KU KASETSART UNIVERSITY

Proceedings of The 59th KU Annual Conference

การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59
วันที่ 10-12 มีนาคม 2564

"New Normal KASETSART for Sustainable Development Goals (SDGs)"

"เกษตรศาสตร์วิถีใหม่ เพื่อเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน"

Proceedings No. 2

SCIENCE TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT

สาขาวิทยาศาสตร์
Science

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
Engineering and Architecture

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
Agro-Industry

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
Natural Resources and Environment

Cisco webex

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 59 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of the 59th Kasetsart University Annual Conference

10-12 มีนาคม 2564 (March 10-12, 2021)

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)

การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59

The Proceedings of the 59th Kasetsart University Annual Conference

วันที่ 10-12 มีนาคม 2564 (March 10-12, 2021)

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ครั้งที่ 1 เดือน พฤษภาคม 2564

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์เป็นของ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0-2579-5548

ISBN (e-book) (ชุด): 978-616-278-617-4

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ได้จัดการประชุมวิชาการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกปี โดยในปี พ.ศ. 2564 ได้จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 59 ในรูปแบบออนไลน์ ระหว่างวันที่ 10-12 มีนาคม พ.ศ. 2564 ภายใต้หัวข้อ “New Normal KASETSART for Sustainable Development Goals (SDGs)” เพื่อมุ่งส่งเสริมให้คณาจารย์ นักวิจัย และนักวิชาการสาขาต่างๆ นำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ และความชำนาญทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ซึ่งจะนำไปสู่ความร่วมมือทางการวิจัยและยังเปิดโอกาสให้นิสิต นักศึกษาได้แสดงผลงานทางวิชาการ เพื่อถ่ายทอดและเผยแพร่สู่สาธารณชน อันจะนำมาซึ่งความกินดี อยู่ดี และการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

การนำเสนอผลงานวิชาการประกอบด้วยภาคบรรยายจำนวน 225 เรื่อง และภาคโปสเตอร์จำนวน 160 เรื่อง รวม 385 เรื่อง แบ่งออกเป็น 12 สาขา ได้แก่ สาขาพืช สาขาสัตว์ สาขาสัตวแพทยศาสตร์ สาขาประมง สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สาขาศึกษาศาสตร์ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ โดยได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็มใน E-Proceedings จำนวน 290 เรื่อง

เอกสารฉบับนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยเรื่องเต็ม ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ เล่มที่ 2 ประกอบด้วย **สาขาวิทยาศาสตร์** จำนวน 12 เรื่อง **สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์** จำนวน 64 เรื่อง **สาขาอุตสาหกรรมเกษตร** จำนวน 44 เรื่อง และ**สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม** จำนวน 14 เรื่อง ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 59 ขอขอบคุณ คณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิต นักศึกษา ที่ได้ร่วมนำเสนอผลงานวิจัย และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



(ดร. จงรัก วัชรินทร์รัตน์)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประธานคณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 59

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 59
ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
และการได้ตีพิมพ์ลงในเอกสารบทคัดย่อ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: kuannualconf@gmail.com

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

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

สารบัญ

สาขาวิทยาศาสตร์ (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
1	วท.พว.1/P18	การประเมินความไม่แน่นอนของเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงสำหรับการวัด PM 2.5 ลัทธสิทธิ์ เสือโต, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ	2
2	วท.พว.8/P72	Electrochemical reaction for direct synthesis of amides from aldehydes Tanawat Rerkrachaneekorn, Theeranon Tankam, Mongkol Sukwattanasinitt, Sumrit Wacharasindhu	7
3	วท.พว.9/P81	ผลกระทบของปรากฏการณ์เอนโซ่ต่อความแปรปรวนของปริมาณฝนในภาคตะวันออกของประเทศไทย พิมพ์วลัญช์ ปริยกร, ปริชาติ เวชยนต์, ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์	15
4	วท.พว.10/P84	Carbon tetrabromide mediated desulfurization of dithiocarbamate salt for the synthesis of isothiocyanates Saharat Techapanalai, Mongkol Sukwattanasinitt, Sumrit Wacharasindhu	24
5	วท.พว.11/P87	Synthesis of 5-phenoxy primaquine as an anti-malarial agent Somruedee Jansongsaeng, Nitipol Srimongkolpithak, Jutharat Pengon, Sumalee Kamchonwongpaisan, Tanatorn Khotavivattana	31
6	วท.พว.13/P142	Characterization of cytolysin A and green fluorescent protein-inserted Outer Membrane Vesicles isolated from different strains of *Escherichia coli* Sunisa Hankan, Kornkrich Rattanapan, Thanapong Sanongkhun, Anunya Sarpthipratana, Wanatchaporn Arunmanee	40
7	วท.พว.14/P143	ผลกระทบของความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อต่อผลลัพธ์ของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ พรรษธร เหลืองวิไลย์, วันชัย มีศิริ, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ	47
8	วท.พว.15/P144	Increasing surface charges of colicin N to prevent protein aggregation induced under various stress conditions Methawee Duangkaew, Wanatchaporn Arunmanee	53

สาขาวิทยาศาสตร์ (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
9	วท.พว.18/P147	Identification and detection of protein markers to differentiate between Siamese crocodile (*Crocodylus siamensis*) body fluids Chayanon Charoenkittitum, Win Chaeychomsri, Sasina Tripob, Jindawan Siruntawineti	60
10	วท.พว.20/P165	Enhanced accumulation of glycogen and lipid under nitrogen deprivation and continuous light in the cyanobacteria *Arthrospira platensis* Nat-Anong Mudtham, Winai Charunchaipipat, Chanchanok Duangsri, Authen Promariya, Khomson Satchasataporn, Sarawan Kaewmongkol, Suchanit Ngamkala, Wuttinun Raksajit	66
11	วท.พว.23/P179	ความหลากชนิดและการแพร่กระจายของตัวอ่อนแมลงปอ (Odonata: Anisoptera) ในบ่อน้ำ จังหวัดนครนายกและนครปฐม ชูศักดิ์ สุขเกษม, บุญเสฐียร บุญสูง	76
12	วท.พว.24/P189	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสำหรับกระบวนการผลิตที่มีการแจกแจงปัวซงที่มีศูนย์มาก เนรัญชรา เกตุมี, อุมาพร สุขบท	85

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
1	สถ.วศ.1/O6	ผลกระทบของข้อบกพร่องที่มีต่อพฤติกรรมและกำลังยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต ทศพล ทองอ่อน, จักรพันธ์ เทือกต๊ะ	93
2	สถ.วศ.15/O27	การเปรียบเทียบปริมาณวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมในการออกแบบอาคารเตี้ยเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวระหว่างอ้างอิงตามกฎกระทรวงและตามมาตรฐาน มยผ. ตัวใหม่ สำหรับบริเวณอำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี อดิเทพ อิศรางกูร ณ อยุธยา, ทรงพล จารุวิศิษฏ์	102
3	สถ.วศ.39/O91	การสำรวจวางหมุดควบคุมทางราบด้วยเทคโนโลยี RTN สำหรับงานวิศวกรรมก่อสร้าง ชยณัฐ คีรีนารถ, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์	110

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
4	สถ.วศ.27/O51	การปรับปรุงแบบจำลองความสูงเชิงเลขเอสอาร์ทีเอ็มด้วยข้อมูลการสำรวจ สุธีร์ โชว์ทะเล, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์	117
5	สถ.วศ.70/O222	การศึกษาการรับแรงอัดของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต ปิยะภัทร สีลายงค์, กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ	125
6	สถ.วศ.86/O259	การประมาณค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อยในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว จังหวัดสุพรรณบุรี โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล กีรติยา นวลจันทร์, วีระเกษตร สวนผกา	133
7	สถ.วศ.2/O9	การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหิ้งสะท้อนแสงโค้งต่อปริมาณแสงธรรมชาติในร้านขายยา ภัควันต์ อัจฉริยนนท์, นวลวรรณ ทวยเจริญ	142
8	สถ.วศ.78/O230	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสีของแสงและสีของพื้นผิวห้องต่อการตอบสนองทางอารมณ์: กรณีศึกษาห้องประเสริฐ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมย์สิฎา ใจเที่ยง, นวลวรรณ ทวยเจริญ	152
9	สถ.วศ.4/O13	The comparison of anidolic daylighting system characteristic between two transmission glazing of office building Linza Ma, Nuanwan Tuaycharoen	160
10	สถ.วศ.5/O14	Effect of inclination of multiple curved light shelves on daylighting in University Classroom Rado Sy, Nuanwan Tuaycharoen	170
11	สถ.วศ.59/O156	การชี้บ่งอันตรายกระบวนการและการปฏิบัติงานของระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนตโดยการประยุกต์ใช้เทคนิค 4M1E และ FMEA พิมชนิดา ศรีอภัย, ชนินทร์ ปัญจพรผล, ธนาวดี เดชะคุปต์	181
12	สถ.วศ.49/O113	การปรับปรุงกระบวนการการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่นบาง ด้วยวิธีซิกซ์ ซิกม่า นิกร ก่ำทอง, วันวิสาข์ สกลภาพ	190
13	สถ.วศ.72/O224	การจำลองการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) โดยใช้เทคนิคพัลส์กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง ณพล ศรีเกษมสุนทร, กันต์พจน์ วงศ์หนองเตย, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	199

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
14	สถ.วศ.13/O25	สมบัติการลดทอนรังสีแกมมา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้ร่วมกับบิสมัสคลอไรด์ จริยาภรณ์ รักษ์แก้ว, เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง, ธีระศักดิ์ หมากผิน, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา	207
15	สถ.วศ.14/O26	ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง ผสมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วมระหว่างนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารเอชพีคิวเอ็ม เพิ่มพล เสียงดัง, รัฐโรจน์ อัครธนกุลกิตติ์, เอกชัย วิมลมาลา, ธีระศักดิ์ หมากผิน, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	215
16	สถ.วศ.34/O81	การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์งานยกคว่ำเครื่องดับเพลิงแบบยกหิ้วชนิดผงเคมีแห้ง เพื่อตรวจเช็คคุณภาพผงเคมีภายในถัง เพลินศักดิ์ อุบลหล้า, เพ็ญสุดา พันฤทธิ์ดำ	224
17	สถ.วศ.42/O95	การออกแบบและปรับปรุงสถานีงานเพื่อลดปัญหาด้านการยศาสตร์ในกระบวนการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม มณีรัตน์ จันทร์สนิท, รมิดายุ อยู่สุข, จเร เลิศสุดวิชัย	232
18	สถ.วศ.55/O131	การปรับปรุงตำแหน่งการวางชิ้นส่วนเครื่องพิมพ์ในคลังสินค้า บงกช เศวตไพศาลกุล, คเณศ พันธุ์สวาสดิ์	241
19	สถ.วศ.28/O54	การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม ภานุวัฒน์ รัตนอุดม, วีระเกษตร สวนผกา, วัชรินทร์ วิทยกุล	251
20	สถ.วศ.47/O111	การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์โดยการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราสำหรับวัสดุงานทาง ติณห์ สกุลเวช, ก่อโชค จันทวรางกูร, วีระเกษตร สวนผกา	261
21	สถ.วศ.51/O116	การศึกษาการใช้เศษพลาสติกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ รัชพล พฤฒิพฤกษ์, ก่อโชค จันทวรางกูร, วีระเกษตร สวนผกา	270
22	สถ.วศ.29/O55	คุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง นิติภูมิ ทองรัตน์, ก่อโชค จันทวรางกูร, วีระเกษตร สวนผกา	278
23	สถ.วศ.23/O41	การศึกษาวางโครงการเบื้องต้น กรณีศึกษาโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ ทศพร วิชัยพฤกษ์, วัชรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ	286
24	สถ.วศ.76/O228	การศึกษาความแปรปรวนของการจำลองสถานการณ์น้ำในอ่างเก็บน้ำ กรณีศึกษา เขื่อนขุนด่านปราการชล ณัฐวดี แย้มสาย, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี	296

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
25	สถ.วศ.19/O38	ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้าง กรณีศึกษา สำนักก่อสร้างทาง กรมทางหลวงชนบท ก่อเกียรติ ศานติชาติศักดิ์, วัชรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ	305
26	สถ.วศ.21/O40	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบริหารโครงการก่อสร้างในหน่วยงานราชการ อรรถชัย ขำเจริญ, วัชรินทร์ วิทยกุล	313
27	สถ.วศ.48/O112	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธานของการประปานครหลวง เอกสยาม ทองด้วง, ดีบุญ เมธากุลชาติ, วัชรินทร์ วิทยกุล	320
28	สถ.วศ.40/O93	ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง ธิปก ฝอยทอง, วัชรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ	327
29	สถ.วศ.56/O133	การศึกษาปัญหาด้านความปลอดภัยของการติดตั้งนั่งร้านในโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม ณัฐวดี บุริบัน, ก่อโชค จันทวรางกูร, ชาญณรงค์ ไวยพจน์	336
30	สถ.วศ.73/O225	แนวทางการประเมินความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูป สถิตคุณ พุ่มพวง, ฆนิศา รุ่งแจ้ง	344
31	สถ.วศ.87/O260	การศึกษาปัญหาที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่ ภูริณัฐ ดวงจักร์, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ชวเลข วณิชเวทิน	352
32	สถ.วศ.7/O16	แขนกลร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ชลัมพล เวสารัชประเสริฐ, ไพโรจน์ ทองประศรี	360
33	สถ.วศ.17/O32	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบตำแหน่งติดตั้งและขนาดของสายดินที่มีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารีเหนือหัวของรถไฟฟ้า พรภัส เกิดประดับ, เด่นชัย วรเศวต	369
34	สถ.วศ.71/O223	หุ่นยนต์เพื่อการศึกษาโดยใช้เทคนิคการเขียนโปรแกรมแบบจับต้องได้โดยการอ่านสเปกตรัมของแสง วัชรินทร์ ขาวบุบผา, ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว	377
35	สถ.วศ.43/O96	การประยุกต์ใช้แบบจำลองชลศาสตร์หนึ่งมิติสำหรับคาดการณ์และเตือนภัยน้ำหลาก: กรณีพื้นที่ศึกษาเทศบาลเมืองน่าน ธัญชนก เลิศพิพัฒน์กุล, ดนย์ปภพ มะณี	385

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
36	สถ.วศ.9/O20	การประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์ของการก่อสร้างทางเชื่อมผืนป่าบนทางหลวงหมายเลข 304 พรพิมล สุดจันทึก, สุชีลา พลเรือง	394
37	สถ.วศ.10/O21	การวิเคราะห์หาปริมาณไมโครพลาสติกของเสื้อผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ถูกปล่อยจากกระบวนการซักผ้า สาธิตา แก้วเขียว, สุชีลา พลเรือง	403
38	สถ.วศ.20/O39	การประเมินก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโรงควบคุมคุณภาพน้ำขนาดใหญ่ในพื้นที่กรุงเทพมหานครจำนวน 8 โรง ธิดารัตน์ มาละวรรณา, สุชีลา พลเรือง	412
39	สถ.วศ.12/O24	การสลายตัวของสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ธนกฤต บรรเจิดธีรกุล, สัญญา สิริวิทยาปกรณ์	421
40	สถ.วศ.74/O226	การเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟมโพลีสไตรีนภายใต้สภาวะแวดล้อม พิชญุตม์ บัวทอง, สุชีลา พลเรือง, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์	429
41	สถ.วศ.84/O253	การปรับแก้ความเอนเอียงปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM5 ด้วยเทคนิค Quantile Mapping สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำคลองสวนหมาก อภิสิทธิ์ นุชอิ้ง, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร์, เกศวรา สิทธิโชค	438
42	สถ.วศ.6/O15	การจับความรู้ฝังลึกของบริษัทรับเหมาก่อสร้าง: กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างโรงพยาบาล ชลกร ชลสิทธิ์, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	449
43	สถ.วศ.53/O127	ตัวชี้วัดเพื่อประเมินความสอดคล้องในการพัฒนาโครงการสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง นิชาภา จันต๊ะมา, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	457
44	สถ.วศ.46/O97	โครงสร้างพื้นฐานที่ส่งผลต่อความอยู่เย็นเป็นสุขของชุมชน: กรณีศึกษาเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว เฉลิมเกียรติ ทองเนื้อห้า, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	465
45	สถ.วศ.62/O175	การวิเคราะห์ปัจจัยความยั่งยืนในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยโดยใช้ Fuzzy AHP วสุธร สอดศุข, ฆนิศา รุ่งแจ้ง	475
46	สถ.วศ.63/O176	การวิเคราะห์ปัจจัยความยั่งยืนในการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย โดยใช้ Fuzzy AHP คนาพล แก้วแดง, ฆนิศา รุ่งแจ้ง	483

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
47	สถ.วศ.8/O18	การวิเคราะห์การเลือกรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างเรือข้ามฟากกับสะพานคนเดิน กรณีศึกษา: ท่าพระจันทร์-ท่าวังหลัง ธิติวุฒิ อดิสร, ชวเลข วณิชเวทิน, เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล	491
48	สถ.วศ.16/O28	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของบังใบล้อและพลังงานความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งของขบวนรถโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทยที่ให้บริการในเส้นทาง กรุงเทพฯ-เชียงใหม่ กรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และ กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี กวิน หลิมจานนท์, วิชัย ศิวะโกศิษฐ, สาโรช ละอองศิริวงศ์, จีรภัทร์ เตชะกุลชัยนันต์	500
49	สถ.วศ.68/O221	การพัฒนาเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัลสำหรับการรถไฟแห่งประเทศไทย สุรสิทธิ์ คงแก้ว, วิชัย ศิวะโกศิษฐ, เอกชัย พัฒนะประยูรวงศ์, ชานนท์ บุญรัศมี, พิชญุตม์ อมรรัชยาวิจารณ์, วนัสวีร์ ทองประเสิรฐ	508
50	สถ.วศ.35/O82	ศึกษามูลค่าการลงทุนในการจัดหาระบบรถไฟสำหรับรถไฟฟ้าในเมืองในประเทศไทย วิชิต จิตรพินิจ, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	515
51	สถ.วศ.58/O137	การศึกษาวิธีการยืดอายุการใช้งานของพื้นล้อรถไฟแอร์พอร์ตเรล ลิ้งก์ โดยการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถทุกวัน เจษฎา อุปโยคิน, กฤษดนัย พีระพลชัยกุล, อัสนี หวังสถิตไพศาล, อิสรา สร้างเกียรติขจร, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	523
52	สถ.วศ.18/O36	การพัฒนาเครื่องมือวัดความสึกหรอของหัวราง BS100A วิลาวัลย์ ลีลาประทักษ์, กรรมมันต์ ชูประเสริฐ, วิชัย ศิวะโกศิษฐ	530
53	สถ.วศ.83/O248	เวลาเข้าสู่สมดุลของระบบปรับความดันไฮดรอลิกร่วมกับวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง อาทิตย์ แสงงาม, ปิโยรส จิระวัฒนา	538
54	สถ.วศ.82/O247	การจำลองการอพยพหนีไฟในอาคารโรงงานผลิตถุงลมนิรภัย วัฒนาพร กลิ่นบัว, สุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ	546
55	สถ.วศ.61/O170	การศึกษาเครื่องสกัดคาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤตแบบเคลื่อนย้ายได้ พีรศุษม์ ไชยศรีมณีพรรณ, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	555
56	สถ.วศ.81/O245	การทดสอบอัลกอริทึมสำหรับการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ กันต์พจน์ วงศ์หนองเตย, ณพล ศรีเกษมสุนทร, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	564

