร.มานิช ยินดี | วิทยาลัยสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ |
| 6. ผศ.ดร.สวระ บำรุงศรี | ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 7. ผศ.ดร.อิงอร ไชยยศ | สาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 8. ผศ.ดร.ยอดชาย ช่วยเงิน | สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 9. ผศ.ดร.สมบูรณ์ กิริติประยูร | สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 10. รศ.ดร.รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์ | คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 11. รศ.ดร.ดุสิต เวชกิจ | สาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |

Editorial Board

Subject: Natural Resources and Environment (Internal)

- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Assoc.Prof.Dr.Ronlarp Sukmasuang | 2. Assoc.Prof.Dr.Ladawan Puangchit |
| 3. Asst.Prof.Dr.Khanchai Prasanai | 4. Asst.Prof.Dr.Nisa Leksungnoen |
| 5. Asst.Prof.Dr.Pichit Lumyai | 6. Asst.Prof.Dr.Sapit Diloksumpun |
| 7. Dr.Kritsadapan Palakit | 8. Dr.Jiraporn Teampanpong |

9. Dr.Chakrit Na takuathung

11. Dr.Warong Suksavate

13. Asst.Prof.Dr.Thanit Pattamapitoon

15. Asst.Prof.Dr.Onanong Phewnil

17. Dr.Maneekarn Yoo-iam

19. Dr.Ann Kambhu Na Ayudhya

10. Dr.Laddawan Rianthakool

12. Assoc.Prof.Dr.Thitima Rungratanaubon

14. Asst.Prof.Dr.Prapaipid Chairattanamanokorn

16. Dr.Pawee Klongvessa

18. Dr.Suthee Janyasuthiwong

Subject: Natural Resources and Environment (External)

1. Dr.Chattraphas Pongcharoen

3. Dr.Supalak Siri

5. DVM.Ph.D.Marnoch Yindee

7. Asst.Prof.Dr.Aingorn Chaiyes

9. Asst.Prof.Dr.Somboon Kiratiprayoon

11. Assoc.Prof.Dr.Dusit Wechakit

2. Dr.Dome Pratumthong

4. Dr.Somying Thunhikorn

6. Asst.Prof.Dr.Sara Bumrungsri

8. Asst.Prof.Dr.Yodchaiy Chuaynkern

10. Assoc.Prof.Dr.Rattanawat Chaiyarat



ประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ด้วยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยกลุ่มเครือข่ายวิจัยประชาชื่น จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐ ในปีพุทธศักราช ๒๕๖๕ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความรู้ความคิดเห็น ประสบการณ์ และเผยแพร่ผลงานวิจัย สาขาต่าง ๆ สู่สาธารณชน

เพื่อให้การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุผลสำเร็จ ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จึงแต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐ 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. อธิบดีกรมส่งเสริมสหกรณ์ | ที่ปรึกษา |
| ๑๗. ผู้ทรงคุณวุฒิด้านการผลิตพืช กรมวิชาการเกษตร | ที่ปรึกษา |
| ๑๘. อธิบดีกรมป่าไม้ | ที่ปรึกษา |
| ๑๙. อธิบดีกรมควบคุมมลพิษ | ที่ปรึกษา |
| ๒๐. อธิบดีกรมทรัพยากรธรณี | ที่ปรึกษา |