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
57	สถ.วศ.66/O219	การทดสอบประสิทธิภาพการซึมน้ำของกระเปาะเซรามิกส์เพื่อใช้ในระบบการให้น้ำแก่พืช ปิยะรส มาลีเจริญ, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	572

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
1	สถ.วศ.41/P63	การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในขวดแก้วโดยใช้แมชชีนวิชั่น ชินภัทธ์ ทรงสินสุนทร, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย	581
2	สถ.วศ.44/P64	การติดตามและการหยิบวัตถุที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงด้วยระบบกล้องบนแขนหุ่นยนต์ ประภัทร์ ตรีเอนกพินิจ, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย	588
3	สถ.วศ.37/P58	การตรวจจับและการรู้จำอักขระด้วยแสงของป้ายรถบรรทุกชิ้นงานด้วยการเรียนรู้เชิงลึก ชัยชนะ สระโสม, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย	596
4	สถ.วศ.25/P22	การประมาณค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท อรุณิญา โชคลาภ, สัญญา สิริวิทยาปกรณ์	604
5	สถ.วศ.32/P42	การปรับปรุงเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลและอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา วิสุทธิ์ ชาติวันชัย, ณัฐ มาแจ้ง	612
6	สถ.วศ.33/P43	การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งน้ำทางระบบท่อของอ่างเก็บน้ำประแสร์ เขมนันท์ แสงนวล, จิระวัฒน์ กณะสุต	621
7	สถ.วศ.88/P173	การตรวจจับและนับจำนวนวัตถุบนสายพานลำเลียงโดยใช้ประสาทเทียม รุ่งโรจน์ กรุงเกษม, จันทนา จันทราพรชัย	629

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
1	อก.66/O231	ผลของการรมโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.) สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ, จตุรภัทร วาฤทธิ์, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร, ศรัลยภัคร์ ชำนาญ, พิสุทธิ์ กลิ่นขจร, จักรพงษ์ พิมพ์พิมล	638
2	อก.24/O67	คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันเมล็ดปาล์ม น้ำมันมะพร้าวและผลของการใช้กลีเซอริลโมโนสเตียเรทต่อคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของน้ำมัน รัชชดา ลตวรรณ์, ปาริฉัตร หงสประภาส	646
3	อก.16/O60	Ultrasound-assisted extraction for the recovery of proteins from duckweed (*Wolffia globosa*) using response surface methodology Natchaya Duangjarus, Weerachai Chaiworapuek, Pitiporn Ritthiruangdej, Sudathip Sae-tan, Suvimol Charoensiddhi	655
4	อก.40/O117	Isolation and identification of potential emerging foodborne bacteria in raw chicken and pork ground meats Than Than Htay, Sudsai Trevanich	663
5	อก.44/O134	Possible household washing procedure to reduce nitrate content in fresh vegetables from supermarket Karnjana Vachpanich, Kanithaporn Vangnai, Pariyanuj Chulaka, Kullanart Tongkhao	671
6	อก.17/O62	Effect of *Lactobacillus brevis* TISTR 860 and *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 on gamma-aminobutyric acid content in fermented rice flour: feasibility study Chonnipa Chittrakhani, Sirichai Songsermpong, Sudsai Trevanich, Rashidah Sukor	677
7	อก.7/O47	การยอมรับและความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อหน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมชนิดถอดเปลี่ยนได้ พรรณภัทร พรหมเพ็ญ, ธัญกร กรุงทองจันทร์, กันต์กนิษฐ์ ไทยงามศิลป์, ศิรินันท์ แก่นทอง, จิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์	685
8	อก.46/O135	การสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของสีผิวของขนมปังระหว่างการอบ ธนชาติ มนต์ภัสสร, วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, มาศอุบล ทองงาม	694

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
9	อก.52/O163	Physical characteristics and stability of vegetable oil emulsions containing different oil phases compared with commercial milk cream Tirayus Jaiyai, Kullanart Tongkhao, Masubon Thongngam, Utai Klinkesorn	702
10	อก.28/O71	Effect of processing cycles on properties of polyethylene terephthalate Rizka Try Gustina, Amporn Sane, Piyawanee Jariyasakoolroj, Busarin Chongcharoenyanon	710
11	อก.34/O78	Comparing the effectiveness of incipient wetness and vacuum impregnation techniques for incorporating potassium permanganate into zeolite 5A Ranbaranage Pramuda Manjith Silva, Amporn Sanea	718
12	อก.8/O50	การศึกษากลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียลเพื่อการออกแบบกลยุทธ์ทางการตลาดผลิตภัณฑ์นม ดิวกาญจน์ กันตะโสพัตร์, อัจฉรา เกษสุวรรณ	727
13	อก.18/O63	การแบ่งกลุ่มพลังหญิงเพื่อการออกแบบการตลาดประสบการณ์การซื้ออาหารผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซ ศุภิสรา เอี่ยมเอิบ, อัจฉรา เกษสุวรรณ	736
14	อก.19/O64	วิถีชีวิต คุณค่า และความตั้งใจซื้อข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ นนทพัทธ์ เลิศวรไกร, รวิพิมพ์ ฉวีสุข, อัจฉรา เกษสุวรรณ	745
15	อก.42/O122	The impact of lifestyle, value proposition, and brand origin toward purchase intention of Indonesian matcha latte among Muslim consumers in Bangkok metropolitan Fitri Nur Jannati, Ajchara Kessuvan, Agung Putra Pamungkas	754

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
1	อก.1/P3	คุณสมบัติของสีผสมอาหารจากดอกคำฝอย ปฏิมาภรณ์ พลแสน, อรุษา เชาวนลิขิต, พรภัสสร จุฬาลักษณานุกูล	764
2	อก.3/P195	Overall migration of water-hyacinth and areca leaf plates for single-use food containers Busarin Chongcharoenyanon, Atiya Prateep Na Thalang, Nutthida Chalodech, Titaphorn Tansiri	772
3	อก.9/P24	Nutritional values, physical properties and antioxidant property of okara flour in comparison to wheat flour and rice flour Wasinee Somrit, Uthaiwan Suttisansanee, Chaowanee Chupeerach, Rungrat Chamchan, Chanakan Khemthong, Nattira On-nom	780
4	อก.10/P25	Investigation of optimized extraction conditions of total anthocyanin content from *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib Kachakot Yosphan, Varittha Sritalahareuthai, Nattira On-nom, Chaowanee Chupeerach, Piya Temviriyanukul, Dalad Siriwan, Uthaiwan Suttisansanee	789
5	อก.12/P26	Effect of natural ingredients on the reduction of residual nitrite in cooked cured pork during storage Patapee Sengboontan, Pollacha Pooput, Arati Koger, Kanithaporn Vangnai	796
6	อก.13/P27	Effects of coconut oil addition on properties of drum-dried pre-gelatinized Chainat 1 rice flour Tidarat Norsuwan, Parichat Hongsprabhas, Masubon Thongngam	804
7	อก.15/P30	ผลของการแทนที่เนยถั่วบางส่วนด้วยเนยกระบกต่อคุณภาพของคุกกี้เนยถั่ว สรญา เอกพินิจกูล, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, อุศมา สุนทรนฤรังสี	813
8	อก.20/P32	ขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยที่มีส่วนผสมของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เมล็ดทานตะวัน และนิวทริชั่นแนลยีสต์ สุภาพร สิงหา, โมไนย์ ทรัพย์สินกีรติ, อริสรา พุทธกิจ, ปิ่นมณี ขวัญเมือง	821

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
9	อก.21/P33	การศึกษาความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคสำหรับบริการจัดส่งสินค้าเกษตรและอาหารแบบควบคุมอุณหภูมิ สุดา แก้วรุณคำ, ปรารถนา ปรารถนาดี, จุมพล วรสายัณห์	830
10	อก.22/P35	การจำแนกสินค้าคงคลังด้วยการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ K-Means เพื่อการบริหารจัดการสินค้าคงคลังผลิตภัณฑ์สมุนไพรของร้านขายยา สุวนันท์ วิมลรัชต์มโนรม, ปรารถนา ปรารถนาดี	838
11	อก.23/P37	การพยากรณ์ราคาซื้อไก่สดแช่แข็ง รดา กิตติอุดมเดช, ปรารถนา ปรารถนาดี	846
12	อก.25/P38	Influence of sodium chloride in marinated pork on quality of palm oil after deep-fat frying Thanida Muangnoi, Kanithaporn Vangnai	855
13	อก.29/P41	อิทธิพลของสายพันธุ์ยีสต์ต่อคุณภาพของเบียร์ข้าวสาลีเสริมมอลต์ข้าวไรซ์เบอร์รี่ เจนณรงค์ ประหยัด, จิรายุ เปรมปรี, มณฑกานต์ หลีน้อย, มงคล เพ็ญสายใจ	864
14	อก.31/P45	การเปรียบเทียบการทำแห้งด้วยการควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมและการตากแดดและการเปรียบเทียบการเก็บรักษาในระบบปิดและยุ้งฉางต่อคุณภาพข้าวเปลือกพันธุ์ทับทิมชุมแพ จารุวรรณ จำเนียรพล, พิณทิพย์ รัมภกาภรณ์, วีรชัย ชัยวรพฤกษ์, ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล, รติพร มั่นพรหม, สุดาทิพย์ แซ่ตั้น	872
15	อก.38/P62	Effect of hydro-cooling and room-cooling on the quality of melon during storage Prawesh Pokharel, Sasitorn Tongchitpakdee, Wannee Jirapakkul	881
16	อก.41/P70	การสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติสำหรับผู้หญิงอายุ 50 ปีขึ้นไป ลาภิน หงษ์คำดี, หทัยรัตน์ ริมคีรี, สุพนิดา วินิจฉัย	890
17	อก.43/P71	Influence of thermal processing conditions on acrylamide formation in model system and mitigation strategy Kusumal Hirunwong, Kanithaporn Vangnai	898
18	อก.45/P76	Effect of glucose, monovalent salts and phenolic compounds on acrylamide formation in asparagine/glucose model system Napasson Chaisri, Kanithaporn Vangnai	906

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
19	อก.51/P196	ผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อลักษณะทางกายภาพและคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของมะพร้าวน้ำหอมผง ยศพล แก้วคำภา, วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, กิติพงษ์ รัตนาภรณ์, กฤษกมล ณ จอม	913
20	อก.56/P97	การศึกษาผลของสภาวะการย้อมต่อสมบัติการย้อมสีผ้าเรยอนด้วยสีย้อมสกัดจากเปลือกตะบูนขาว กนกวรรณ กุสลางกูรวัฒน์, เบญจมาศ คล้ายเครือญาติ, ธนิกา หุตะกมล, เพ็ญวิสาข์ พิสิฏฐศักดิ์	921
21	อก.59/P100	การสำรวจพฤติกรรมของผู้บริโภคมังสวิรัติในเขตกรุงเทพมหานครและทัศนคติของผู้บริโภคต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช ชนิกานต์ กล่อมฤกษ์, ปารเมศ วรเศยานนท์, ศิวาพร โอเจริญ	929
22	อก.62/P104	การพัฒนาปรับปรุงคุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัสไส้กรอกปลาทูน่าด้วยเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิก ทัชชกร ทองคล้ำ, ทานตะวัน พิรักษ์	938
23	อก.64/P109	Study of sugarcane juice concentration as fermentation substrate on levan production by *Bacillus subtilis* TISTR 001 Chanyanuch Noidee, Boontiwa Ninchan	947
24	อก.65/P152	Examination of natural starter cultures used for vinegar fermentation by using PCR-DGGE technique Kullanart Tongkhao, Khemmapas Treesuwan, Kanokwan Yod-in, Jutamas Klinsoda, Sirinan Shompoosang	955
25	อก.68/P154	Influence of lecithin on physicochemical properties and stability of sunflower seed milk Sudthipa Ruayboonsong, Thepkunya Harnsilawat	964
26	อก.72/P168	การพัฒนาจีวรพระจากผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมจากแก่นขนุน พชรพล ศิริสุนทร, ขนิษฐา วัชราภรณ์, กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล, ดวงรัตน์ หิรัญญะสิริ	972
27	อก.74/P178	Production of ethanol, bio-electricity and hydrogen gas in yeast fuel cell Apichetch Kumnubpha, Chaiwat Bandaiphet	979
28	อก.75/P186	การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมโดยใช้แผนการทดลองแบบผสมในผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกเสริมใยอาหาร ปฐมาภรณ์ เกตุเพชร, สุธีรา วัฒนกุล	988

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
29	อก.76/P188	การพัฒนาเอกซ์ทรูเดตจากข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนครเสริมโปรตีนผงจิ้งหรีดด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ สุภาษิต ชูกลิ่น, ธีระพงค์ หมวดศรี, อดิเรก ชัยฤกษ์, อทิตติยา ชูสุวรรณ์, ธวัชชัย หนูทอง, ณัฐภรณ์ ทองอินทร์	996

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
1	ทส.22/O240	การแปรผันตามฤดูกาลของลักษณะทางสรีรวิทยาบางประการของหญ้าทะเลใบมะกรูด *Halophila ovalis* (R. Brown) J.D. Hooker ธราวิทญ์ วุธิรักษ์, พิมพ์ชนก บัวเพชร	1005
2	ทส.5/O108	ความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่างและความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมในพื้นที่สันทราย อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร โสรดา ตรีชนะ, ดอกรัก มารอด, สราวุธ สังข์แก้ว	1013
3	ทส.24/O246	รูปแบบกิจกรรมและการซ้อนทับในเชิงเวลาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ พนิตสุภา บั้งทอง, นรเศรษฐ์ เขียวศรี, มนันยา พลาอาด, รองลาภ สุขมาสรวง	1021
4	ทส.18/O236	การประเมินผลของมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ และการเพิ่มพื้นที่ป่าต่อลักษณะทางอุทกวิทยา บริเวณลุ่มน้ำพระธาตุ จังหวัดตาก สหภาพ พันธ์ปัญญากรกุล, ยุทธพงษ์ คีรีมังคละ, วีนัส ต่วนเครือ, อนิศรา เพ็ญสุข ติ๊บแก้ว	1029
5	ทส.28/O278	การศึกษาธรณีนิเวศของแหล่งพุน้ำร้อนเพื่อการจัดการท่องเที่ยวเชิงส่งเสริมสุขภาพในจังหวัดแม่ฮ่องสอน กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ, พงศกร จิวาภรณ์คุปต์, อาณัติ เฮงเจริญ	1038
6	ทส.4/O106	The utilization of high quality bamboo charcoal as an adsorbent for improving the quality of undistilled whisky Khin Moe Moe Htet, Pongsak Hengniran	1046
7	ทส.15/O178	ผลของรูปแบบการให้ปุ๋ยต่อการคงเหลือของธาตุอาหารในดินและผลผลิตของน้ำยางพารา ประพันธ์ สุวรรณมามูล, ณัฐฐา แสงนรินทร์ เหมจินดา	1054

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Oral Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
8	ทส.20/O238	การพัฒนาสถานีตรวจวัด และแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนสำหรับบริหารจัดการพื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจ กรณีศึกษาสวนมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ตำบลพันชาลี อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก ธิติพงศ์ บุญตัน, ภาสุระ ศรีสุระ, กฤตพร เอี่ยมสอิ้ง, ธนวัฒน์ เมฆนิล, วรฤทธิ์ ประเสริฐ	1064
9	ทส.10/O136	การประยุกต์ใช้ LINE Chatbot ในการบริการข้อมูลนักท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติ ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล, กมลพรรณ ศรีกัน	1072

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Poster Presentation)			
ลำดับ	**รหัสผลงาน**	**ชื่อผลงาน**	**หน้า**
1	ทส.12/P90	การฟื้นฟูทางชีวภาพของดินปนเปื้อนน้ำมันผสมโดยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับวิธีอื่น ปิยาภรณ์ สมสมัคร, กิตติศักดิ์ จีนาคม, ชัยทัต เชื้อไพบูลย์	1081
2	ทส.2/P34	การบำบัดเมโทรนิดาโซลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรี ศศิธร จิตติมา, ชลอ จารุสุทธิรักษ์	1089
3	ทส.14/P101	การบำบัดออกซีเตตราซัยคลินในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน ณิชกุล ชาติทรัพยสิทธิ, ชลอ จารุสุทธิรักษ์	1098
4	ทส.1/P19	การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ด ธนพร กองสัมฤทธิ์, จีมา ศรลัมพ์	1106
5	ทส.16/P193	การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางเพื่อการขนส่งที่ยั่งยืนของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตระการ พรมสำลี, ทัศนีย์ เจียรพสุอนันต์	1116

สาขาวิทยาศาสตร์
Subject: Science

ภาคโปสเตอร์
Poster Presentation

การประเมินความไม่แน่นอนของเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงสำหรับการวัด PM 2.5

Uncertainty evaluation of light scattering dust meter for PM 2.5 measurement

ลัทธสิทธิ์ เสือโต[a,b], วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ[a,*]

Rattasit Suanto[a,b], Wiwat Wongkokua[a,*]

[a]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[a]Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]National Institute of Metrology (Thailand), Pathumthani 12120, Thailand.

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

บทคัดย่อ

เมื่อเร็วๆ นี้ ประเทศไทยประสบปัญหา มีฝุ่นขนาดเล็ก PM 2.5 ในอากาศปริมาณมาก ในระดับที่มีผลกระทบต่อสุขภาพ เครื่องวัดฝุ่นเป็นสิ่งสำคัญต่อการตัดสินใจในการดำเนินชีวิตประจำวันของประชาชน เช่น การเดินทาง หรือ การซื้อเครื่องฟอกอากาศ งานวิจัยนี้ศึกษาความถูกต้องของเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงสำหรับการวัดปริมาณ PM 2.5 เนื่องจากเป็นเครื่องวัดฝุ่นที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง จัดหาได้ง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามวิธีการวัดแบบใช้หลักการกระเจิงของแสงเป็นวิธีการวัดโดยอ้อม การเทียบมาตรฐานสามารถทำได้โดยการวัดฝุ่นด้วยเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงเทียบกับวิธีการมาตรฐานของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษโดยวิธีการวัดพร้อมกัน การวัดทำในช่วงเดือนธันวาคม 2563 เพื่อนำไปใช้ประเมินความไม่แน่นอนสำหรับการวัดปริมาณ PM 2.5 ของเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสง โดยผลการวัดมีความถูกต้องพอสมควร มีค่าไม่แน่นอนมาตรฐาน 9.9 $\mu g\ m^{-3}$ ซึ่งสามารถประเมินเป็นความไม่แน่นอนขยายได้เป็น 20 $\mu g\ m^{-3}$ ดังนั้นในการใช้งานเครื่องวัดฝุ่นชนิดนี้ ควรพิจารณาความถูกต้องและความไม่แน่นอนของผลการวัดด้วย

คำสำคัญ: ฝุ่นในอากาศ, มลพิษทางอากาศ, อนุภาคสสาร 2.5

Abstract

In recent years, Thailand encounters a problem of PM 2.5 fine dust to a degree that affects health. Dust meters are important for people's daily life decisions such as traveling or deciding to buy an air purifier. This research investigated the accuracy of the scattering dust meter for PM 2.5 measurement as it is popular, easy to buy and inexpensive. However, the optical scattering method is an indirect method of measurement. Calibration can be performed by comparing the measurement results of the scattering dust meter with the standard method of air quality monitoring station of the Pollution Control Department by the simultaneous measurement method. The measurements have been carried out in December 2020 for uncertainty evaluation of the light scattering dust meters for PM 2.5 measurement. The measurement results were fairly accurate with a standard uncertainty of 9.9 $\mu g\ m^{-3}$ which can be estimated as an expanded uncertainty of 20 $\mu g\ m^{-3}$. Hence, to utilize this type of dust meter, the accuracy and uncertainty of the measurement result should be considered.

Keywords: air pollution, dust in the air, particulate matters 2.5

คำนำ

อนุภาคฝุ่น (particulate matter: PM) เป็นทั้งของแข็งและของเหลวที่มีขนาดเล็ก ซึ่งไม่ใช่สารที่มีโมเลกุลเดียว สามารถลอยอยู่ในอากาศตั้งแต่ 2s ไปจนถึงหลายๆ เดือน อนุภาคฝุ่นแบ่งเป็นประเภท ตามขนาดของอนุภาค ดังนี้ ประเภทแรก อนุภาคฝุ่นรวมทั้งหมด (Total suspended particulate: TSP) หมายถึง อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 100 μm เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ ประเภทที่สอง อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 μm (PM 10) และประเภทที่สาม อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 μm (PM 2.5) (ศิวพันธุ์, 2556) ปัจจุบันประเทศไทย มีอนุภาคฝุ่นในอากาศปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากไอเสียของรถยนต์ที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรที่เหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวของเกษตรกร อนุภาคฝุ่นเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนโดยเฉพาะ PM 2.5

เครื่องวัดฝุ่นแบบพกพาเป็นเครื่องมือวัดที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากปริมาณฝุ่นในอากาศมีผลต่อการตัดสินใจในการดำเนินชีวิตประจำวัน เช่น การเดินทาง การออกกำลังกายกลางแจ้ง หรือ การซื้อเครื่องฟอกอากาศ วิธีการตรวจวัดปริมาณฝุ่นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับการยอมรับและใช้อย่างแพร่หลายในสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษทางอากาศ คือการตรวจวัดอนุภาคฝุ่นด้วยหลักการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก ซึ่งนำไปสู่วิธีการวัดมาตรฐาน และระบบการตรวจวัดอนุภาคฝุ่นที่สมมูลกับวิธีมาตรฐาน มีอยู่สองวิธี ได้แก่ วิธีอนุภาคเบต้า และ Tapered Element Oscillation Microbalance (TEOM) (วีรนุช, 2556) ในการวัดอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีที่กล่าวมานั้น ต้องใช้ทรัพยากรในกระบวนการวัดเป็นจำนวนมากและใช้ระยะเวลาในการวัดนาน

ในปัจจุบันมีเซ็นเซอร์สำหรับการวัดอนุภาคฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงที่สามารถวัดค่าอนุภาคฝุ่นได้อย่างรวดเร็ว สามารถพกพาได้ จึงทำให้เป็นที่สนใจและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสง ไม่ใช่วิธีการวัดที่เป็นวิธีการมาตรฐาน หรือ วิธีที่สมมูลกับวิธีมาตรฐาน จึงทำ ให้เกิดความสงสัยในผลการวัดค่าอนุภาคฝุ่นว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด และสามารถนำผลการวัดไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมหรือไม่

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องวัดฝุ่นที่นำมาทดสอบเป็น รุ่น PMS3003 ของบริษัท Plantower ใช้หลักการกระเจิงของแสงเลเซอร์ในการวิเคราะห์ปริมาณและขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง เมื่ออนุภาคฝุ่นเคลื่อนที่ผ่าน ลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิด จะเกิดการกระเจิงของแสงขึ้นในมุมต่าง ๆ ตามขนาดและปริมาณของอนุภาคฝุ่นที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ โดยมุมของกระเจิงของแสงจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค (ตวงสิทธิ์, 2564) ซึ่งความเข้มแสงที่เกิดจากการกระเจิงของแสงเลเซอร์ที่มุมต่าง ๆ จะถูกวัดด้วยตัวรับรู้ ซึ่งสามารถวัดฝุ่นที่มีขนาด 0.3 ถึง 10 μm มีความละเอียด 1 $\mu g\, m^{-3}$ โดยในตัวรับรู้มีอุปกรณ์ควบคุมซึ่งให้สัญญาณขาออกผ่านพอร์ตอนุกรม (Rx/Tx) และถูกคำนวณเป็นขนาดและปริมาณของอนุภาคฝุ่น เพื่อส่งข้อมูลไปแสดงผลและเก็บข้อมูลผ่านไมโครคอนโทรเลอร์ (Arduino) แสดงเป็นแผนภาพได้ดัง Fig. 1 (อรวรรณ และคณะ, 2554)

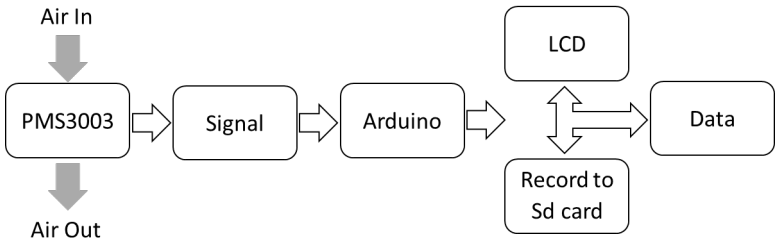


Fig. 1 Functional diagram of PMS3003

วิธีการวัดฝุ่นที่นำมาใช้เป็นวิธีมาตรฐานคือวิธีการวัดแบบรังสีเบต้า เป็นวิธีที่ใช้หลักการดูดกลืนของรังสีเบต้าโดยอนุภาคฝุ่นที่ได้จากการไหลของอากาศ คืออากาศจึงถูกลำเลียงมาจากภายนอกเครื่องวัดฝุ่นแบบรังสีเบต้าผ่านริบบิ้นที่ทำจากวัสดุกรองบางชนิดเพื่อให้อนุภาคฝุ่นถูกรวบรวมไว้ โดยมีแหล่งกำเนิดรังสีเบต้าสองแหล่งวางไว้ก่อนและหลังจากบริเวณที่กระแสอากาศไหลผ่านริบบิ้นโดยปล่อยอนุภาคฝุ่นไว้ และมีเครื่องตรวจจับความเข้มของรังสีเบต้าที่ด้านตรงข้ามของริบบิ้นโดยหันหน้าไปทางแหล่งกำเนิดรังสีเบต้า ความเข้มของรังสีเบต้าที่วัดโดยเครื่องวัดความเข้มที่วางไว้ก่อนปล่อยอนุภาคฝุ่น จะนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องที่อยู่หลังจากปล่อยอนุภาคฝุ่น จึงสามารถคำนวณค่าอนุภาคฝุ่นในอากาศได้ แสดงเป็นแผนภาพได้ดัง Fig. 2

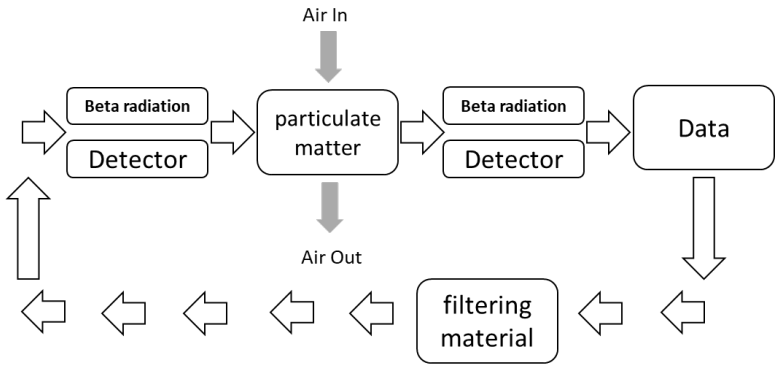


Fig. 2 Functional diagram of beta radiation dust meter

การประเมินความถูกต้องของเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงสำหรับการวัด PM 2.5 ในรูปแบบของการเทียบมาตฐาน ใช้วิธีการวัดพร้อมกันโดยใช้อากาศที่มีฝุ่นเป็นตัวกลาง เครื่องมือวัดที่ใช้เป็นมาตฐานในการเปรียบเทียบคือเครื่องวัดฝุ่นแบบรังสีเบต้า ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษ รหัสสถานีคือ st 20 ชื่อสถานี มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต ตั้งอยู่ที่ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี โดยข้อมูลของผลการวัด นั้นสามารถดูจากบันทึกในรายงานของกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ (รายงานสถานการณ์และคุณภาพอากาศประเทศไทย) และ เครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงสำหรับการวัด PM 2.5 ที่นำมาวัดเปรียบเทียบคือ Plantower รุ่น PMS3003 วัดที่บริเวณ หมู่บ้านธัญลักษณ์ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี โดยจัดเก็บข้อมูลของผลการวัดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ (Arduino) บันทึกลงในการ์ด SD ระยะห่างกันระหว่างเครื่องมือวัดทั้งสองประมาณ 6 km โดยทำการวัดฝุ่น PM 2.5 ในช่วงเดือนธันวาคม 2563 เพื่อนำไปใช้ประเมินความถูกต้อง สำหรับการวัดปริมาณ PM 2.5 ของเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด ใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น โดยกำหนดให้ค่า PM 2.5 ที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงเป็นตัวแปรอิสระ และค่า PM 2.5 ที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นแบบรังสีเบต้าเป็นตัวแปรตาม โดยเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากการบันทึกในเวลาเดียวกัน เมื่อนำผลการวัดมาเขียนกราฟและหาความสัมพันธ์ จะได้สมการถดถอยเชิงเส้นเป็น y = 2.717+0.716x และ R^2 = 0.636 แสดงใน Fig. 3 โดยมีช่วงของผลการวัดที่ได้จากเครื่องวัดฝุ่นแบบรังสีเบต้าอยู่ที่ 4 μm^{-3} ถึง 83 μm^{-3} และช่วงของผลการวัดที่ได้จากเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงอยู่ที่ 11 μm^{-3} ถึง 131 μm^{-3} สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้เท่ากับ 0.797 และความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ 9.9 μm^{-3} นั่นคือที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95 % ผลการวัดมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 20 μm^{-3} ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Equation 1 (Morrison, 2014)

$$U(y) = t_{\alpha/2,n-2} s_{y,x} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}} \quad (1)$$

เมื่อ $t_{\alpha/2,n-2}$ คือตัวประกอบครอบคลุมที่สอดคล้องกับการแจกแจงแบบ t, n คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการเทียบมาตรฐาน, $n-2$ คือองศาเสรี และ $s_{y,x}$ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $y(x)$

จากการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสง พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น สามารถใช้วัดปริมาณฝุ่น PM 2.5 ได้ถูกต้องพอสมควร แต่ผลการวัดมีความไม่แน่นอนค่อนข้างสูง ดังนั้นการนำเครื่องวัดฝุ่นชนิดนี้ไปใช้งานหรือนำผลการวัดไปใช้อ้างอิง ควรพิจารณาวัตถุประสงค์ของการวัด เช่น ความถูกต้องของผลการวัดที่ต้องการว่าเพียงพอหรือไม่ และควรคำนึงถึงความไม่แน่นอนของผลการวัดประกอบด้วย

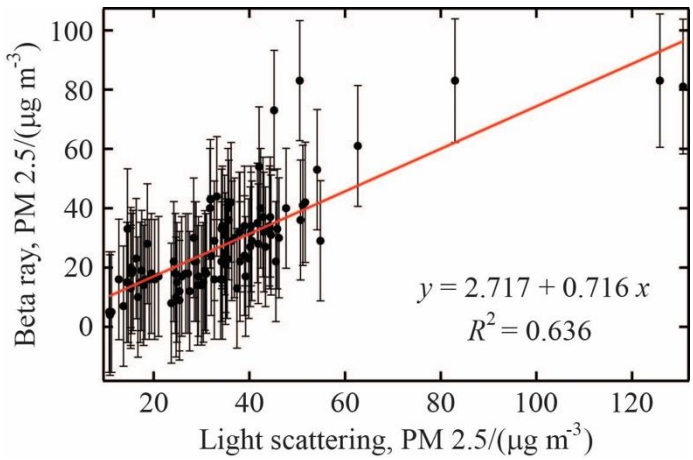


Fig. 3 Calibration curve of PM 2.5 measurement results between light scattering and beta ray methods

สรุป

เครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงสามารถใช้ในการวัดฝุ่น PM 2.5 ได้ถูกต้องพอสมควร การประเมินความไม่แน่นอนของการวัดฝุ่น PM 2.5 สามารถทำได้จากการเทียบมาตรฐาน โดยวิธีการวัดพร้อมกันกับเครื่องวัดฝุ่นแบบรังสีเบต้า ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษ จากผลการเทียบมาตรฐานพบว่าความไม่แน่นอนจากการวัดฝุ่น PM 2.5 ด้วยเครื่องวัดฝุ่นแบบการกระเจิงของแสงมีค่าเท่ากับ 20 μm^{-3} ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% การนำเครื่องวัดฝุ่นชนิดนี้ไปใช้งานจึงควรพิจารณาถึงความถูกต้องของผลการวัดที่ต้องการ และควรคำนึงถึงความไม่แน่นอนของผลการวัดด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยและการนำเสนอผลงาน จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยมาตรวิทยาและฟิสิกส์ของอุปกรณ์ (MPiR) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

ตวงสิทธิ์ วิมุกตายน. เทคนิคการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สำหรับการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศภายในอาคาร (ฝุ่นละออง). สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข http://env.anamai.moph.go.th/download/DMKM/EHDPP/Tuangsit.pdf., 5 มกราคม 2564.

รายงานสถานการณ์และคุณภาพอากาศประเทศไทย. กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ. http://air4thai.pcd.go.th/., 5 มกราคม 2564.

วีรนุช ปุยภิรมย์ 2556. การศึกษาปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนจากการจราจรที่มีผลต่อสุขภาพของเด็กนักเรียน: กรณีศึกษาโรงเรียนในตำบลบางกระสอ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ศิวพันธุ์ ชูอินทร์ 2556. การเก็บตัวอย่างและตรวจวัดสารมลพิษทางอากาศ, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรวรรณ พลฤทธิ์, ณัฐฐกิตติ์ อานันท์สันติ, ณัฐวัตร เหล่าตระกูลงาม และนวลรัตน์ วัฒนา. 2554. ระบบตรวจวัดค่าฝุ่นละอองในอากาศบนอุปกรณ์สมาร์ทโฟน. Journal of Information Science and Technology 10: 1–9.

Morrison F.A. 2014. Obtaining uncertainty measures on slope and intercept of a least squares fit with Excel's LINEST. https://pages.mtu.edu/~fmorriso/cm3215/UncertaintySlopeInterceptOfLeast SquaresFit.pdf, 23 March 2021.

Electrochemical reaction for direct synthesis of amides from aldehydes

Tanawat Rerkrachaneekorn[a], Theeranon Tankam[a], Mongkol Sukwattanasinitt[a], Sumrit Wacharasindhu[a,b,*]

[a]Nanotec–CU Center of Excellence on Food and Agriculture, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

[b]Green Chemistry for Fine Chemical Productions STAR, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

*Corresponding author. E–mail address: sumrit.w@chula.ac.th

Abstract

Amide is an important building block which has been found in pharmaceuticals, natural products and polymers. One of the conventional methods to synthesize amide is the oxidative amidation from aldehydes and amines. However, such method involves the use of strong oxidizing agents. In this research, we have therefore developed a new method for the construction of an amide bond from an oxidative cross–coupling reaction between aldehydes and amines via electro–organic synthesis to avoid the use of toxic oxidizing agents. 4–Bromobenzaldehyde and morpholine were selected as a reaction model in our study. Various parameters of reaction such as solvent types, supporting electrolytes, electrodes and electrical currents were screened for the optimized condition. From the optimized study, our oxidative amidation could proceed using NaI as a mediator and an electrolyte in an undivided cell at room temperature for 3 hours providing the (4–bromophenyl)(morpholino)methanone in 78% yield. Furthermore, we could apply this process to perform oxidative amidation with two more aldehydes and morpholine to prepare amides in satisfactory yields.

Keywords: Amide, Electro–organic synthesis, Oxidative amidation, Undivided cell

Introduction

Amide is not only backbone of protein but it is also found in medical compounds and materials. The conventional methods for amide synthesis are condensation between carboxylic acids and amines under both acidic and thermal conditions (Porras et al., 2015). Therefore, activated carboxylic acid derivatives and coupling reagents are used in coupling between amines and carboxylic acids for amide construction (Dunetz et al., 2016). However, the use of those methods causes the production of waste and requires reagent in stoichiometric amount leading to poor atom economy. To overcome such problems, the non–conventional methods for amide synthesis using organoborans (Dine et al., 2015) and transition–metals (Lundberg et al. 2012) with carboxylic acids have been developed. Moreover, the carboxylic acid surrogates have been employed in amide preparation such as aminocarbonylations from alkenes or alkynes (Liu et al., 2018), dethioamidations from thioacids (Chen et al., 2011) and oxidative amidations from aryl halides, nitriles, aldoximes, ketones, alcohols and especially aldehydes (Figueiredo et al., 2016). Among them, the oxidative amidations for amide synthesis from aldehydes and amines have been widely studied and summarized in Fig. 2a. This process requires the use of transition–metals as oxidants (Goel et al., 2020) or peroxide species as non–metal oxidants (Deshidi et al., 2015). Furthermore, the photoredox processes which catalyzed by visible light and organic dyes or transition–metals (Deol et al. 2018) have been also reported. Although, oxidative amidations and photoredox processes are compatible with many functional groups, some processes have drawbacks such as using expensive or toxic metal/catalyst, inert reaction and long reaction time.

Currently, electro–organic synthesis is an environmentally synthetic tool which has widely used in the past decades. Such process can replace hazardous oxidants by electrons (Yan et al., 2017). With this benefit, electro–organic synthesis has been adopted especially in oxidation process by replacing the use of hazardous oxidants. In addition, the previous reports about such process have been demonstrated by using iodine as a mediator to decrease reaction potential and increase reaction selectivity (Liu et al., 2018). Based on previous work for oxidative amidations of aldehydes and amines mediated by iodine which was generated from iodide and peroxide reagent, we aim to apply the use of NaI as mediator for amide synthesis via electro–organic synthetic amidation process (Fig. 2b).

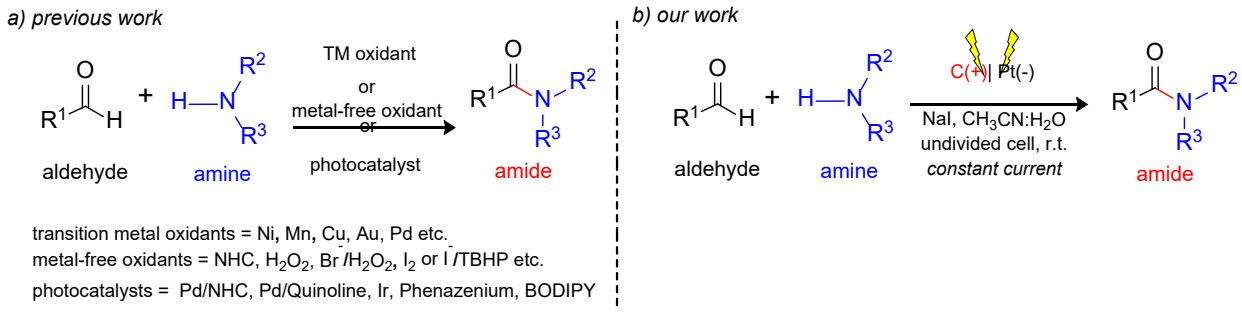


Fig 1 Oxidative amidation between aldehydes and amines: a) previous work and b) our work

Materials and Methods

Materials, equipment and instruments for synthesis and characterization

All chemicals and solvents were obtained from commercially available suppliers such as Sigma–Aldrich and TCI (Japan) and were used without further purification, unless otherwise stated. Power supply was purchased from Shenzhen Korad Technology CO., LTD. Graphite rod (Ø = 0.5 mm) and platinum plate (5×5×0.1 mm) were purchased from Minihua Store, China. Analytical thin layer chromatography (TLC) was performed with precoated Merck silica gel 60 F254 plates (0.25 mm for thick layer) and visualized at 254 nm using an ultraviolet lamp. Column chromatography was performed with Silicycle silica gel 60–200 μm (70–230 mesh). ^{1}H–NMR, ^{13}C–NMR and ^{19}F–NMR spectra were obtained with JEOL JNM–ECZ500R/S1 NMR spectrometers operating at 500 MHz for ^{1}H or 125 MHz for ^{13}C or 470 MHz for ^{19}F nuclei. High–resolution mass spectra (HRMS) were recorded using electron spray ionization (ESI) with a MicroTOF Bruker mass spectrometer.