๒๑. อธิบดีกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง	ที่ปรึกษา
๒๒. ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม	ที่ปรึกษา
๒๓. อธิบดีกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช	ที่ปรึกษา
๒๔. นายกษัตริย์ศึกนิสิตเก่ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในพระบรมราชูปถัมภ์	ที่ปรึกษา
๒๕. นายกษัตริย์ศึกเศรษฐศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒๖. นายกษัตริย์ศึกเศรษฐศาสตร์เกษตรแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์	ที่ปรึกษา
๒๗. นายกษัตริย์ศึกสัตว์บาลแห่งประเทศไทย	ที่ปรึกษา
๒๘. นายกษัตริย์ศึกอารักขาพืชไทย	ที่ปรึกษา
๒๙. ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ	ที่ปรึกษา
๓๐. อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานกรรมการ
๓๑. รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์	รองประธานกรรมการ
๓๒. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ	รองประธานกรรมการ
๓๓. รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร	กรรมการ
๓๔. รองอธิการบดีฝ่ายเทคโนโลยีดิจิทัล	กรรมการ
๓๕. รองอธิการบดีฝ่ายนวัตกรรมและกิจการเพื่อสังคม	กรรมการ
๓๖. รองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิตและพัฒนาอย่างยั่งยืน	กรรมการ
๓๗. รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาคุณภาพ	กรรมการ
๓๘. รองอธิการบดีฝ่ายการเงินและทรัพย์สิน	กรรมการ
๓๙. รองอธิการบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์	กรรมการ
๔๐. รองอธิการบดีฝ่ายกิจการสภามหาวิทยาลัยและพัฒนา ทรัพยากรมนุษย์	กรรมการ
๔๑. รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาบัณฑิตชั้นสูงและโครงการจัดตั้ง วิทยาเขตสุพรรณบุรี	กรรมการ
๔๒. รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
๔๓. รองอธิการบดีวิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๔๔. รองอธิการบดีวิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร	กรรมการ
๔๕. คณบดีคณะเกษตร	กรรมการ
๔๖. คณบดีคณะประมง	กรรมการ
๔๗. คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์	กรรมการ
๔๘. คณบดีคณะเทคนิคการสัตวแพทย์	กรรมการ
๔๙. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์	กรรมการ
๕๐. คณบดีคณะสิ่งแวดล้อม	กรรมการ
๕๑. คณบดีคณะวนศาสตร์	กรรมการ
๕๒. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	กรรมการ
๕๓. คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	กรรมการ
๕๔. คณบดีคณะอุตสาหกรรมเกษตร	กรรมการ
๕๕. คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์	กรรมการ

๕๖. คณะบดีคณะบริหารธุรกิจ	กรรมการ
๕๗. คณะบดีคณะศึกษาศาสตร์	กรรมการ
๕๘. คณะบดีคณะสังคมศาสตร์	กรรมการ
๕๙. คณะบดีคณะมนุษยศาสตร์	กรรมการ
๖๐. คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย	กรรมการ
๖๑. ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด	กรรมการ
๖๒. ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมและฝึกอบรม	กรรมการ
๖๓. ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์	กรรมการ
๖๔. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการและเลขานุการ
๖๕. รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหาร สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๖๖. หัวหน้าสำนักงานเลขานุการ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๖๗. นางสาวพิชชาอรุณี สิริชีวะเกษร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ให้ข้อคิดเห็นและอำนวยความสะดวกให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

๑. รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์	ที่ปรึกษา
๒. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ	ที่ปรึกษา
๓. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
๔. รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหาร สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานกรรมการ
๕. รองผู้อำนวยการฝ่ายประสานงานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	รองประธานกรรมการ
๖. นางสาวพิชชาอรุณี สิริชีวะเกษร	กรรมการและเลขานุการ
๗. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	ผู้ช่วยเลขานุการ
๘. นางสาวรติกร สมิตไมตรี	ผู้ช่วยเลขานุการ
๙. กรรมการหมวดวิชาการเกษตรศาสตร์	
๙.๑ สาขาพืช	
๑. คณะบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒. รองศาสตราจารย์พัชรียา บุญกอบแก้ว	ประธานกรรมการ
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิจิตรา แก้วสอน	รองประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์เฉลิมพล ภูมิไชย์	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์ชูศักดิ์ จอมพุก	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์ธิดา เดชฮวบ	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์วรชาติ วิศวะพัฒน์	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์เสาวนุช ถาวรพฤษ์	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์อรอุมา เพี้ยซ้าย	กรรมการ

๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุฑามาศ ร่มแก้ว	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจนจิรา ชุมภูคำ	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เหมอมาลัย วงศ์ชาวจันทร์	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงยศ โชติชูติมา	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทัศนัย จารุวัฒน์พันธ์	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนพล ไชยแสน	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนตรนภิส เขียวขำ	กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เบญญา มะโนชัย	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริยานุช จุลกะ	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริชาติ พรหมโชติ	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติพงษ์ โตบันลือภพ	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ กิตติภาดากุล	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เพชรดา ปินใจ	กรรมการ
๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัสจี คงสีล	กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัสกิติ เสริมศักดิ์	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาวรรณ เงินกลิ่น	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรารุช รุ่งเมฆารัตน์	กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุขุมาลัย เลิศมงคล	กรรมการ
๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนันต์ เจนวีร์วัฒน์	กรรมการ
๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพจน์ กาเข็ม	กรรมการ
๓๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนงค์นุช สาสนรักกิจ	กรรมการ
๓๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อฉัตรชญาณ์ มงคลชัยพฤษชัย	กรรมการ
๓๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัศলেখ รัตนวรรณิ	กรรมการ
๓๕. นางสาวกาญจนา บุญเรือง	กรรมการ
๓๖. นางสาวจรีรัตน์ ฉันทวุฒิพร	กรรมการ
๓๗. นางสาวจตุรภรณ์ ทัสสกุลพนิช	กรรมการ
๓๘. นางสาวนิตยา ชูเกาะ	กรรมการ
๓๙. นางสาววรรณสิริ วรรณรัตน์	กรรมการ
๔๐. นางสาวอรุณี วงษ์แก้ว	กรรมการ
๔๑. นายเฉลิมชาติ วงศ์ลีเจริญ	กรรมการ
๔๒. นายวีรชัย มัธยัสถ์ถาวร	กรรมการ
๔๓. นางสาวสรัญญา จันทรวีวัฒน์	กรรมการและเลขานุการ
๔๔. นางสมจิตต์ สองบาง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๒ สาขาสัตว์

๑. คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒. นายกสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทย	ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์พรณวดี โสพรรณรัตน์	ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาทิพย์ สุวรรณโสภี	รองประธานกรรมการ
๕. ศาสตราจารย์ชัยภูมิ ปัญชาศักดิ์	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์ศกร คุณวุฒิมฤทธิธรรม	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์จำเริญ เทียงธรรม	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์วิริยา ลุ่งใหญ่	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวิทย์ เปี้ยคำภา	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัจฉรา ชัยน	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กนกพร พ่วงพงษ์	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์วิทย์ ระฆังทอง	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญวิทย์ แก้วตาปี	กรรมการ
๑๔. นายदनัย จิตวา	กรรมการ
๑๕. นางสาวพนัดดา บึงศรีสวัสดิ์	กรรมการ
๑๖. นางสาว ก. ทีปลักษณ์ ระวังเหตุ	กรรมการ
๑๗. นายสมบัติ ประสงค์สุข	กรรมการ
๑๘. นางสาวอัญชลี บวดขุนทด	กรรมการ
๑๙. นางสาวสุภาพร ย้อนโคกสูง	กรรมการ
๒๐. นางสาวนิภารัตน์ โคตะนนท์	กรรมการ
๒๑. นางสาวพิจิตรา เปี้ยธัญญา	กรรมการ
๒๒. นางสาวทิพย์มนต์ ไยเกษ	กรรมการ
๒๓. นายพัลลภ ตั้งตระกูลทรัพย์	กรรมการ
๒๔. นายพิรุฑธ นิลชื่น	กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ สโรช แก้วมณี	กรรมการและเลขานุการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงษ์ธร คงมัน	กรรมการและเลขานุการ
๒๗. นางสาววัชรภรณ์ ศรีพลน้อย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๓ สาขาประมง

๑. คณบดีคณะประมง	ที่ปรึกษา
๒. ศาสตราจารย์อุทัยรัตน์ ณ นคร	ที่ปรึกษา
๓. ศาสตราจารย์สุภาวดี พุ่มพวง	ที่ปรึกษา
๔. ศาสตราจารย์เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์	ที่ปรึกษา
๕. รองศาสตราจารย์วันชัย วรวิฒนเมธีกุล	ประธานกรรมการ
๖. หัวหน้าศูนย์บริหารงานวิจัยและสนับสนุนวิชาการ	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์อรพินท์ จินตสถาพร	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์วรার্থ เทพาหุดี	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมธี แก้วเนิน	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิราภรณ์ ไตรศักดิ์	กรรมการ

๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา มุสิกสินธร	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประพันธ์ศักดิ์ ศิริษะภูมิ	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาทิติ ฉัตรชัยพันธ์	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กังสดาลย์ บุญปราบ	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุกรณ์ บุตรสันต์	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาย วรรณะนันท์	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพงศ์ ด้วงดี	กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธันสพงษ์ โภควนิช	กรรมการและเลขานุการ
๑๙. นายถิรวัฒน์ รวยรัตน์	กรรมการ
๒๐. นายวชิระ ใจงาม	กรรมการ
๒๑. นางสาวกาญจนา ทองเครือ	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๒. นางสาวสมิตตรา สุพรรณนอก	ผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๔ สาขาสัตวแพทยศาสตร์