The electrochemical reaction setup

The reaction was performed in an undivided cell using power supply as an energy source. The electrical wires were connected with anodic and cathodic electrodes which were immersed in a stirred solution. After that, the power supply was turned on to start the electrolytic process.

Optimization for oxidative amidation via electro–organic synthesis

A solution of 4–bromobenzaldehyde (1a), morpholine (2a) and electrolytes in solvents (4 mL) was prepared in an undivided cell. The reaction mixture was applied with constant current of 80 or 100 mA via anodic and cathodic electrodes from power supply. Then, the reaction mixture was stirred for 3 hours at room temperature. The reaction mixture was quenched with $Na_2S_2O_8$ (1 x 10 mL) and extracted with ethyl acetate (3 x 10 mL). The organic layer was dried over Na_2SO_4. After filtration and removal of the solvent under reduced pressure, the crude product was purified by silica gel column chromatography to afford 3aa product.

Substrate scope under optimization via electro–organic synthesis

A solution of 4–(trifluoromethyl)benzaldehyde (1b) or 4–methoxybenzaldehyde (1c) (1.0 eq, 0.3 mmol), morpholine (2a) (5.0 eq, 1.5 mmol) and sodium iodide (2.5 eq, 0.75 mmol) in co–solvent between acetonitrile and water with ratio 3:1 (4 mL) was prepared in an undivided cell. The reaction mixture was applied with constant current of 100 mA via graphite rod as anode and platinum plate as cathode from power supply. The reaction mixture was stirred for 3 hours at room temperature. The reaction mixture was quenched with $Na_2S_2O_8$ (x 10 mL) and extracted with ethyl acetate (3 x 10 mL). The organic layer was dried over Na_2SO_4. After filtration and removal of the solvent under reduced pressure, the crude product was purified by silica gel column chromatography to afford 3ba and 3ca products.

Characterization data

(4–Bromophenyl)(morpholino)methanone (3aa): 78% yield as a pale yellow solid: ^{1}H–NMR (500 MHz, $CDCl_3$): δ (ppm) 7.56 (d, J = 8.43 Hz, 2H), 7.29 (d, J = 8.43 Hz, 2H), 3.75–3.64 (m, 6H), 3.43 (br, 2H). ^{13}C–NMR (125 MHz, $CDCl_3$): δ (ppm) 169.5, 134.1, 131.9, 128.9, 124.3, 66.9, 48.3, 42.7. ESI–HRMS: m/z: 291.9934 $[M+Na]^+$ (calcd for $[C_{11}H_{12}BrNO_2Na]^+$ 291.9949).

Morpholino(4–(trifluoromethyl)phenyl)methanone (3ba): 74% yield as a white solid: ^{1}H–NMR (500 MHz, $CDCl_3$): δ (ppm) 7.68 (d, J = 7.97 Hz, 2H), 7.52 (d, J = 7.91 Hz, 2H), 3.79–3.62 (m, 6H), 3.39 (br, 2H). ^{13}C–NMR (125 MHz, $CDCl_3$): δ (ppm) 169.0, 139.0, 132.4, 132.1, 131.8, 131.6, 127.6, 127.0, 125.8, 124.9, 122.7, 120.5, 66.9, 48.2, 42.7. ^{19}F–NMR (470 MHz, $CDCl_3$): δ (ppm) –62.8. ESI–HRMS: m/z: 282.0718 $[M+Na]^+$ (calcd for $[C_{12}H_{12}F_3NO_2Na]^+$ 282.0717).

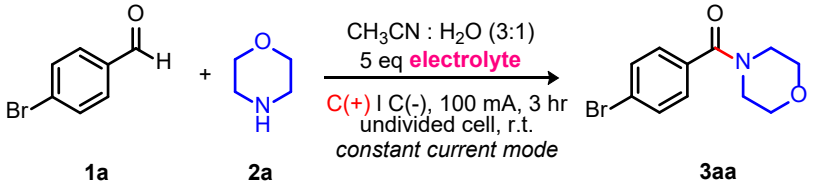
(4–Methoxyphenyl)(morpholino)methanone (3ca): 24% yield as a colorless liquid: ^{1}H–NMR (500 MHz, $CDCl_3$): δ (ppm) 7.38 (d, J = 8.46 Hz, 2H), 6.91 (d, J = 8.48 Hz, 2H), 3.83 (s, 3H), 3.69 (br, 8H). ^{13}C–NMR (125 MHz, $CDCl_3$): δ (ppm) 170.6, 161.0, 158.5, 129.3, 127.4, 113.9, 67.1, 55.5. ESI–HRMS: m/z: 244.0959 $[M+Na]^+$ (calcd for $[C_{12}H_{15}NO_3Na]^+$ 244.0949).

Results and Discussion

Optimization between 4–bromobenzaldehyde and morpholine

For our optimization, we selected 4–bromobenzaldehyde (1a) and morpholine (2a) as model substrates for studying various factors about oxidative amidation. First, we set the reaction by using co–solvent (3:1 of CH_3CN:H_2O), 5.0 eq of NaI, graphite rods as anode and cathode with a current of 100 mA for 3 hours at room temperature in an undivided cell. The screening of electrolytes was shown in Table 1. We could isolate 3aa in 67% yield using previously ascribed condition (Table 1, entry 1). Other iodide sources such as LiI, KI and TBAI were also investigated (Table 1, entries 2–4). While the smaller cationic size, Li^+, gave a good yield of 3aa in 70%, the bigger cationic size such as K^+ and TBA^+ gave poor yields of 3aa (42% and 22%, respectively) due to lower conductivity in reaction. However, we still selected NaI as electrolyte due to the cheaper price and wide availability. Moreover, the use of a bromide electrolyte was also investigated as shown in Table 1, entry 5. We found that the reaction employing this electrolyte did not proceed to generate 3aa product as expected. Another electrolyte, $TBABF_4$ was employed and it was also found that the reaction did not take place (Table 1, entry 6). Thus, this reaction required I^-/I_2 mediator to generate 3aa product.

Table 1 Optimization of electrolytes[a]



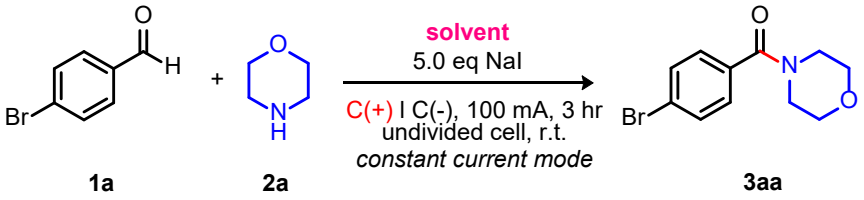
1a **2a** **3aa**

Entry	Supporting electrolyte	Yields[b]
1	NaI	67 %
2	LiI	70 %
3	KI	42 %
4	TBAI	22 %
5	NaBr	N.R[c]
6	$TBABF_4$	N.R[c]

Note: [a]Unless otherwise noted, the reaction conditions were as followed: 4–bromobenzaldehyde (1.0 eq, 0.30 mmol), morpholine (5.0 eq, 1.50 mmol), supporting electrolyte (5.0 eq, 1.50 mmol), CH_3CN:H_2O (3 mL:1 mL), graphite rod (Ø = 0.5 mm, immersed 1.0 cm) as anode and cathode, 100 mA for 3 hours at room temperature in an undivided cell.; [b]Isolated yield.; [c]No reaction.

The solvents were screened as shown in Table 2. We found that the use of polar organic solvents such as DMSO, THF and EtOH combined with H_2O gave 3aa product in 50%, 40% and 33% yields, respectively (Table 2, entries 2–4). We hypothesized that the decreasing yield was due to the poor solubility of I_2, which was generated *in* situ, leading to poor electron transfer process. In addition, increasing concentration of H_2O (Table 2, entry 5) led to heterogeneous reaction providing 3aa only in 8% yield, perhaps due to the poor solubility of generated I_2 as mentioned above.

Table 2 Optimization of solvents[a]



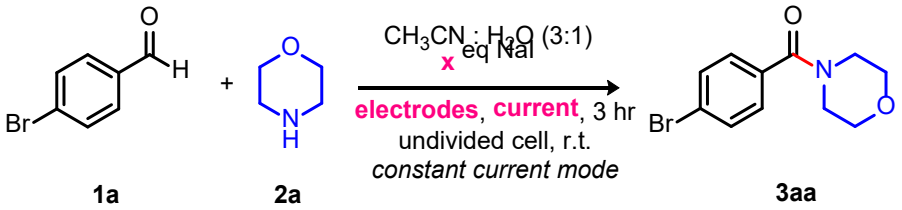
1a **2a** **3aa**

Entry	Ratio of solvent (mL)	Solvent	Yields[b]
1	3 : 1	CH_3CN : H_2O	67 %
2	3 : 1	DMSO : H_2O	50 %
3	3 : 1	THF : H_2O	40 %
4	3 : 1	EtOH : H_2O	33 %
5	1 : 1	CH_3CN : H_2O	8 %

Note: [a]Unless otherwise noted, the reaction conditions were as followed: 4–bromobenzaldehyde (1.0 eq, 0.30 mmol), morpholine (5.0 eq, 1.50 mmol), NaI (5.0 eq, 1.50 mmol), solvent (3 mL:1 mL), graphite rod (Ø = 0.5 mm, immersed 1.0 cm) as anode and cathode, 100 mA for 3 hours at room temperature in an undivided cell.; [b]Isolated yield.

The electrodes, electrical currents and equivalents of sodium iodide were investigated and presented in Table 3. We decided to use the non–sacrificial electrodes such as graphite rods and platinum plates to prevent the corrosion. Herein, we first investigated the suitable electrodes both anode and cathode by using graphite rods as anode and cathode (Table 3, entry 1). Then 3aa was isolated in 67% yield. Second, both platinum plates as anode and cathode were used (Table 3, entry 2). Unfortunately, the yield of 3aa dramatically lessened because platinum plates lacked active surface area when compared with graphite rods. Fortunately, we could improve the yield of 3aa from 67% to 83% when we used graphite rod as anode and platinum plate as cathode as shown in Table 3, entry 3. The reason is electrodes have appropriate potential window to take place the reaction. The electrical current was changed from 100 mA to 80 mA for 3 hours providing 58% of 3aa as shown in Table 3, entry 4. Thus, the suitable energy for construction 3aa is 100 mA. Moreover, we reduced the amount of NaI from 5.0 to 2.5 eq (Table 3, entry 5) because of poor atom economy and obtained 3aa without any significant change in yield when compared with Table 3, entry 3 (78% VS 83%). Finally, our attempt to perform the reaction of 1a and 2a in the absence of electricity provided no product 3aa so this reaction needed electricity to produce I_2 mediator from NaI (Table 3, entry 6).

Table 3 Optimization of electrodes, electrical currents and equivalents of sodium iodide[a]



1a **2a** **3aa**

Entry	Type of electrodes	Current (mA)	NaI (eq)	Yields[b]
1	Graphite rod (+) (–)	100	5.0	67 %
2	Platinum plate (+) (–)	100	5.0	24 %
3	Graphite rode (+) Platinum plate (–)	100	5.0	83 %
4	Graphite rode (+) Platinum plate (–)	80	5.0	58 %
5	Graphite rode (+) Platinum plate (–)	100	2.5	78 %
6	Graphite rode (+) Platinum plate (–)	–	2.5	N.R[c]

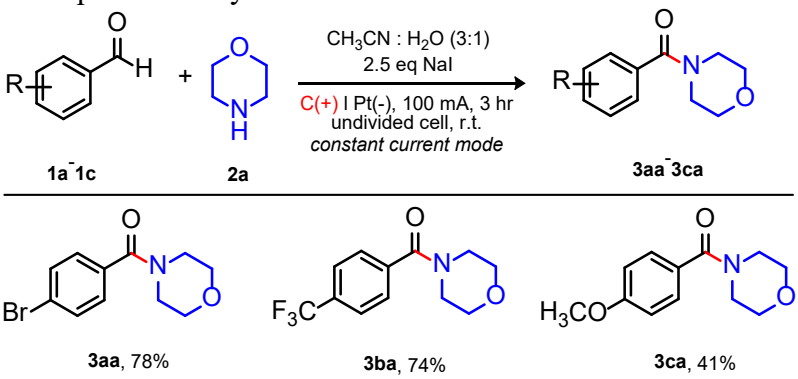
Note: [a]Unless otherwise noted, the reaction conditions were as followed: 4–bromobenzaldehyde (1.0 eq, 0.30 mmol), morpholine (5.0 eq, 1.50 mmol), NaI (5.0 eq, 1.50 mmol), CH_3CN:H_2O (3 mL:1 mL), graphite rod (Ø = 0.5 mm, immersed 1.0 cm) as anode or cathode, platinum plate (5x5x0.1 mm) as anode or cathode, 100 mA for 3 hours at room temperature in an undivided cell.;[b] Isolated yield.;[c]No reaction

Based on the above investigated condition, we obtained the optimized condition using CH_3CN:H_2O (3:1) as co–solvent, 2.5 equivalent of NaI, graphite rod as anode and platinum plate as cathode with a current of 100 mA for 3 hours at room temperature in an undivided cell.

Substrate scope under optimization condition

With the optimized condition in our hand, we successfully synthesized amide products form 4–(trifluoromethyl)benzaldehyde (1b) and 4–methoxybenzaldehyde (1c) with morpholine (2c). Products 3ba and 3ca were obtained in 74% and 41% yields, respectively as shown in Table 4. The results revealed that our reaction proceeded more easily if the aromatic aldehyde containing an electron–withdrawing group (–Br and $–CF_3$) was employed since the rate–determining step is hemiaminal intermediate formation via nucleophilic addition at carbonyl position.

Table 4 Substrate scope for aldehyde derivatives[a,b]



Note: [a]Unless otherwise noted, the reaction conditions were as followed: aromatic aldehydes (1.0 eq, 0.30 mmol), morpholine (5.0 eq, 1.50 mmol), NaI (2.5 eq, 0.75 mmol), CH_3CN:H_2O (3 mL:1 mL), graphite rod (Ø = 0.5 mm, immersed 1.0 cm) as anode, platinum plate (5x5x0.1 mm) as cathode, 100 mA for 3 hours at room temperature in an undivided cell.; [b] Isolated yield.

We could synthesize amides carrying either an electron–withdrawing group (–Br and $–CF_3$) and an electron–donating group ($–OCH_3$) via electrochemical oxidative amidation between corresponding aromatic aldehydes and morpholine in satisfactory yields.

Acknowledgements

This study was financially supported by the Thailand Research Fund (RSA6080018 and RTA 180007) and the National Nano–technology Center, NSTDA, Minister of Science and Technology, Thailand, through its program of Research Network NANOTEC (RNN). This work was also partially supported by a Grant for International Research Integration: Chula Research Scholar and Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology (PETROMAT), Thailand.

References

Chen, H. et al. 2011. Metal–free direct amidation of peptidyl thiol esters with α–amino acid esters. Green Chem. 13: 2723–2726. doi.org/10.1039/c1gc15401j

Deol, H., et al. 2018. Exploring organic photosensitizers based on hemicyanine derivatives: a sustainable approach for preparation of amide linkages. RSC Adv. 8: 31237–31245. doi.org/10.1039/c8ra06232c

Deshidi, R., et al. 2015. Highly efficient dehydrogenative cross–coupling of aldehydes with amines and alcohols. RSC Adv. 5: 90521–90524. doi.org/10.1039/c5ra17425b

Dine, T.M.E. et al. 2015. Catalytic chemical amide synthesis at room temperature: One more step toward peptide synthesis. J. Org. Chem. 80: 4532–4544. doi.org/10.1021/acs/joc.5b00378

Dunetz, J.R., et al. 2016. Large–scale applications of amide coupling reagents for the synthesis of pharmaceuticals. Org. Process Res. Dev. 20: 144–177. doi.org/10.1021/op500305s

Figueiredo, R.M.D., et al. 2016. Nonclassical routes for amide bond formation. Chem. Rev. 116: 12029–12122. doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00237

Goel, B., et al. 2020. Amidation of aldehydes with amines under mild conditions using metal–organic framework derived NiO@Ni Mott–Schottky catalyst. Chemcatchem 12: 5743–5749. doi.org/10.1002/cctc.202001

Liu, K., et al. 2018. Recent advances in iodine mediated electrochemical oxidative cross–coupling. Org. Biomol. Chem. 16: 2375–2387. doi.org/10.1039/c8ob00063h

Liu, S., et al. 2018. Organic ligand–free carbonylation reactions with unsupported bulk Pd as catalyst. Green Chem. 20: 3457–3462. doi.org/10.1039/c8gc00740c

Lundberg, H., et al. 2012. Titanium (IV) isopropoxide as an efficient catalyst for direct amidation of nonactivated carboxylic acids. Synlett. 23: 2201–2204. doi.org/ 10.1055/s–0032–1316993

Porras, A.O., et al. 2015. Direct amidation of carboxylic acids with amines under microwave irradiation using silica gel as a solid support. Green Chem. 17: 3157–3163. doi.org/10.1039/c5gc00189g

Yan, M., et al. 2017. Synthetic organic electrochemical methods since 2000: On the verge of a renaissance. Chem. Rev. 117: 13230–13319. doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00397

ผลกระทบของปรากฏการณ์เอนโซ่ต่อความแปรปรวนของปริมาณฝนในภาคตะวันออกของประเทศไทย

The effects of ENSO on variability of rainfall in Eastern Thailand

พิมพ์วลัญช์ ปริยกร[a]*, ปริชาติ เวชยนต์[a], ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์[b]

Pimwalan Pariyakorn[a]*, Parichat Wetchayout[a], Chaiwat Ekkawatpanit[b]

[a]ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ 10110

[b]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[a]Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand.

[b] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: Pimwalan.pariyakorn@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์เอนโซ่ต่อความแปรปรวนของปริมาณฝนในภาคตะวันออกของประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ.2562 โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือนในพื้นที่ภาคตะวันออก และข้อมูลดัชนี Oceanic Nino Index (ONI) โดยแบ่งข้อมูลเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ภาวะลานีญา ภาวะปกติ ภาวะเอลนีโญ เพื่อมาคำนวณค่าดัชนีฝน (Rainfall index) จากนั้นวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation, r) ระหว่างดัชนี ONI กับค่าดัชนีฝน พบว่า ปริมาณฝนสะสมเฉลี่ยรายเดือน ภาวะลานีญาเท่ากับ 101.37 มม. ภาวะปกติเท่ากับ 158.88 มม. ภาวะเอลนีโญเท่ากับ 90.02 มม.นอกจากนี้ภาวะลานีญาทำให้ปริมาณฝนสะสมรายเดือนเพิ่มขึ้นทุกลุ่มน้ำ สูงสุดที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี ซึ่งมีค่า r มากที่สุด ภาวะปกติทุกลุ่มน้ำไม่มีความแปรปรวนของปริมาณฝนสะสมรายเดือน ยกเว้นลุ่มน้ำโตนเลสาปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีค่า r ต่ำที่สุด ภาวะเอลนีโญส่งผลให้ปริมาณฝนสะสมรายเดือนลดลงทุกลุ่มน้ำ ลดลงสูงสุดที่ลุ่มน้ำโตนเลสาปซึ่งมีค่า r ต่ำที่สุด

คำสำคัญ: ความแปรปรวนของปริมาณฝน, ประเทศไทย, ปรากฏการณ์เอนโซ่, ภาคตะวันออก

Abstract

The purposes of this research were to study the effects of ENSO phenomenon on variability of rainfall in Eastern Thailand during 2001 to 2019. Monthly cumulative rainfall data and Oceanic Nino Index (ONI) were divided into 3 periods, La Niña, Neutral, and El Niño. Monthly rainfall index was then calculated from the monthly cumulative rainfall data, after that Pearson correlation coefficient (r) between ONI and Rainfall index is obtained for each period. The results show that monthly average cumulative rainfall during the La Niña, Neutral, and El Niño periods are 101.37, 158.88, and 90.02 mm, respectively. It is found that the monthly cumulative rainfall is increased in all watersheds during La Niña period with highest increasing value and r value in Prachinburi. The monthly cumulative rainfall has no significant change in all watersheds excepting the Tonle Sap watershed which trends to increase a little with lowest r value during Neutral period. For El Niño period, the monthly cumulative rainfall trends to decrease in all watersheds with highest decreasing value and lowest r value in the Tonle Sap watershed.

Keywords: eastern, ENSO, Thailand, variability of rainfall

คำนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้มีสภาพภูมิอากาศแบบเขตร้อน อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดจากมหาสมุทรอินเดียทำให้เกิดฤดูฝน และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดจากทะเลจีนใต้ทำให้เกิดฤดูหนาวในทุกภูมิภาคยกเว้นภาคใต้ ส่งผลให้เกษตรกรเริ่มฤดูเพาะปลูกพืชและกักเก็บน้ำไว้ใช้ในฤดูแล้ง แต่ปัจจุบันสภาพอากาศมีความแปรปรวนไปจากในอดีตเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลมาจากการแปรปรวนไปของภูมิอากาศโลก ทำให้ฤดูกาลต่างๆ ได้รับผลกระทบเกิดความแปรปรวนไป อีกทั้งยังไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้อีกด้วย ซึ่งการแปรปรวนของปริมาณฝนที่เกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมประจำถิ่นแล้ว ยังมีงานวิจัยของสุนิสา และคณะ (2558) รูปแบบของฝนในประเทศไทยอันเนื่องมาจากพายุหมุนเขตร้อนที่พบบ่อยมักจะเกิดในบริเวณภาคตะวันออกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อีกทั้งปรากฏการณ์ทางอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศโลก โดยปรากฏการณ์หนึ่งที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายและส่งผลกระทบต่อปริมาณฝนในประเทศใกล้เส้นศูนย์สูตรที่อยู่รอบมหาสมุทรแปซิฟิกและประเทศที่อยู่ในแถบซีกโลกใต้ ซึ่งรวมทั้งประเทศไทย นั่นคือ ปรากฏการณ์เอนโซ่ (El Nino–Southern Oscillation: ENSO) ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิผิวน้ำทะเลในมหาสมุทรมีความแปรปรวนไป ทำให้สภาพอากาศเกิดสภาวะร้อน (Warm phase) และ สภาวะเย็น (Cool phase) จากปรากฏการณ์เอลนีโญ และปรากฏการณ์ลานีญา ตามลำดับ ทำให้เกิดสภาพแห้งแล้งและสภาพฝนตกหนักสลับกันไปมาระหว่างฝั่งตะวันออกและฝั่งตะวันตกของมหาสมุทร โดยผลกระทบนี้ไม่ได้เกิดผลกระทบต่อบริเวณพื้นที่ชายฝั่งของมหาสมุทรแปซิฟิกเท่านั้น ยังส่งผลต่อเนื่องไปยังพื้นที่บนแผ่นดินที่อยู่ไกลออกไปอีกด้วย

นอกจากนี้มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาการแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนในประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์เอนโซ่ ตัวอย่างเช่น Sriwicha et al. (2016) ได้สรุปว่า ปรากฏการณ์เอนโซ่และปรากฏการณ์อินเดียนโอเชียนโดโพลส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำฝนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนี้ ปริญ (2559) ได้สรุปว่า ปรากฏการณ์เอนโซ่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำฝนในภาคตะวันออกด้วยเช่นกันโดยใช้วิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Pearson correlation โดยพบว่า ปริมาณฝนรวมรายปีจะลดลงในปีที่เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ และปริมาณฝนรวมรายปีจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในปีลานีญา นอกจากนี้ยังมีการวิจัยล่าสุดที่ศึกษาวัฏจักรของปรากฏการณ์เอนโซ่โดย Lin and Qian (2019) พบว่า ปรากฏการณ์เอนโซ่มีลักษณะการเกิดที่เปลี่ยนแปลงไปจากในอดีต คือ วงรอบการเกิดระหว่างภาวะปกติ ถูกแบ่งเป็น warm to cold และ cold to warm ทำให้ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกัน

เนื่องจากภาคตะวันออกเป็นพื้นที่เป็นเพาะปลูกผลไม้ที่มีมูลค่าสูงและเป็นที่ตั้งนิคมอุตสาหกรรมที่สำคัญหลายแห่ง มีแหล่งท่องเที่ยวยอดนิยมมากมาย อีกทั้งยังมีการทำการประมงและแหล่งผลิตอัญมณีที่สำคัญของประเทศ จึงกล่าวได้ว่าเป็นภูมิภาคหนึ่งที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง จากการผลิตสินค้าส่งขายสินค้าทั้งในและนอกประเทศ การศึกษาปริมาณฝนที่แปรปรวนโดยผลกระทบจากปรากฏการณ์เอนโซ่ในพื้นที่ภาคตะวันออกนั้น จึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์เอนโซ่ต่อความแปรปรวนของปริมาณฝนที่ได้รับผลกระทบในภาคตะวันออกของประเทศไทย ซึ่งประกอบไปด้วยลุ่มน้ำจำนวน 4 ลุ่ม ได้แก่ ลุ่มน้ำโตนเลสาป ลุ่มน้ำปราจีนบุรี ลุ่มน้ำบางปะกง และลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก ตั้งแต่ช่วงเวลา พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ. 2562 โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือนบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย จากสถานีตรวจวัดอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา เพื่อใช้ประกอบการพยากรณ์อากาศ หรือ การประเมินปริมาณน้ำฝน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการการวางแผนจัดเตรียมการใช้น้ำในอนาคตต่อไป

ข้อมูลและวิธีการ

พื้นที่การศึกษา

ภาคตะวันออก มีตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์อยู่ระหว่างละติจูด 12 องศาเหนือ ถึง 14 องศาเหนือ และลองจิจูด 101 องศาตะวันออก ถึง 103 องศาตะวันออก มีพื้นที่ประมาณ 34,380 ตารางกิโลเมตร แบ่งตามเขตการแบ่งภูมิอากาศ ประกอบไปด้วย 7 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดจันทบุรี ชลบุรี ตราด ระยอง ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี และสระแก้ว มีลักษณะภูมิประเทศเป็นชายฝั่งทะเลที่เรียบยาวและโค้งเว้าและที่ราบสลับภูเขา มีเทือกเขาที่สำคัญ ได้แก่ เทือกเขาจันทบุรี ทอดตัวไปทางด้านตะวันออกของภาค และเทือกเขาบรรทัด เป็นเส้นกั้นพรมแดนธรรมชาติระหว่างไทยกับกัมพูชา นอกจากนี้ยังมีลุ่มน้ำประกอบไปด้วย 4 ลุ่ม ได้แก่ ลุ่มน้ำปราจีนบุรี ลุ่มน้ำบางปะกง ลุ่มน้ำโตนเลสาป และลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก (Fig. 1)

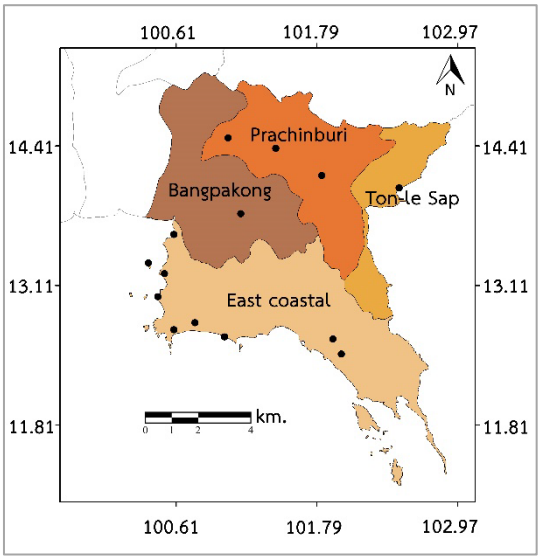


Fig. 1 The study area map in Eastern of Thailand consists of four watersheds: East coastal, Bangpakong, Tonle Sap and Prachinburi

ข้อมูลที่ใช้

ข้อมูลค่าดัชนีชี้วัดที่คำนวณจากค่าอุณหภูมิที่ผิวน้ำทะเลที่เปลี่ยนไปจากค่าอุณหภูมิน้ำทะเลปกติ (Oceanic Nino Index: ONI) จาก Climate Prediction Center (NOAA, 2019) และข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือนบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย ตั้งแต่ช่วงเวลา พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ. 2562 จากกรมอุตุนิยมวิทยา ทั้งหมด 14 สถานี ได้แก่ ฉะเชิงเทรา (ลุ่มน้ำบางปะกง) อรัญประเทศ (ลุ่มน้ำโตนเลสาป) ปราจีนบุรี กบินทร์บุรี สระแก้ว (ลุ่มน้ำปราจีนบุรี) และ ชลบุรี เกาะสีชัง พัทยา สัตหีบ แหลมฉบัง ระยอง ห้วยโป่ง จันทบุรี พลิ้ว (ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก)

วิธีการ

1. แบ่งช่วงข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือน จากรอบการเกิดปรากฏการณ์เอนโซ่ โดยใช้ดัชนี ONI แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ภาวะลานีญา ภาวะปกติ และ ภาวะเอลนีโญ

2. คำนวณค่าดัชนีฝน (Rainfall index) คือ ค่าความผิดปกติของปริมาณน้ำฝนสะสมรายเดือน (Pramanik et al., 2020) จากข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือน โดย Equation 1

$$\text{Rainfall index} = \frac{X-\bar{X}}{\bar{X}} \quad (1)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณน้ำฝนสะสมรายเดือน และ $\bar{X}$ คือ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน

3. วิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation, r) ระหว่างดัชนี ONI กับค่าดัชนีฝน โดย Equation 2

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi-\bar{X})(Yi-Y)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^{n}(Xi-\bar{X})^2][\sum_{i=1}^{n}(Yi-\bar{Y})^2]}} \quad (2)$$

โดยที่ Xi คือ ค่าดัชนี ONI Yi คือ ค่าดัชนีฝน

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของดัชนี ONI $\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของดัชนีฝน

4. ผลที่ได้จากข้อ 1–3 นำมาวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ และจัดทำแผนที่สรุปผลการแปรปรวนของปริมาณฝนในพื้นที่ภาคตะวันออกที่ได้รับอิทธิพลของปรากฏการณ์เอนโซ่ในแต่ละพื้นที่และช่วงเวลา

ผลการศึกษา

ปริมาณฝนสะสมรายเดือน

Fig. 2 แสดงปริมาณฝนเฉลี่ยสะสมรายเดือนในภาคตะวันออกของประเทศไทย ตั้งแต่ช่วงเวลา พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ. 2562 จากสถานีตรวจวัดอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา จำนวนทั้งสิ้น 14 สถานี จากการศึกษาพบว่า ฤดูฝนจะเริ่มต้นในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ร่องความกดอากาศต่ำพาดผ่านประเทศไทยทำให้มีฝนชุกทั่วไป ร่องความกดอากาศต่ำนี้ปกติจะพาดผ่านภาคใต้ในเดือนพฤษภาคม แล้วจึงเลื่อนขึ้นไปทางเหนือตามลำดับจนถึงช่วงประมาณปลายเดือนมิถุนายน จะพาดผ่านอยู่บริเวณประเทศจีนตอนใต้ทำให้ฝนลดลงระยะหนึ่ง และในเดือนกรกฎาคม ปกติร่องความกดอากาศต่ำจะเลื่อนกลับลงมาทางใต้พาดผ่านบริเวณประเทศไทยอีกครั้ง ทำให้มีฝนชุกต่อเนื่องจนกระทั่งมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ พัดเข้ามาปกคลุมประเทศไทยแทนที่มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ประมาณกลางเดือนตุลาคมจะเริ่มมีอากาศเย็นและฝนลดลง ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดแรงและนำความหนาวเย็นมาสู่ภาคตะวันออก เพราะได้รับอิทธิพลจากลมทะเลที่พัดขึ้นมา และฤดูร้อนเริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ในฤดูร้อนจะมีลมจากทิศใต้หรือจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ พัดเข้าสู่ภาคตะวันออก ทำให้บริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดต่างๆ ในภาคตะวันออก (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2559)

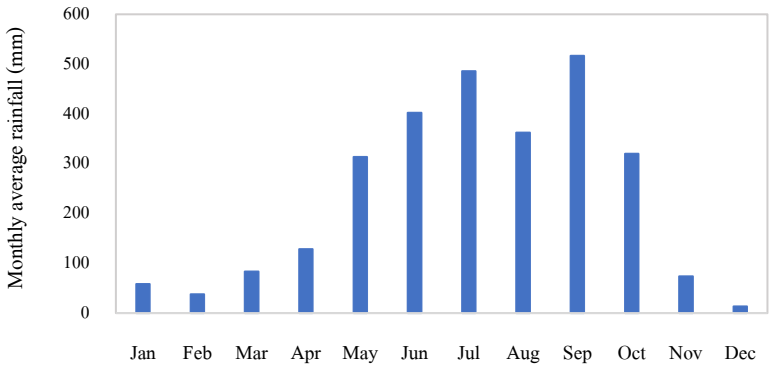


Fig. 2 Average of monthly rainfall of 14 stations in Eastern Thailand during 2001–2019

เมื่อแบ่งข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือนเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ภาวะลานีญา ภาวะปกติ และ ภาวะเอลนีโญ ใน Table 1 ภาวะลานีญาปริมาณฝนสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 101.37 มิลลิเมตร ภาวะปกติปริมาณฝนสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 158.88 มิลลิเมตร และภาวะเอลนีโญปริมาณฝนสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 90.02 มิลลิเมตร เนื่องจากภาวะลานีญาเกิดน้อยกว่าภาวะปกติ อีกทั้งในภาวะปกติส่วนใหญ่เกิดในช่วงฤดูฝน จึงส่งผลให้ภาวะปกติมีค่าปริมาณฝนสะสมมากกว่าภาวะลานีญา นอกจากนี้ยังพบว่า สถานีพลิ้วในลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออกมีปริมาณฝนสะสมรายเดือนสูงสุดในภาวะลานีญาและภาวะเอลนีโญ ดังแสดง Fig. 3เนื่องจากมีลักษณะภูมิประเทศเป็นเทือกเขาสูง อยู่ด้านหน้าของทิวเขาจันทบุรี จึงรับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดมาจากอ่าวไทย ทำให้มีฝนตกในปริมาณสูงมากกว่าสถานีอื่นๆซึ่งได้ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nounmusig (2018) เมื่อพิจารณาตามรายสถานีตรวจวัดอากาศที่อยู่ในลุ่มน้ำนี้ทั้งหมด 11 สถานี ทุกสถานีมีค่าปริมาณฝนใกล้เคียงกัน แต่จะมีเพียงบางสถานีที่ส่งผลให้ปริมาณฝนมากกว่าบริเวณอื่นส่งผลให้ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออกมีปริมาณฝนสะสมรายเดือนสูงสุดด้วย แต่ลุ่มน้ำปราจีนบุรีมีค่าปริมาณฝนสะสมสูงสุดในสภาวะปกติ ดังแสดงใน Fig. 3b เนื่องจากลุ่มน้ำปราจีนบุรีมีสถานีตรวจวัดอากาศ 3 สถานี ได้แก่ สถานีปราจีนบุรี กบินทร์บุรี และสระแก้ว ซึ่งแต่ละสถานีมีค่าปริมาณฝนสะสมที่สูงใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยปริมาณฝนสะสมสูงกว่าลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออกเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ลุ่มน้ำโตนเลสาปมีปริมาณฝนสะสมรายเดือนต่ำที่สุดในทุกสภาวะของปรากฏการณ์เอนโซ่ โดยต่ำสุดที่ภาวะเอลนีโญเท่ากับ 83.82 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Table 1 เนื่องจากมีสภาพภูมิประเทศเป็นเขตเงาฝนมีสภาพพื้นที่ตอนบนเป็นแนวเทือกเขาบรรทัด ซึ่งกั้นเขตพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์และจังหวัดปราจีนบุรีทำให้ได้รับปริมาณฝนที่ต่ำที่สุด

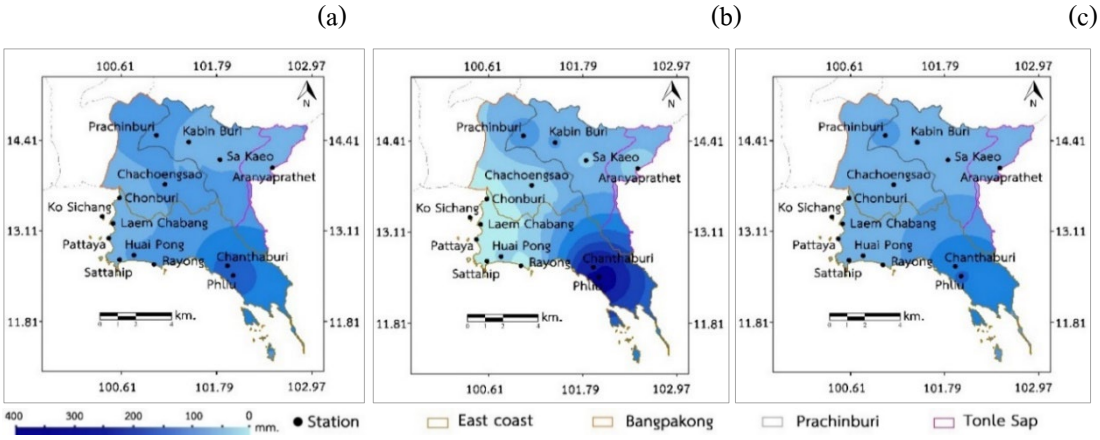


Fig. 3 Average of monthly rainfall of 14 stations in Eastern Thailand during 2001 – 2019 in 3 phases of ENSO: La Niña (a), Neutral (b) and El Niño (c)

Table 1 Average of monthly rainfall, rainfall index and correlation in Eastern Thailand during 2001–2019.