๑. คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะสัตวแพทยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ กัญจน์ แก้วมงคล	ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ อลงกต บุญสูงเนิน	รองประธานกรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ เกரியงไกร วิฑูรเสถียร	กรรมการ
๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง ขนิษฐา เพชรอุดมสินสุข	กรรมการ
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง ปัจฉิมา สิทธิสาร	กรรมการ
๘. สัตวแพทย์หญิง ปริญญาทิพย์ วงศ์ไทย	กรรมการ
๙. นางสาวญาติา หาญปัญญาพิชิต	กรรมการและเลขานุการ
๑๐. นางสาววิศรา มารยาท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๑. ว่าที่ร้อยตรีหญิง จรัสพิมพ์ ทรงประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๕ สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์

๑. คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒. หัวหน้าภาควิชาส่งเสริมและนิเทศศาสตร์เกษตร	ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์สาวิตรี รังสิภัทร์	ที่ปรึกษา
๔. รองศาสตราจารย์จำนงรักษ์ อุดมเศรษฐ์	ที่ปรึกษา
๕. รองศาสตราจารย์พัฒนา สุขประเสริฐ	ที่ปรึกษา
๖. รองศาสตราจารย์ทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ	ที่ปรึกษา
๗. รองศาสตราจารย์สิริพันธุ์ จุลกรังคะ	ที่ปรึกษา
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ	ที่ปรึกษา
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขจีจิรัส ภิรมย์ธรรมศิริ	ที่ปรึกษา
๑๐. นางสาวศรัณยา เผือกผ่อง	ที่ปรึกษา
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพร เรียบร้อย คิม	ประธานกรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้องนุช ศิริวงศ์	รองประธานกรรมการ
๑๓. นางสาวนริศรา อินทะสิริ	รองประธานกรรมการ

๑๔. รองศาสตราจารย์พิชัย ทองดีเลิศ	กรรมการ
๑๕. รองศาสตราจารย์สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนามาศ ตวีวรรณกุล	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพัตรา ศรีสุวรรณ	กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธำนิษฐ์ คงศิลา	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรชาติ ศรีบุญเรือง	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริสุทธิ เฉลิมชัยวัฒน์	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจิตตา เรืองรัมย์	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำพร แจ่มผล	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานต์สุดา วันจันทร์	กรรมการ
๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร	กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งทิพย์ ลุยเลา	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชุตินา ชวลิตมณฑิเยียร	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลภา แต้มทอง	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีรานุช เลิศวัฒนารักษ์	กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิประภา รัตนติลล ญ ภูเก็ต	กรรมการ
๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทิพวรรณ ดวงปัญญา	กรรมการ
๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฤทัย เรืองธรรมสิงห์	กรรมการ
๓๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวิตรี พังงา	กรรมการ
๓๓. นางสาวชลลดา จูเจริญ	กรรมการ
๓๔. นางสาวเมตตา เร่งชวนชวย	กรรมการ
๓๕. นางปพิชญา จินตพิทักษ์สกุล	กรรมการ
๓๖. นายปรีดา สามงามยา	กรรมการ
๓๗. นางทิพากร ม่วงถึก	กรรมการ
๓๘. นางกรกฎ แพทย์หลักฟ้า	กรรมการ
๓๙. นายวิภูษณะ ศุภนคร	กรรมการ
๔๐. นางสาววสพร นิชรรัตน์	กรรมการ
๔๑. นางสุขกมล ปัญญาจันทร์	กรรมการ
๔๒. นางศรัญญา ศรีโยธิน	กรรมการ
๔๓. นางสาวทิวาพร มณีรัตน์ศุภร	กรรมการและเลขานุการ
๔๔. นางภิญญาพัชญ์ โทนหงส์ษา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๕. นางสาวจุฬาลักษณ์ บุตรพองดา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๖. นายศตพล ศิริบำรุงชาติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๗. นายเสถียร แสงแถวทิม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๘. นางสาวมณีนทร เดชแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๙. นางสาวกรรณิกา พุ่มสาหร่าย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๐. นายภคิษฐ์คมณ์ แสงตรีเพชรกล้า	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๑. นางสาวสวรรรญา แยมวันเพ็ง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๒. นายสหภาพ ศรีโท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐. กรรมการหมวดวิชาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