Watersheds	Average Monthly Rainfall			Average Rainfall Index			Average Correlation		
	La Niña	Neutral	El Niño	La Niña	Neutral	El Niño	La Niña	Neutral	El Niño
Tonle Sap	80.15	145.96	73.51	–0.04	0.11	–0.28	–0.01	–0.12	–0.07
Prachinburi	105.11	167.24	96.22	0.15	–0.02	–0.23	0.10	0.00	0.03
Bangpakong	102.82	151.15	83.82	0.07	0.00	–0.16	0.13	–0.04	0.19
East coastal	117.40	163.17	106.53	0.05	–0.01	–0.13	0.12	–0.11	0.25

ค่าดัชนีฝน (Rainfall Index) และ ค่าสหสัมพันธ์(Correlation)

ค่าดัชนีฝนในภาวะลานีญาทุกลุ่มน้ำมีความสัมพันธ์กันเชิงบวกส่งผลให้ปริมาณฝนสะสมรายเดือนเพิ่มขึ้นทุกลุ่มน้ำ โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรีบุรี 15% มีค่า r สูงถึง 0.10 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด ดังแสดงใน Table1กล่าวคือ เมื่อปริมาณฝนสะสมรายเดือนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีฝนและให้ค่า r เพิ่มขึ้น ยกเว้นสถานีอรัญประเทศ ชลบุรี พัทยา และแหลมฉบัง มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ดังแสดงใน Fig. 4a จึงส่งผลให้ลุ่มน้ำโตนเลสาปที่มีสถานีอรัญประเทศตั้งอยู่เพียงสถานีเดียวมีแนวโน้มลดลง 4% ซึ่งมีค่า r เท่ากับ –0.01 ภาวะปกติค่าดัชนีฝนส่วนใหญ่มีความแปรปรวนเล็กน้อย หรือบางสถานีไม่มีความแปรปรวน เช่น สถานีฉะเชิงเทรา และสถานีชลบุรี เมื่อนำค่าดัชนีฝนมาเฉลี่ยจึงทำให้ทุกลุ่มน้ำไม่มีความแปรปรวนของปริมาณฝนสะสมรายเดือน ยกเว้นลุ่มน้ำโตนเลสาปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 11% ซึ่งมีค่า r สูงถึง –0.12 ดังแสดงใน Fig. 4b และภาวะเอลนีโญค่าดัชนีฝนทุกสถานีมีความสัมพันธ์กันเชิงลบส่งผลให้ปริมาณฝนสะสมรายเดือนลดลงทุกลุ่มน้ำ ซึ่งบริเวณสถานีปราจีนบุรี กบินทร์บุรี สระแก้ว ดังแสดงใน Fig. 4c มีค่าดัชนีฝนลดลงมากกว่าบริเวณอื่น โดยลดลงสูงสุดที่สถานีอรัญประเทศ 28% อยู่ลุ่มน้ำโตนเลสาป มีค่า r เท่ากับ –0.07 เป็นค่าต่ำสุด ซึ่งมีความสัมพันธ์กันน้อยที่สุด กล่าวคือ เมื่อปริมาณฝนสะสมรายเดือนลดลง ส่งผลให้ค่าดัชนีฝนและค่า r ก็จะลดลงด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่า ภาวะลานีญาส่งผลให้สถานีชลบุรีมีค่า r เท่ากับ 0.24 และสถานีระยอง มีค่า r เท่ากับ 0.20 ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งมีค่านัยสำคัญทางสถิติ ภาวะปกติไม่มีค่านัยสำคัญทางสถิติทุกสถานี และภาวะเอลนีโญส่งผลให้สถานีชลบุรี สัตหีบ แหลมฉบัง ระยอง ห้วยโป่ง และพลิ้วมีค่านัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นภาวะลานีญาจึงมีปริมาณฝนมากกว่าภาวะเอลนีโญ โดยบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของปรากฏการณ์เอนโซ่สูงสุด คือ สถานีชลบุรีและสถานีระยอง

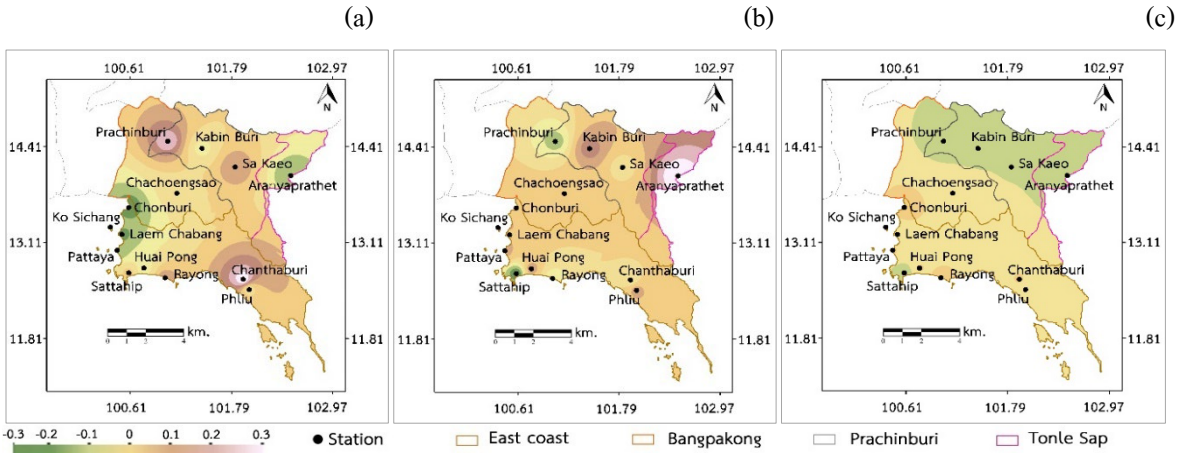


Fig. 4 Rainfall Index of 14 stations in Eastern Thailand during 2001–2019 in 3 phases of ENSO: La Niña (a), Neutral (b) and El Niño (c)

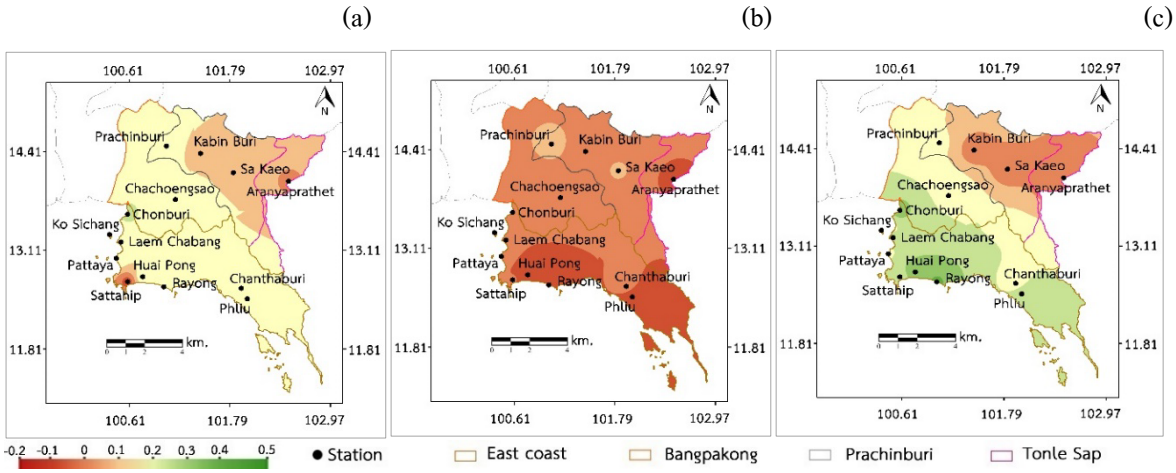


Fig. 5 Correlation between the ONI and average monthly rainfall of 14 stations in Eastern Thailand during 2001–2019 in 3 phases of ENSO: La Niña (a), Neutral (b) and El Niño (c)

Table 2 Rainfall index and correlation of 14 stations in Eastern Thailand during 2001–2019

Stations	watersheds	Rainfall Index			Correlation		
		La Niña	Neutral	El Niño	La Niña	Neutral	El Niño
Chachoengsao	Bangpakong	0.07	0.00	–0.16	0.13	–0.04	0.19
Aranyaprathet	Tonle Sap	–0.04	0.11	–0.28	–0.01	–0.12	–0.07
Pranchinburi	Prachinburi	0.25	–0.07	–0.25	0.14	0.03	0.11
Kabin Buri	Prachinburi	0.03	0.05	–0.23	0.07	–0.04	–0.01
Sa Kaeo	Prachinburi	0.17	–0.03	–0.20	0.09	0.01	0.00
Chonburi	East coastal	–0.08	0.00	0.00	0.24	–0.05	0.35
Ko Sichang	East coastal	0.03	0.05	–0.20	0.06	–0.16	0.00
Pattaya	East coastal	–0.04	0.03	–0.09	0.19	–0.06	0.19

Table 2 (continued).

Stations	watersheds	Rainfall Index			Correlation		
		La Niña	Neutral	El Niño	La Niña	Neutral	El Niño
Sattahip	East coastal	0.10	–0.11	–0.30	–0.14	–0.09	0.25
Laem Chabang	East coastal	–0.06	0.01	–0.18	0.11	–0.07	0.23
Rayong	East coastal	0.15	–0.05	–0.07	0.20	–0.18	0.42
Huai Pong	East coastal	0.02	0.03	–0.09	0.16	–0.16	0.39
Chanthaburi	East coastal	0.29	–0.03	–0.10	0.14	–0.05	0.14
Phliu	East coastal	0.06	0.02	–0.13	0.14	–0.19	0.29

สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์เอนโซ่ต่อความแปรปรวนของปริมาณฝนในภาคตะวันออกของประเทศไทย ซึ่งประกอบไปด้วยลุ่มน้ำจำนวน 4 ลุ่ม ได้แก่ ลุ่มน้ำโตนเลสาป ลุ่มน้ำปราจีนบุรี ลุ่มน้ำบางปะกง และลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก ตั้งแต่ช่วงเวลา พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ. 2562 ผลการวิจัยพบว่า ในภาวะลานีญาทำให้ปริมาณฝนสะสมรายเดือนเพิ่มขึ้นทุกลุ่มน้ำ โดยเพิ่มขึ้นสูงสุด 15% ที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี และมีค่า r เท่ากับ 0.10 ภาวะปกติทุกลุ่มน้ำไม่มีความแปรปรวนของปริมาณฝนสะสมรายเดือน ยกเว้นลุ่มน้ำโตนเลสาปที่มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีค่า r ต่ำที่สุด ภาวะเอลนีโญส่งผลให้ปริมาณฝนสะสมรายเดือนลดลงทุกลุ่มน้ำ โดยลดลงสูงสุด 28% ที่ลุ่มน้ำโตนเลสาปซึ่งมีค่า r ต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ลุ่มน้ำบางปะกงไม่ได้ได้รับอิทธิพลของปรากฏการณ์เอนโซ่ แต่บริเวณที่ได้รับอิทธิพลของปรากฏการณ์เอนโซ่ซึ่งมีค่านัยสำคัญทางสถิติ คือ สถานีชลบุรี และสถานีระยอง ซึ่งอยู่ในลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือนตามสถานีภาคตะวันออกของประเทศไทย เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2559. ฤดูกาลของประเทศไทย. http://tmd.go.th/info/info.php?FileID=53, 4 กุมภาพันธ์ 2564.

ปริญ หล่อพิทยากร. 2559. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนในกับปริมาณฝนบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทยในภาวะเอนโซ่. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 24: 400–417. doi 10.14456/tstj.2016.32.

สุนิสา สายอุปราช, กรรณนิการ์ ม่วงชู, ปิยพงษ์ ปานแก้ว. 2558. รูปแบบของฝนในประเทศอันเนื่องมาจากอิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อน. งานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

Lin, J., Qian, T. 2019. A new picture of the global impacts of el nino–southern oscillation. Scientific Reports. 9: 17543. doi.org/10.1038/s41598–019–54090–5.

NOAA. 2019. Monthly NINO 3.4 Index Data. http://origin.cpc.necp.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php, 4 กุมภาพันธ์ 2564.

Nounmusig, W. 2018. Analysis of rainfall in the eastern Thailand. International Journal of GEOMATE. 2018. 14: 150–155. doi.org/10.21660/2018.46.7282.

Pramanik, M, Singh, P., Kumar, G., Ojha, V.P., Dhiman, R.C. 2020. El Nino southern oscillation as an early warning tool for dengue outbreak in India. BMC Public Health. 20: 1498. doi.org/10.1186/s12889–020–09609–1

Sriwicha, S., Busababodhin, P., Kumphon, B. 2016. The impact of ENSO on rainfall in the northeast of Thailand. Burapha Science Journal 21: 190–202.

Carbon tetrabromide mediated desulfurization of dithiocarbamate salt for the synthesis of isothiocyanates

Saharat Techapanalai[a], Mongkol Sukwattanasinitt[a], Sumrit Wacharasindhu[a,b,*]
[a]Nanotec–CU Center of Excellence on Food and Agriculture, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.
[b]Green Chemistry for Fine Chemical Productions STAR, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.
*Corresponding author. E–mail address: sumrit.w@chula.ac.th

Abstract

Isothiocyanate is an important a building block for construction of sulfur–containing compounds which found in many therapeutic drugs. However, the typical synthesis of isothiocyanate involve desulfurization between amines and carbon disulfide using harsh condition and toxic oxidizing agent. In this study, we replace the toxic oxidizing agent into carbon tetrabromide which is a commercially available, cheap and less hazardous reagent to prepare isothiocyanate from amines. 4–bromoaniline is used as a model amine for desulfurization using carbon tetrabromide as desulfurizing agent. We also investigate various parameters in this desulfurization including solvent type, amount of carbon disulfide, base and reaction time. The optimized condition reveals that the use of carbon disulfide in the present of DBU in acetonitrile for 4 hours generates the intermediate dithiocarbamate salt in quantitative yield. The addition of carbon tetrabromide in one pot manner give the 4–bromophenyl isothiocyanate in 85% yield. Moreover, we are able to apply this condition to prepare various isothiocyanate in fair to excellent yield.

Keywords: Carbon tetrabromide, Desulfurization, Isothiocyanate

Introduction

Isothiocyanates have been known an important class of organic compounds which found in many applications such as fluorescence biomarker and bioactive compounds. Moreover, isothiocyanates are considered as building block for sulfur containing heterocyclic compounds. Considering the importance and wide applications of isothiocyanates. The various preparation methods have been developed from many starting materials. Among them, amine is ascribed as suitable source due to it wide availability. There are two strategy to synthesize isothiocyanate from amine as described in Fig. 1. The first strategy involved the thiocarbonylation with many thiocarbonyl transfer reagent such as thiophosgene (Johnson et al., 1932), l,l'–thiocarbonyldiimidazole (Harpp et al., 1977) and l,l,–thiocarbonyldi–2,2,–pyridone (Kim et al., 1985) into isothiocyanates in single step (Fig. 1, left). However, they required toxic, harsh and anhydrous condition. To overcome this problem, the alternative strategy is the two–step synthesis involves reaction of amine with carbon disulfide followed by desulfurization. Many oxidizing agents have been reported to prepare isothiocyanate including hydrogen peroxide (Li et al., 1997), DIB (Patel et al., 2008), iodine (Patel et al., 2009), $Na_2S_2O_8$ (Xu et al., 2018) as shown in Fig. 1, right. Moreover, transition metals in sub–stoichiometric amount also have been reported as desulfurizing agent such as Co (II) (Kammela et. al., 2016) and Cu (II) (Rudaraju et. al., 2017) to prepare isothiocyanate (Fig. 1., right). In addition, the mediator compounds such as tosyl chloride (Dolman et al., 2007) and Boc_2O (Boas et al., 2008) have been employed for the isothiocyanate preparation (Fig. 1., right). Although, those reports are efficient but they are suffered from the use of toxic/explosive oxidizing agent and harsh condition. Therefore, the need to develop mild and safe method for the preparation of isothiocyanate still remain.

Carbon tetrabromide, as known as tetra bromomethane, is a commercially available white solid which is stable at room temperature, easily handled and low toxic reagent. Carbon tetrabromides were used in bromination (Chavasiri et al., 2012) and acylation (Wu et al., 2007). Moreover, carbon tetrabromide has been reported for the desulfurizing agent in the synthesis of symmetric thiourea and thiuram disulfide from amine (Liu et al., 2008). In this work, we aim to apply the use of carbon tetrabromide as desulfurizing agent for synthesis of isothiocyanate (Fig. 1, right).

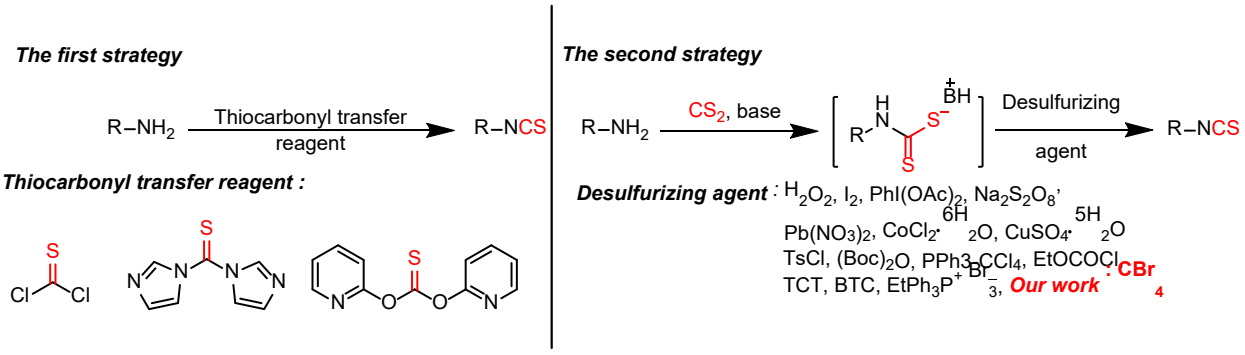


Fig. 1 Thiocarbonylation of amine with thiocarbonyl transfer, left) Desulfurization between amine and various desulfurizing agent, right).

Materials and Methods

Materials, equipment and instruments for synthesis and characterization

All chemicalsand solvents were obtained from commercially available suppliers such as Sigma–Aldrich and TCI (Japan) and were used without further purification, unless otherwise stated. Power supply was purchased from Shenzhen Korad Technology CO., LTD. All electrodes were purchased from Minihua Store, China. Analytical thin layer chromatography (TLC) was performed with precoated Merck silica gel 60 F254 plates (0.25 mm for thick layer) and visualized at 254 nm using an ultraviolet lamp. Column chromatography was performed with Silicycle silica gel 60–200 μm (70–230 mesh). ^{1}H–NMR and ^{13}C–NMR spectra were obtained with JEOL JNM–ECZ500R/S1 NMR spectrometers operating at 500 MHz for ^{1}H or 125 MHz for ^{13}C. Mass spectrums were reported using electron ionization (EI) with gas chromatography mass spectrometer (GC–MS).

Optimization for oxidative desulfurization of amine using carbon tetrabromide

To a stirred the solution of 4–bromoaniline (1a), carbon disulfide and base in solvent (2 mL) for 4 hours. Then, carbon tetrabromide was added into the solution for the right time. After reaction complete, the solution mixture was quenched with H_2O (1 x 4 mL) and extracted with ethyl acetate (3×5 mL). The organic phase was eliminated water by Na_2SO_4 and removed Na_2SO_4 by filtration. After removed Na_2SO_4 the solution was concentrated under reduce pressure. The 4–bromophenyl isothiocyanate (2a) was isolated by silica gel column chromatography. Moreover, the effects of reaction parameters were considered following the lists below.

Substrate scope under optimization

To a stirred the of solution of *p*–anisidine (1b) or ethyl 4–aminobenzoate (1c) (1.0 eq., 0.58 mmol), carbon disulfide (3.0 eq., 1.74 mmol) and DBU (3.0 eq., 1.74 mmol) in acetonitrile (2 mL) for 4 hours. Then, carbon tetrabromide (1.5 eq., 0.87 mmol) was added into the solution for 1 h. After reaction complete, the solution mixture was quenched with H_2O (1×4 mL) and extracted with ethyl acetate (3 x 5 mL). The organic phase was eliminated water by Na_2SO_4 and removed Na_2SO_4 by filtration. After removed Na_2SO_4 the solution was concentrated under reduce pressure. The isothiocyanate (2b–2c) was isolated by silica gel column chromatography and following characterization data.

Characterization data

1–Bromo–4–isothiocyanatobenzene (2a): 85% yield as a white solid: ^{1}H–NMR (500 MHz, $CDCl_3$): δ(ppm) 7.55 – 7.37 (m, 2H), 7.19 – 6.99 (m, 2H). ^{13}C–NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ 137.0, 132.8, 130.6, 127.3, 120.9. GC–MS: m/z: 215.0 (calced for C_7H_4BrNS: 214.9).

1–Isothiocyanato–4–methoxybenzene (2b): 88% yield as a yellow oil:**)**. ^{1}H–NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ 7.18 – 7.05 (m, 2H), 6.85 – 6.75 (m, 2H), 3.79 (s, 3H). ^{13}C–NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ 158.6, 134.0, 127.0, 123.6, 114.8, 55.6. GC–MS: m/z: 165.1 (calced for C_8H_7NOS: 165.0).

Ethyl 4–isothiocyanatobenozate (2c): 52% yield yellow solid: ^{1}H–NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ 8.02 (dd, J = 8.7, 2.1 Hz, 2H), 7.33 – 7.14 (m, 2H), 4.36 (q, J = 7.1 Hz, 2H), 1.37 (t,

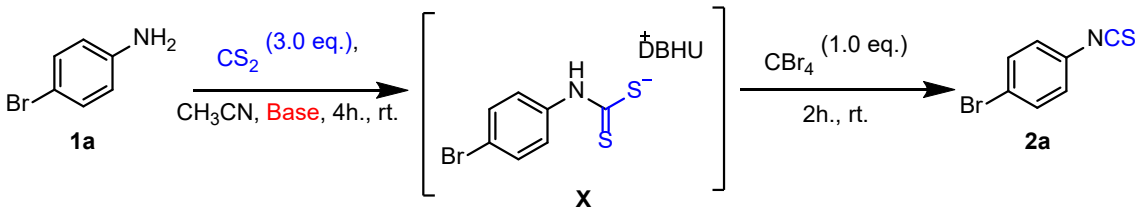
J = 7.1 Hz, 3H). ^{13}C–NMR (125 MHz, $CDCl_3$) δ 165.5, 137.8, 135.6, 131.1, 129.1, 125.7, 61.4, 14.4. GC–MS: m/z: 207.1 (calced for $C_{10}H_9NO_2S$: 207.0).

Result and Discussion

Optimization study

The optimization of isothiocyanates were studied with 4–bromoaniline (1a) as a model staring material for desulfurization using carbon tetrabromide as desulfurizing agent. This research, we investigated various parameter including solvent type, amount of carbon disulfide, base, reaction time and amount of carbon tetrabromide to provide 4–bromophenyl isothiocyanate (2a). We first screened effect of solvent. CH_3CN, EtOAc, EtOH, *i*–propanol, acetone and DMSO were tested and the yield of isothiocyanate were presented in Table 1. We found that CH_3CN gave the best result and provide isothiocyanate in 74% (Table 1, entry 6)

Table 1 The study effect of solvent type[a]

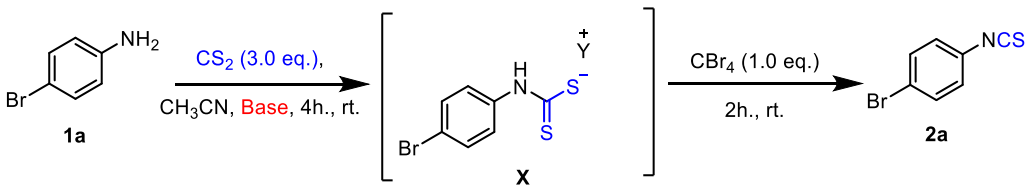


Entry	Solvent	%yield[b]
1	EtOAc	52
2	EtOH	10
3	*i*–Propanol	18
4	Acetone	22
5	DMSO	46
6	CH_3CN	74

Note: [a]Reaction condition: 4–bromoaniline (1.0 eq., 0.58 mmol), CS_2 (3.0 eq., 1.74 mmol), CBr_4 (1.0 eq., 0.58 mmol) DBU (3.0 eq., 1.74 mmol), Solvent (2.0 mL). [b]Isolated yield

Next, organic and inorganic bases were investigated and summarized in Table 2. Among organic base, DBU gave the high yield in 74% (Table 2, entry 1–3). On the other hand, when we switch to inorganic base such as K_2CO_3, Cs_2CO_3 and NaOAc, the isothiocyanates were obtained in lower yields (43–0%, Table 2, entry 4–6). We believe that it is probably due to the poor formation of dithiocarbamate salt (X) in the first step. Base on this result, we selected DBU (Table 2, entry 1) as base for further study.

Table 2 The study effect of base[a]

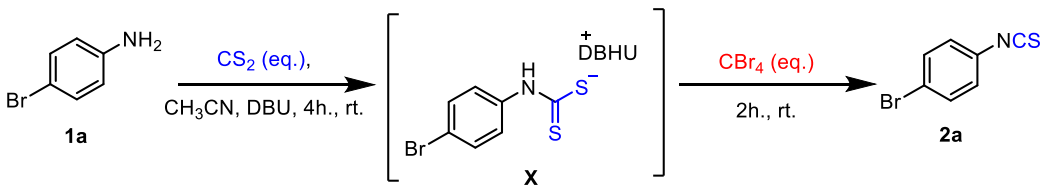


Entry	Base	Y (salt form)	%yield[b]
1	DBU	DBHU	74
2	Et_3N	$HNEt_3$	58
3	DIPEA	*i*–Pr_2HNEt	22
4	K_2CO_3	K	43
5	Cs_2CO_3	Cs	48
6	NaOAc	Na	0

Note: [a]Reaction condition: 4–bromoaniline (1.0 eq., 0.58 mmol), CS_2 (3.0 eq., 1.74 mmol), CBr_4 (1.0 eq., 0.58 mmol) Base (3.0 eq., 1.74 mmol), CH_3CN (2.0 mL).; [b]Isolated yield

Then, the amount of carbon disulfide in the first step and amount of CBr_4 were carefully investigated (Table 3). When only 1.5 equivalence were used, we observed the remaining starting material 1a and only 53% of isothiocyanate were produced (Table 3, entry 1). To ensure the complete conversion of 1a into the corresponding thiocarbamate salt at least 3.0 equivalence of carbon disulfide is required as seen in Table 3, entry 2. Next, we used 3.0 equivalence carbon disulfide as optimal amount to perform the desulfurization with various amount of CBr_4 (Table 3, entry 1–3). without CBr_4 only 12% of isothiocyanates were isolated (Table 3, entry 4). With 1.5 equivalence of CBr_4 the isothiocyanate were produced in 85% after 2 hours (Table 3, entry 6). In order to improve the reaction, we carried the second step at 0°C. However, the isothiocyanates were isolated in only 78% yield (Table 3, entry 7). We hypothesized that there are remaining unreacted dithiocarbamate salt (X). Then, when we reduced the desulfurization time (step 2) from 2 to 1 hour, we received the similar yield (85%, Table 3, entry 8) which will be used as our optimize condition for further study.

Table 3 The study of amount of CS_2[a] and CBr_4[a]



Entry	CS_2 (eq.)	CBr_4 (eq.)	%yield[b]
1	1.5	1.0	53
2	3.0	1.0	74
3	5.0	1.0	75
4	3.0	–	12
5	3.0	0.5	52
6	3.0	1.5	85
7	3.0	1.5	78
8	3.0	1.5	85

Note: [a]Reaction condition: 4–bromoaniline (1.0 eq., 0.58 mmol), CS_2 (1.5–5.0 eq., 0.87–0.29 mmol), CBr_4 (0–1.5 eq., 0–0.87 mmol) DBU (3.0 eq., 1.74 mmol), CH_3CN (2.0 mL).; [b]Isolated yield.

Substrate scope under optimization condition

With the optimization in hand, we can expand the scope of aryl amine starting materials (Fig. 2). Aryl amine substrate carrying electron doating group such as *p*–anisidine (1b) and electron withdrawing group such as ethyl 4–aminobenzoate (1c) were subjected to our optimize condition to obtain target isothiocyanate 2b and 2c in 88% and 52% respectively. The results show that our reaction can be simply proceeded by electron donating group more than electron withdrawing group on aromatic amine since the rate determining step is dithiocarbamate salt (X) intermediate via nucleophilic addition of amine with carbon disulfide. All the products were fully characterization with ^{1}H and ^{13}C NMR and Mass spectrometer.

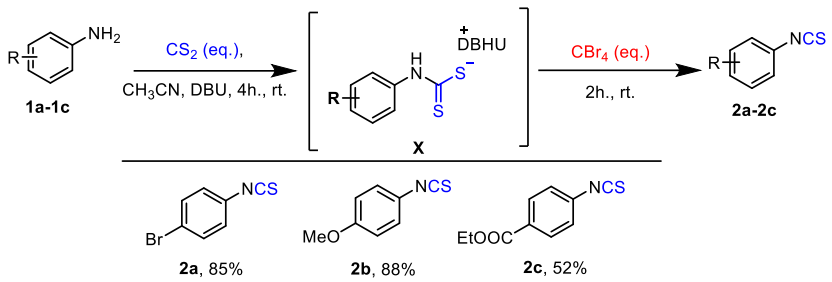


Fig. 2 Amine scopes for isothiocyanate derivatives

We are able to use carbon tetrabromide to perform one pot reaction to convert 4–bromoaniline (1a) into 4–bromophenyl isothiocyanate (2a). The optimized condition was determined and further used to synthesize several aryl isothiocyanates bearing methoxy (2b) and ethyl ester (2c). The expanded scope of this reaction and mechanistic study will be reported in due course.

Acknowledgements

This study was financially supported by the Thailand Research Fund (RSA6080018 and RTA 180007) and the National Nano–technology Center, NSTDA, Minister of Science and Technology, Thailand, through its program of Research Network NANOTEC (RNN). This work was also partially supported by a Grant for International Research Integration: Chula Research Scholar and Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology (PETROMAT), Thailand.

Reference

Boas, U., et al., 2008. A new efficient synthesis of isothiocyanates from amines using di–tert–butyl decarbonate. Tetrahedron Lett. 49: 3117–3119. doi.org/10.1016/J.TETLET.2008.03.045

Chavasiri, W., et al. 2012. Cl_3CCN/PPh_3 and CBr_4/PPh_3: two efficient reagent systems for the preparation of *N*–heteroaromatic halides. Tetrahedron Lett. 53: 674–677. doi.org/10.1016/j.tetlet.2011.11.123

Dolman, S., et al. 2007. Isothiocyanates from tosyl thloride tediated tecomposition of in titu tenerated dithiocarbamic acid salts. J. Org. Chem. 72: 3969–3971. doi.org/10.1021/jo070246n

Harpp, D.N., et al. 1978. Thiocarbonyl transfer reagent. J. Org. Chem. 43: 337–339. doi.org/10.1021/jo00396a035

Hooz, J., et al. 1986. A rapid, mild procedure for the preparation of alkyl chlorides and bromides. Can. J. Chem. 46: 1968–1969. doi.org/10.1139/v68–017

Johnson, T.B., et al. 1932. Nitro and amino triphenylguanidines. J. Am. Chem. Soc. 54: 777–787. doi.org/10.1021/ja01341a048

Kim, S., et al. 1986. l, l, –Thiocarbonyldi–2,2, –pyridone. A new useful reagent for functional group conversions under essentially neutral conditions. J. Org. Chem. 51: 2613–2615. doi.org/10.1021/jo00363a046

Li G., et al. 1997. An improved procedure for the preparation of isothiocyanates from primary amines by using hydrogen peroxide as the dehydrosulfurization reagent. J. Org. Chem. 62: 4539–4540. doi.org/10.1021/jo970100w

Liu, Q., et al. 2008. Carbon tetrabromide promoted reaction of amines with carbon disulfide: facile and efficient synthesis of thioureas and thiuram disulfides. Synthesis 22: 3579–3584. doi.org/10.1002/chin.200913081

Patel, K., et al. 2008. Desulfurization mediated by hypervalent iodine (iii): a novel strategy for the construction of heterocycles. Eur. J. Org. Chem.: 6189–6196. doi.org/10.1002/ejoc.200800901

Patel, K., et al. 2009. Molecular iodine mediated preparation of isothiocyanates from dithiocarbamic acid salts**.** Eur. J. Org. Chem.: 1849–1851. doi.org/10.1002/ejoc.200801270

Rudaraju, R., et. al. 2017. Copper promoted desulfurization towards the synthesis of isothiocyanates. Tetrahedron Lett. 58: 125–128. doi.org/10.1016/j.tetlet.2016.11.086

Wu, J., et al. 2007. Metal and solvent–free conditions for the acylation reaction catalyzed by carbon tetrabromide (CBr_4). Green Chem. 9: 1022–1025. doi.org/10.1039/B702646C

Xu, J., et al. 2018. $Na_2S_2O_8$–mediated efficient synthesis of isothiocyanates from primary amines in water. Green Chem. 20: 4484–4491. doi.org/10.1039/C8GC02261E

Synthesis of 5–phenoxy primaquine as an anti-malarial agent

Somruedee Jansongsaeng[a], Nitipol Srimongkolpithak[b], Jutharat Pengon[b], Sumalee Kamchonwongpaisan[b], Tanatorn Khotavivattana[a,*]

[a]Center of Excellence in Natural Products Chemistry, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

[b]National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), Pathum Thani 12120, Thailand.

*Corresponding author. E–mail address: tanatorn.k@chula.ac.th

Abstract

Currently, the development of new anti–malarial agent is highly in demand. To improve the efficacy of primaquine, one of the commonly used anti–malarial drugs, the effect of the substituted phenoxy group at position 5 of primaquine derivative has been studied. 5–phenoxy primaquine (1) was successfully synthesized over six steps, including oxidation, nucleophilic aromatic substitution, reduction, *N*–alkylation, reductive amination, and deprotection, with the overall yield of 14 %. The structure of 1 was then confirmed by ^{1}H and ^{13}C NMR, and HRMS. After that, 1 was transformed into its hydrochloride salt (2). All compounds including primaquine were evaluated for their anti–malarial activity using Malaria SYBR Green I–base fluorescence (MSF) assay against *P. falciparum* 3D7 in blood–stage. It was found that 1 (IC_{50} = 3.65±0.39 μM) and 2 (IC_{50} = 1.18±0.44 μM) exhibited 3–fold and 10–fold greater inhibitory effects than that of primaquine (IC_{50} = 11.33±0.79 μM), respectively. Thus, the presence of the phenoxy group in position 5 can enhance the inhibition of malarial parasite and the 5–phenoxy primaquine could be used as a scaffold for further drug discovery study in the future.

Keywords: Anti–malarial activity, Drug discovery, Primaquine, Total synthesis

Introduction

Malaria continues to be one of the global health challenges, and approximately half of people worldwide is at risk of such disease. The infection in human is caused by five different types of *Plasmodium spp*. The most fetal species is *P. falciparum*, which has developed resistance against almost anti–malarial drugs in current use, whereas *P. vivax* is the most persistent and recurrence. (White et al., 2004) Currently, there is a limited number of effective available antimalarial drugs due to several reasons such as the increased spread of drug–resistant malaria parasites, and adverse drug reaction of current anti–malarial drugs.

Primaquine (3, Fig.1) is the only drug with radical curative activity against *P. vivax* and *P. ovale* infection but has relatively weak blood schizontocidal activity against *P. falciparum*. (Vennerstrom et al.,1999) Moreover, the use of PQ is limited by the induction of hemolysis in people with G6PD deficiency, affecting over 400 million people in the world. (Recht et al., 2018) Up to date, the mechanism of action of PQ remains unclear. A report from Camarda et al, (2019) group proposed that PQ is activated by CYP2D6, to produce 5–hydroxylated metabolites. Then, redox oxidation of the unstable metabolites produces cellular hydrogen peroxide (H_2O_2) to kill malaria parasites occurring at the liver and bone marrow via a two–step biochemical relay. Recently, tafenoquine (4, Fig.1), a phenoxy analogue of PQ, has been approved as a drug with superior activity to PQ with longer elimination half–life, a better therapeutic index, and the activity against both liver and blood stage of *P. vivax* and *P. falciparum*. (Frampton, 2018) These results indicate that the presence of the 3–(trifluoromethyl)phenoxy group at position 5 significantly improved the anti–malarial efficacy of primaquine. However, there were no reports on the structure–activity relationship associated with the substituent group on the phenoxy ring. Herein, we synthesized 5–phenoxy primaquine via total synthesis to study the effect of this substituent. We will compare the anti–malarial activity of 5–phenoxy primaquine in the free base form (1) with its hydrochloride salt (2) to gain knowledge of the correlation between structure and the antimalarial efficacy.

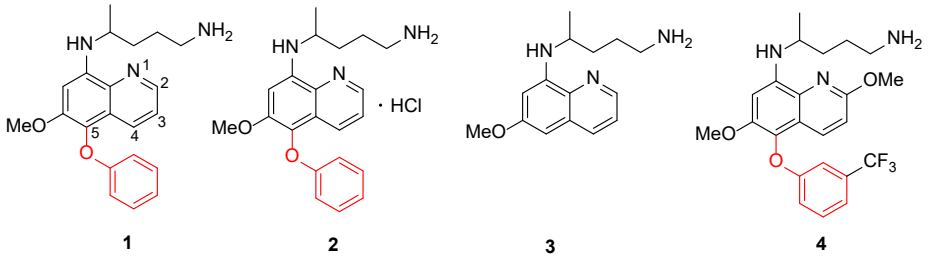


Fig. 1 (1) 5–Phenoxy primaquine (5–Ph PQ); (2) 5–phenoxy primaquine hydrochloride salt; (3) Primaquine (PQ); (4) tafenoquine

Materials and Methods

Materials

All reagents and solvents were obtained from Sigma–Aldrich (St. Louis, MO, USA), TCI chemicals (Tokyo, Japan), Fluorochem (Hadfield, Derbyshire, UK) and Merck (Darmstadt, Germany). All solvents for column chromatography from RCI Labscan (Samutsakorn, Thailand) were distilled before use. Reactions were monitored by thin–layer

chromatography (TLC) using aluminium Merck TLC plates coated with silica gel 60 F254. Normal phase column chromatography was performed using silica gel 60 (0.063–0.200 mm, 70–230 mesh ASTM, Merck, Darmstadt, Germany). Proton and carbon nuclear magnetic resonance (^{1}H and ^{13}C NMR) spectra were recorded on a Bruker Advance (III) 400WB spectrometer and Jeol JNM–ECZ500/S1 (500 MHz). Chemical shifts were expressed in parts per million (ppm), *J* values were in Hertz (Hz). High–resolution mass spectra (HRMS) were obtained with a micrOTOF–Q II mass spectrometer (Bruker Daltonics) with electrospray ionization.