๑๐.๑ สาขาวิทยาศาสตร์

๑. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. รองศาสตราจารย์อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต	ประธานกรรมการ
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพบุลย์ เงินมีศรี	รองประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์อิงอร กิมกง	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์สุดสวาสดี ดวงศรีไสย์	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์ปิยะดา จันทวงศ์	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์ศิริกาญจนา ทองมี	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐสมน เพชรแสง	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันทิพย์ โตแก้ว	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธันวารวรรณ ต้วทองอยู่	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์โชติกา หยกทองวัฒนา	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฤทธิ มีสัตย์	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลัดดา แต่งวัฒนานุกูล	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มีนา เลา	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วชิรญาณ ธงอาสา	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์เทพ ประจักษ์ศร	กรรมการ
๑๗. นางสาวสุนทรี คุ่มไพโรจน์	กรรมการ
๑๘. นายรัฐพันธ์ ตรงวิวัฒน์	กรรมการ
๑๙. นางสาวพรทิพย์ บุญมงามงคล	กรรมการและเลขานุการ
๒๐. นายสาธิต ประเสริฐมานะกิจ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๑. นายวรพงศ์ สิงห์ชาติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๒ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

๑. ศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ	ประธานกรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์นวลวรรณ ทวยเจริญ	รองประธานกรรมการ
๓. ศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช	กรรมการ
๔. ศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์วีรชัย ชัยวรพฤกษ์	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์กฤษณะ ไวยมัย	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์วรตกร วัฒนพานิช	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์อรทัย จงประทีป	กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์	กรรมการ
๑๑. รองศาสตราจารย์จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตรัทศน์ ฝึกเจริญผล	กรรมการ
๑๓. นายพลิชฐ์ สืบสูงศักดิ์	กรรมการ
๑๔. นางสาวสุทัตตา พาหุมนันโต	กรรมการและเลขานุการ
๑๕. นางสาวขวัญกมล บุญโปร่ง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๖. นางดารณี ยงยีน

๑๗. นางสาวพัชรียา บุบผาชาติ

กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๓ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุทัยวรรณ วิทย์เกียรติ

๒. รองศาสตราจารย์รุ่งรอง ยกสำน

๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนิษฐา วัชรภรณ์

๔. รองศาสตราจารย์กิติญา วงษ์คำจันทร์ โอราน

๕. รองศาสตราจารย์เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล

๖. รองศาสตราจารย์ปรารณา ปรารณาดี

๗. รองศาสตราจารย์สุดสาย ตริวานิช

๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทานตะวัน พิทักษ์

๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิมล เจริญสิทธิ์

๑๐. นางสาวณัฐทิณี บำบัดสรรพโรค

๑๑. นางสาวพรรณภักดิ์ พรหมเพ็ญ

๑๒. นายนิรันดร์ ลือมรสิริ

๑๓. นายนิพนธ์ ลิมสงวน

๑๔. นายประมวล ทรายทอง

๑๕. นางสาวสุพินดา วินิจฉัย

๑๖. นางสาวอุตมลักษณ์ สุขอัตตะ

๑๗. รองศาสตราจารย์ประกิต สุขไย

๑๘. นางดวงสมร นามกระโทก

๑๙. นางสาวอัญชญา ชมภูแก้ว

ประธานกรรมการ

รองประธานกรรมการ

รองประธานกรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๔ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กอบศักดิ์ วันธงไชย

๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ

๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาพิศ ดิลกสัมพันธ์

๔. นายณัฐวัฒน์ คลังทรัพย์

๕. รองศาสตราจารย์ฐิติมา รุ่งรัตนอุบล

๖. รองศาสตราจารย์วัฒนชัย ตาเสน

๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิศร์ ปัทมพิฑูร

๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิตยา เมี้ยนมิตร

๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นฤมล แก้วจำปา

๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร

๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรเทพ เหมือนพงษ์

๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาสินี วรชนะนันท์

๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วาทีณี สนวนภา

๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวตรี พิสุทธิพิเชษฐ

๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรอนงค์ ผิววิล

ที่ปรึกษา

ที่ปรึกษา

ประธานกรรมการ

รองประธานกรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

กรรมการ

๑๖. นางสาวแอน กำภู ณ อยุธยา	กรรมการ
๑๗. นายกฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ	กรรมการ
๑๘. นายปวีร์ คล่องเวสสะ	กรรมการ
๑๙. นายวรงค์ สุขเสวต	กรรมการ
๒๐. นายสุธี จรรยาสุทวิวงศ์	กรรมการ
๒๑. นางสาวมณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม	กรรมการ
๒๒. นายปิยวัฒน์ ดิลกสัมพันธ์	กรรมการ
๒๓. นายขรรค์ชัย ประสานัย	กรรมการ
๒๔. นางสาวละอองดาว เถาว์พิมาย	กรรมการและเลขานุการ
๒๕. นางวารภรณ์ ลำไย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๖. นางสาวจินตลา กลิ่นหวล	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๗. นางสาวศิริภัสสร ชมเชย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๑. กรรมการหมวดวิชาการมนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศึกษาศาสตร์

๑๑.๑ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ

๑. คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะบริหารธุรกิจ	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาภรณ์ อธิปัญญากุล	ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พลวัฒน์ เลิศกุลวัฒน์	รองประธานกรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์คุณณี เกศวายุธ	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์วุฒิไกร งามศิริจิตต์	กรรมการ
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิวิธสาข์ สุขชาติ	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อารีญา โอปิเตียกวุ	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ คุ้มฉนวนเจริญชัย	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรพงษ์ บัญศิริธรรมชัย	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธงชัย ศรีวรรณนะ	กรรมการ
๑๒. นายพัฒน์ พิสิษฐเกษม	กรรมการ
๑๓. นางสาวณิธิชา ธรรมธนากุล	กรรมการ
๑๔. นางสาวณัฐธินิชา ฉายรัตน์	กรรมการ
๑๕. นางสาวยุวลักษณ์ เศรษฐบุณยสร้าง	กรรมการ
๑๖. นายพรชัย ศุภวิทิตพัฒนา	กรรมการ
๑๗. นางสาวลลิตา จันทรวงศ์ไพศาล หงษ์ตระกูล	กรรมการ
๑๘. นางสาวจุมทิพย์ เสนีย์รัตน์ประยูร	กรรมการ
๑๙. นางสาวกรรณิกา มิตรปล้อง	กรรมการ
๒๐. นายภคพงศ์ พวงศรี	กรรมการและเลขานุการ
๒๑. นางสาวภีรตา รัตนสิงห์กุล	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๒. นางสาวรัตติยา สาระโท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๓. นางขวัญเมือง สุจริต	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๔. นางเบญจมาศ แยมพลอย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕. นางสาวรุจาภา แวนแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญเลิศ อุทยานิก	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐิกา เพ็งลี	กรรมการ
๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูเบศร์ นภัทรพิทยาธร	กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ เอื้องโชคชัย	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงชัย อักษรคิด	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิกร สุมาลี	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรเดช ศรีทา	กรรมการ
๒๙. นางสาวภัทรา วายจตุ	กรรมการ
๓๐. นางสาวธนนันท์ ธนารัชตะภูมิ	กรรมการ
๓๑. นางสาวสรียา โชติธรรม	กรรมการ
๓๒. นางสาวอุษณี ลลิตผसान	กรรมการ
๓๓. นายวีรภัทร์ สุขศิริ	กรรมการ
๓๔. นางสาวฐาปณีย์ แสงสว่าง	กรรมการ
๓๕. นางสาวสุวรรณา ปรมาพจน์	กรรมการและเลขานุการ
๓๖. นายณรงค์ศักดิ์ หวังรัตนปราณี	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๗. นายธีระภรณ์ ศิริสุวรรณ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๘. นายฐิติพงศ์ ศุภวัฒน์ภิญโญ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๙. นางสาวธัญพร อินทรอุทก	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๐. นางสาวปิยพร แก้วภิรมย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๑.๓ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

๑. คณบดีคณะสังคมศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะมนุษยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมขวัญ สิงห์วี	ประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์นันทนัย ประสานนาม	รองประธานกรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุวิทย์ แก้วสุวรรณ	รองประธานกรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์กังสดาล เขาวังวัฒนกุล	กรรมการ
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวีณ์ บุณนาค	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพสิน กิตติเสรีชัย	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เปรมฤดี เพ็ชรกุล	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาณิภา สุขสม	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พูนศักดิ์ ไม้โศกทรัพย์	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตตินาถ เรขาลิลิต	กรรมการ
๑๓. นางสาวเกวลิน ศิลพิพัฒน์	กรรมการ
๑๔. นางสาวเอื้ออนุช ถนอมวงษ์	กรรมการ
๑๕. นางสาวอภิชา ชูติพงศ์พิสิฐ	กรรมการ
๑๖. นางสาวพรทิพย์ ลิ่มหะพันธ์	กรรมการ
๑๗. นางสาวมนัญญา นิลพันธ์	กรรมการ
๑๘. นางสาวพรพรรณ เหมะพันธุ์	กรรมการ
๑๙. นางสาวพรรณรัตน์ ดิษฐ์เจริญ	กรรมการ

๒๐. นางสาวธีรพร ชื่นพี	กรรมการ
๒๑. นายชัยรัตน์ วงศ์กิจรุ่งเรือง	กรรมการ
๒๒. นายวรพจน์ สืบประเสริฐกุล	กรรมการ
๒๓. นางสาวสุชาดา สกลกิจรุ่งเรือง	กรรมการ
๒๔. นางสาวปรีห์ปราง ถนนอมศักดิ์ชัย	กรรมการ
๒๕. นายเอกลักษณ์ ไชยภูมิ	กรรมการ
๒๖. นางสาวนิภาพร อินคะณีย์	กรรมการ
๒๗. นางสาวอำไพพงษ์ ทวีธัญลักษณ์	กรรมการ
๒๘. นางสาวปิยะรัตน์ คล้ายแย้ม	กรรมการ
๒๙. นางสาวอมรรัตน์ หวังแก้ว	กรรมการ
๓๐. นางสาวสาวิตรี ศรีประพัตติ	กรรมการ
๓๑. นายสรศักดิ์ มงคลสมบูรณ์	กรรมการ
๓๒. นายภานุพงศ์ ปิยาพันธ์	กรรมการ
๓๓. นายสุรพันธ์ แสนเลิศ	กรรมการ
๓๔. นางสาวนันทยา อาภานันท์	กรรมการ
๓๕. นายธวัชพงศ์ หาเรือนโชค	กรรมการ
๓๖. นางสาวนภัสสร รักรวนิต	กรรมการ
๓๗. นางสาวอัญชญา ต่อมแสง	กรรมการ
๓๘. นางสาวเกวริน ยุทธโกศา	กรรมการ
๓๙. นายวรรณโชค เทียนคำ	กรรมการ
๔๐. ว่าที่ร้อยตรี เกษม พุ่มซ้อน	กรรมการ
๔๑. นายชิษณุพงศ์ ต้นบัวคลี	กรรมการ
๔๒. นางสาวจริยา สุพรรณ	กรรมการ
๔๓. นางสาวดารารัตน์ ชิมพัฒน์วงษ์	กรรมการ
๔๔. นางสาวนันทนุช อุดมละมุล	กรรมการ
๔๕. นางสาวผาณิตา ชัยดิเรก	กรรมการ
๔๖. นางสาววิภาดา รัตนติลก ณ ภูเก็ต	กรรมการ
๔๗. นางสาวสายทิพย์ เหล่าทองมีสกุล	กรรมการและเลขานุการ
๔๘. นางสาวพิชญา สารภิรมย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๙. นางสาววิศนี พ่วงประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๐. นางสาวแก้วตา ต่อมแสง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๑. นางสาวรสिता กลางประพันธ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๒. นางสาวศรীরรณ บุญประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ จัดการเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ กำหนดหน้าที่ รับผิดชอบและแนวทางการคัดเลือกผลงานที่นำมาเสนอ ประสานงานกับคณะกรรมการหมวดวิชาการ และรับนโยบาย จากคณะกรรมการอำนวยการ มาปฏิบัติให้บรรลุตามวัตถุประสงค์

คณะกรรมการฝ่ายบริการจัดการประชุมทางวิชาการ

๑. รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์	ที่ปรึกษา
๒. ผู้อำนวยการสำนักบริหารการศึกษาศึกษา	ที่ปรึกษา
๓. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานกรรมการ
๔. ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์	ประธานกรรมการร่วม
๕. ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมและฝึกอบรม	ประธานกรรมการร่วม
๖. รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหาร สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	รองประธานกรรมการ
๗. ประธานฝ่ายเลขานุการ (นางอัจฉราวรรณ คล่องข้าง)	กรรมการ
๘. ประธานฝ่ายสารสนเทศ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์)	กรรมการ
๙. ประธานฝ่ายสถานที่ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์)	กรรมการ
๑๐. ประธานฝ่ายประชาสัมพันธ์ (นางผกามาศ ธนพัฒน์พงศ์)	กรรมการ
๑๑. ประธานฝ่ายโสตทัศนอุปกรณ์ (นายวีระพันธ์ สังขมาลย์)	กรรมการ
๑๒. ประธานฝ่ายจัดการจราจรและรักษาความปลอดภัย (นายต้น นิลมาติ)	กรรมการ
๑๓. ประธานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ (รักษาการแทนรองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)	กรรมการ
๑๔. ประธานฝ่ายการเงิน (นางสมพิศ ชยันโต)	กรรมการ
๑๕. รองประธานฝ่ายการเงิน (นางนวรรรัตน์ สุวรรณเลิศ)	กรรมการ
๑๖. ประธานฝ่ายประเมินผล (รองผู้อำนวยการฝ่ายประสานงานวิจัยและประเมินผล สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)	กรรมการ
๑๗. ประธานฝ่ายพิธีการ (นางสาวพิชชาอรุณี สิริชีวะเกษร)	กรรมการ
๑๘. รองศาสตราจารย์เมธิณี วงศ์วานิช รัชมภาภรณ์	กรรมการ
๑๙. นายปฏิภักดิ์ ปัญญาพูนตระกูล	กรรมการและเลขานุการ
๒๐. นางสาวชนิกานต์ ศักดาพิทักษ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๑. นายอนุชิต วรรณปัญญา	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๒. นายพลากร คำแก้ว	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๓. นายชโนดม ชุ่มก	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๔. นายกิตติศักดิ์ แสงอรุณ	ผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕. นางสาวสุภิดา เข้ากระจำง	ผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ประสานงาน ดำเนินการ และอำนวยความสะดวกการจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐ เพื่อให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงและเป็นไปด้วยความเรียบร้อย โดยประธานแต่ละฝ่ายนั้นสามารถพิจารณาคัดเลือก และแต่งตั้งกรรมการภายในฝ่ายได้เอง หากต้องการจัดทำเป็นคำสั่งเพิ่มเติม ให้แต่งตั้งโดยส่วนงานในสังกัด

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไปโดยมีวาระ ๑ ปี

ประกาศ ณ วันที่ ๓ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๖๔



(นายจรงค์ วัชรินทร์รัตน์)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ประกาศสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๐ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุตามวัตถุประสงค์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงให้แต่งตั้งคณะกรรมการฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ ดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|-------------------------------|
| ๑. ผู้รักษาการแทนรองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย
สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ประธานคณะกรรมการ |
| ๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรีณัฏฐ์ ศศิธรนการแก้ว | คณะกรรมการ |
| ๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตตินาถ เรขาลิลิต | คณะกรรมการ |
| ๔. นางสาวทักษิญา วัชรสารทรัพย์ | คณะกรรมการ |
| ๕. นายภานนท์ คุ่มสุภา | คณะกรรมการ |
| ๖. นายศุภพงษ์ ตันเงิน | คณะกรรมการ |
| ๗. นางสาวทิสยา ทิศเสถียร | คณะกรรมการ |
| ๘. นางสาวรติกร สมิตไมตรี | คณะกรรมการ |
| ๙. นางสาววนิดา รัตตมณี | คณะกรรมการ |
| ๑๐. นายวิหวัศ ยุทธโกศา | คณะกรรมการ |
| ๑๑. นายวิโรตม์ เอื้อยะตะกุล | คณะกรรมการ |
| ๑๒. นายสิงห์อำพล จันทร์วิเศษ | คณะกรรมการ |
| ๑๓. นางสาวมณฑา ปานทิม | คณะกรรมการ |
| ๑๔. นางสาวพิชชาอรุณี สิริชีวะเกษร | คณะกรรมการและเลขานุการ |
| ๑๕. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป | คณะกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๑๖. นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์ | คณะกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้ มีหน้าที่ ดำเนินการผลิตสื่อวิชาการ อาทิ สื่อประชาสัมพันธ์งานประชุมวิชาการ สื่อข้อกำหนดต่างๆ จัดทำกำหนดการ หนังสือสูจิบัตร หนังสือรวบรวมบทคัดย่อ (Book of Abstracts) หนังสือตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็ม (E-Proceedings) การประสานงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ รวมไปถึงการผลิตสื่อมัลติมีเดียและการถ่ายทอดสดงานประชุม โดยประสานงานกับฝ่ายวิชาการและฝ่ายต่างๆ ให้ดำเนินงานไปด้วยความเรียบร้อยและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๑๓ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๖๔

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรภา มหากาญจนกุล)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