Experimental procedure for the synthesis of 5–phenoxy primaquine 1

5–Chloro–6–methoxy–8–nitroquinoline (B) was synthesized using a modified procedure from Roberts et al, (1996). A solution of 6–methoxy–8–nitroquinoline (8.1 g, 40 mmol, 1.0 equiv.) in anhydrous DMF (10 mL) in a dry round bottom flask was purged with nitrogen gas, then the solution was heated at 60°C. *N*–chlorosuccinimide (8.0 g, 60 mmol, 1.5 equiv.) was added in portion–wise (3 times) into the solution. Next, the reaction mixture was stirred at 60°C for 3 hr. The reaction mixture was allowed cooling to room temperature, extracted with CH_2Cl_2, and washed with water. The combined organic layers were dried over anhydrous $MgSO_4$, concentrated to give B as a yellow solid (661 mg, 74% yield). ^{1}H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ 8.99 (dd, *J* = 4.1, 1.4 Hz, 1H, ArH), 8.62 (dd, *J* = 8.7, 1.6 Hz, 1H, ArH), 7.90 (s, 1H, ArH), 7.61 (dd, *J* = 8.7, 4.1 Hz, 1H, ArH), 4.11 (s, 3H, OCH_3); ^{13}C NMR (101 MHz, $CDCl_3$) δ 151.66, 150.95, 147.12, 135.19, 132.19, 127.88, 123.57, 120.57, 111.43, 57.44. ^{1}H data is consistent with the literature values (O'Neill et al., 1998).

6–Methoxy–8–nitro–5–phenoxyquinoline (C) was synthesized using a modified procedure from Zhu et al, (2014). A solution of B (715.9 mg, 3 mmol, 1.0 equiv.) in DMSO in a round bottom flask was stirred at room temperature for 15 minutes. Then a solution of phenol (282.0 mg, 3 mmol, 1.0 equiv.) and $LiOH{\cdot}H_2O$ (126 mg, 3 mmol, 1.0 equiv.) in DMSO was added dropwise into a solution of the starting material. The reaction mixture was stirred at 100ºC for 4 hr. The reaction was quenched with water and extracted with CH_2Cl_2 3 times. The combined organic layers were washed with 10% NaOH (aq.) (3 times) and brine, dried over anhydrous $MgSO_4$, filtered, and concentrated. The crude product was further purified by column chromatography (eluent: EtOAc:hexanes = 1:9 to 1:4) on silica gel to afford the C as a yellow solid (661 mg, 74% yield). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ 9.01 (d, *J* = 2.8 Hz, 1H, ArH), 8.37 (dd, *J* = 8.6, 1.3 Hz, 1H, ArH), 8.04 (s, 1H, ArH), 7.48 (dd, *J* = 8.6, 4.1 Hz, 1H, ArH), 7.30 (t, *J* = 8.0 Hz, 2H, ArH), 7.07 (t, *J* = 7.4 Hz, 1H, ArH), 6.85 (d, *J* = 7.9 Hz, 2H, ArH), 3.94 (s, 3H, OCH_3); ^{13}C NMR (101 MHz, $CDCl_3$) δ 158.09, 151.19, 147.70, 139.70, 130.60, 129.80, 124.92, 122.88, 115.13, 113.95, 57.39.

6–Methoxy–5–phenoxyquinolin—amine (D) was synthesized using a modified procedure from Fave et al, (2007). A solution of C (450.0 mg, 1.52 mmol, 1.0 equiv.) and absolute ethanol in a round bottom flask was slowly added 12M HCl (aq.) at 0ºC. Then Sn powder (1.8 g, 15.2 mmol, 10.0 equiv.) was added into the reaction. The reaction mixture was then allowed to stir at room temperature for 30 minutes. The reaction was quenched with 12M NaOH(aq) until the solution becomes neutral (pH = 7). The resulting mixture was filtered through glass Büchner filter funnel. The filtrate was then extracted with EtOAc (3 times). The combined organic layers were washed with water, dried over anhydrous $MgSO_4$, filtered, and

concentrated to give D as a brown viscous oil (379 mg, 94% yield). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ 8.62 (dd, *J* = 4.1, 1.6 Hz, 1H, ArH), 8.11 (dd, *J* = 8.5, 1.5 Hz, 1H, ArH), 7.35–7.20 (m, 3H, ArH), 6.97 (t, *J* = 7.3 Hz, 1H, ArH), 6.85 (d, *J* = 7.8 Hz, 2H, ArH), 6.80 (s, 1H, ArH), 3.87 (s, 3H, OCH_3); ^{13}C NMR (101 MHz, $CDCl_3$) δ 159.29, 150.20, 145.12, 142.58, 130.42, 129.49, 121.84, 121.60, 114.85, 98.82, 56.80.

2–(4–Oxopentyl)isoindoline–1,3–dione (E) was synthesized using a modified procedure from Wang et al, (2005). A solution of potassium phthalimide (5.0 g, 27 mmol, 1.0 equiv.) in anhydrous DMF (10 ml) in a dried round bottom flask was added potassium carbonate (7.4 g, 54 mmol, 2.0 equiv.). The reaction mixture stirred at room temperature for 30 minutes. Then, 5–chloro–2–pentanone (7.6 mL, 67.5 mmol, 2.5 equiv.) was added and stirring at 100°C. The reaction mixture was quenched with ice water. The crude compound was collected by filtration. The crude product was further purified by column chromatography (eluent: EtOAc:hexanes = 1:9 to 1:4) on silica to afford E as white solid (4.3 g, 70% yield). ^{1}H NMR (400 MHz, DMSO–d6) δ 6.97 (dq, *J* = 6.2, 4.8 Hz, 4H, ArH), 2.67 (t, *J* = 6.8 Hz, 2H, CH_2N), 1.61 (t, *J* = 7.1 Hz, 2H, CH_2CO), 1.17 (s, 3H, CH_3CO), 0.89 (q, *J* = 6.9 Hz, 2H, CH_2CH_2); ^{13}C NMR (126 MHz, DMSO–d6) δ 208.17, 168.57, 134.84, 132.18, 123.49, 37.32, 30.24, 22.60.

2–(4–((6–Methoxy–5–phenoxyquinolin–8–yl)amino)pentyl)isoindoline–1,3–dione (F) was synthesized using a modified procedure from Song et al (2015). A solution of D (75 mg, 0.28 mmol, 1.0 equiv.) and E (260 mg, 1.12 mmol, 4.0 equiv.) were dissolved in anhydrous MeOH (2.5 mL) in a dry round bottom flask. Then, acetic acid (16 µL, 0.28 mmol,1.0 equiv.) was added into the reaction mixture. After stirring at 50ºC for 2 hr, the mixture was cooled down to room temperature and added $NaBH_3CN$ (35 mg,0.56 mmol, 2.0 equiv.). The solution was stirred at room temperature overnight. The mixture was diluted with EtOAc, washed with water and brine. The combined organic layers were dried over MgSO4, filtered, and concentrated under reduced pressure to afford crude product, which was further purified by column chromatography (eluent: EtOAc:hexanes = 1:9 to 1:4) on silica gel to afford the product F as a yellow oil (75 mg, 57% yield). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ 8.54 (d, *J* = 4.1 Hz, 1H, ArH), 8.06 (s, 1H, ArH), 7.82 (dd, *J* = 5.3, 3.1 Hz, 2H, ArH), 7.70 (dd, *J* = 5.4, 3.1 Hz, 2H, ArH), 7.24 (dd, *J* = 13.8, 6.1 Hz, 3H, ArH), 6.96 (t, *J* = 7.2 Hz, 1H, ArH), 6.86 (d, *J* = 8.2 Hz, 1H, ArH), 6.47 (s, 1H, ArH), 6.08 (s, 1H, ArH), 3.90 (s, 3H, OCH_3), 3.75 (dd, J = 12.6, 5.6 Hz, 3H, –CH_2N overlap with –CHN), 1.88 (ddd, *J* = 22.0, 12.7, 6.6 Hz, 2H, CH_2), 1.61 (brs, 2H, CH_2), 1.35 (d, *J* = 6.3 Hz, 3H, CH_3).

N^{4}–(6–Methoxy–5–phenoxyquinolin–8–yl)pentane–1,4–diamine (1) was synthesized using a modified procedure from Shiraki et al, (2011). Compound F (24 mg, 0.05 mmol, 1.0 equiv.) was dissolved EtOH in a round bottom flask. Hydrazine monohydrate (8 µL, 0.165 mmol, 3.3 equiv.) was added into a solution and the mixture was heated at reflux for 1 hr. A solid precipitate was observed. Then, the solution was cooled to room temperature and filtered through cotton. The filtrate was concentrated to give the crude product as a viscous oil. The crude product was purified by column chromatography (eluent: 5% to 50% MeOH:CH_2Cl_2) on silica gel to give 1 as yellow oil (24 mg, 68% yield). ^{1}H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ 8.56 (dd, *J* = 4.1, 1.0 Hz, 1H, ArH), 8.07 (dd, *J* = 8.4, 1.2 Hz, 1H, ArH), 7.31–7.24 (m, 3H, ArH), 6.99 (td, *J* = 7.4, 0.7 Hz, 1H, ArH), 6.90 (d, *J* = 8.6 Hz, 2H, ArH), 6.49 (s, 1H, ArH), 6.10 (s, 1H, NH), 3.93 (s, 3H, OCH_3), 3.72 (s, 1H, CH), 2.85 (t, *J* = 6.7 Hz, 2H, CH_2), 1.84 – 1.65 (m, 4H,

CH_2), 1.37 (d, J = 6.3 Hz, 3H, CH_3); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ159.49, 150.54, 144.86, 143.09, 133.82, 129.88, 129.55, 124.70, 124.48, 122.07, 121.54, 114.92, 93.74, 57.09, 48.19, 41.62, 34.15, 28.85, 20.65; HRMS (ESI^+): *m/z* calcd for $C_{21}H_{26}N_3O_2^+$ $[M+H]^+$ 352.2025, found 352.2020.

Experimental procedure for the synthesis of 5–phenoxy primaquine hydrochloride salt 2

5–Phenoxy primaquine hydrochloride salt 2 was synthesized using a modified procedure from Patnaik et al. (2013). A solution of 1M HCl in Et_2O (1080 µL, 0.108 mmol, 1.0 equiv.) was added into a solution of 1 (33 mg, 0.09 mmol, 1.0 equiv.) in a small amount of CH_2Cl_2. The reaction mixture was then stirred at room temperature for 2 hr. A mixture was separated into two layers consist of a brown viscous oil in the bottom layer and a red solution on the top layers which was further concentrated to give the crude product as a red viscous oil (9.2 mg, 26% yield.).

Evaluation of anti–malarial activity of synthesized compound

Biological testing was performed using Malaria SYBR Green I–base fluorescence (MSF) assay (Smilkstein et al., 2004). Fluorescence signal was measured with a Synergy Mx Monochromator–Based Multi–Mode Microplate Reader (BioTek) with excitation and emission wavelength at 485 and 530 nm, respectively, and a gain setting equal to 50. The background fluorescence from the non–parasitized erythrocytes was subtracted to yield fluorescence counts for analysis. The SYBR Green I signal from drug–treated parasites was normalized to untreated control parasite in the same experiment. A nonlinear regression model (sigmoidal dose–response/variable slope; GraphPad Prism5) was used to calculate the 50% inhibition concentration (IC_{50}).

Results and Discussion

Chemistry

The synthesis of the 5–phenoxy primaquine (5–Ph PQ) is shown in Fig. 1. The commercially available 6–methoxy–8–nitroquinoline A was first chlorinated with *N*–chlorosuccinimide (NCS). The position 5 and 7 at quinoline ring is favored position by the electronic effect of 6–OMe group, but the position 7 is sterically hindered from neighboring group. Therefore, the chlorinated product B has been occurred as a major product at only position 5 in good yield (74%). Next, product B was further used for synthesis 5–phenoxy analog of primaquine C *via* nucleophilic aromatic substitution reaction (S_NAr) with phenol under basic condition. The first attempt using anhydrous DMF as a solvent was unsuccessful. The chlorinated product B was not reacted with the phenol, due to the insolubility of the base, $LiOH·H_2O$. Therefore, the solvent was changed to dimethyl sulfoxide. At 100ºC, both the starting material B and LiOH was well dissolved, and the reaction proceeded to give the intermediate C in good yield (74%).

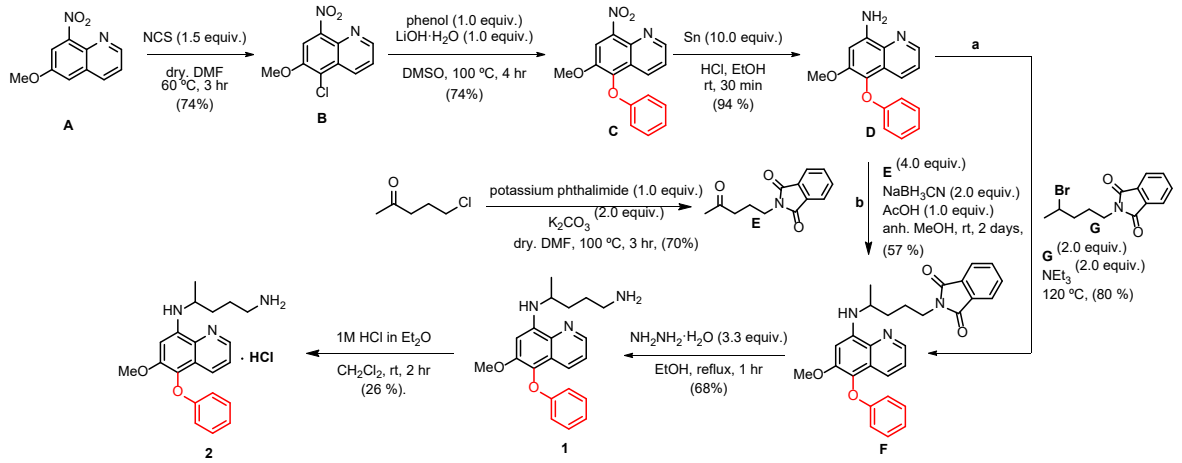


Fig. 2 Synthesis of 5–phenoxy primaquine 1 and its hydrochloride salt (2)

Subsequently, the nitro group was reduced using Sn in concentrated HCl to generate amine compound D in excellent yield (94%). Next, incorporation of the alkyl side chain to the 8–amino group D was attempted *via* alkylation (a) and reductive amination (b). The amine compound D was initially alkylated by G in small scale reaction using a reaction tube under neat condition at 120ºC to give the phthalimide protected terminal amino F in good yield (80%). However, the later scale–up was unsuccessful because the mixture cannot be stirred efficiently under neat conditions. Therefore, reductive amination was attempted as an alternative pathway. This reaction was taken place by the nucleophilic addition reaction between nucleophilic nitrogen D and the electrophilic carbonyl E (prepared by *N*–alkylation of potassium phthalimide with 1,4–dibromopentane) to generate an imine intermediate. However, for this step, reaction at room temperature was too slow, so the temperature was increased to 50ºC to accelerate the imine formation. The iminium produced was then reduced by sodium cyanoborohydride ($NaBH_3CN$) as a mild reducing agent to produce F in moderate yield (57%). Finally, the phthalimide deprotection of F was achieved using hydrazine monohydrate to give the desired 5–phenoxy primaquine as a free base form 1 in good yield (68%). Compound 1 gave an $[M+H]^+$ as the major ion at *m/z* 352.2020 in the micrOTOF–Q II MS, confirming the chemical formula of $C_{21}H_{26}N_3O_2$ (calcd for $C_{21}H_{26}N_3O_2$, *m/z* 352.2025). The ^1H NMR spectra (Fig. 2) displayed resonances for 22 protons that were classified as 13 nonequivalent protons without proton that directly connected to the nitrogen atom. Four nonequivalent protons of quinoline ring and three nonequivalent protons of phenoxyl group appear at 8.51 ppm (1H), 8.02 ppm (1H), 7.23 ppm (3H), 6.94 ppm (1H), 6.85 ppm (2H), 6.44 ppm (1H), and 6.05 ppm (1H). The 6–OMe is confirmed by singlet signal of three protons at 3.88 ppm. Importantly, the presence of amino alkyl side chain is confirmed by the five characteristic peaks at 3.67 ppm (1H), 2.80 ppm (2H), 1.80 – 1.62 (4H), and 1.32 (3H). Finally, 2 was successfully synthesized by protonation of 1 using 1M HCl in Et_2O.

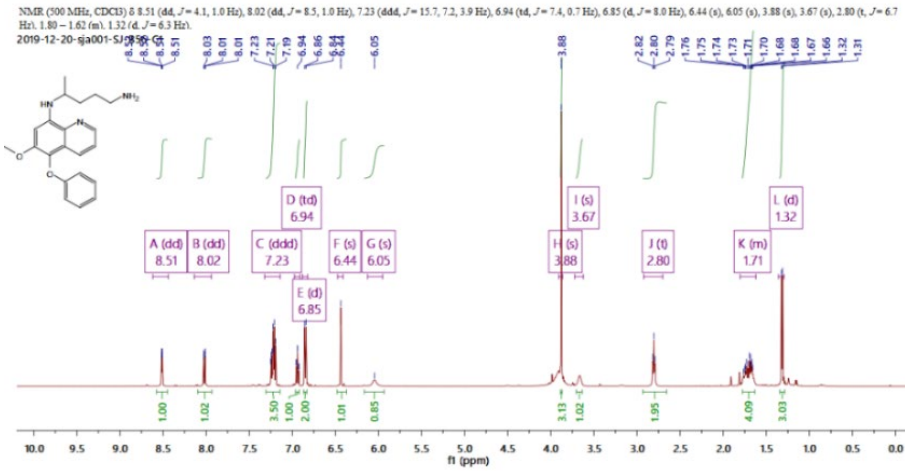


Fig. 3 ^{1}H NMR spectrum of 5–phenoxy primaquine (1) in $CDCl_3$

Anti–malarial activity

Table 1 Antimalarial activity of synthesized compound

Compound	IC_{50} µM
	P. falciparum 3D7 (blood stage)
5–Ph PQ (1)	3.65 ± 0.39
5–Ph PQ HCl salt (2)	1.18 ± 0.44
$PQ{\cdot}2H_3PO_4$ (3)	11.33 ± 0.79

The synthesized compounds including primaquine as a standard drug were evaluated for their anti–malarial activity against *P. falciparum* 3D7 in blood–stage. The result revealed that the presence of 5–phenoxy group in 1 and 2 led to 3–fold and 10–fold greater inhibitory effects than that of primaquine (3), respectively. This result also indicated that the phenoxy group without any substituent on the ring provided blood stage activity comparable to tafenoquine (4, Fig.1), a structure that contains 3–CF_3 on the phenoxy ring with IC_{50} of asexual stage *P. falciparum* 3D7 equal to 1.72 ± 321.3 µM. (Kemirembe et al., 2017) Therefore, blood schizontocide activity of primaquine is increased by inducing phenoxy group to their structure; however, more study needs to be conducted in order to understand more about the effect of the substituent group on the ring. Moreover, the hydrochloride salt compound shows higher activity than that of the free base form, which could be due to the increased solubility of the compound in aqueous media.

5–phenoxy primaquine (1) was successfully synthesized over six steps, with the overall yield of 14 %. Then, compound 1 was transformed into its hydrochloride salt (2). Both of 1 and 2 were evaluated for their anti–malarial activity against *P.* falciparum 3D7 in blood–stage. As a result, 1 (IC_{50} = 3.65 ± 0.39 µM) and 2 (IC_{50} = 1.18 ± 0.44 µM) exhibited 3–fold and 10–fold greater inhibitory effects than that of primaquine (IC_{50} = 11.33 ± 0.79 µM), respectively. Thus, the presence of the phenoxy group in position 5 can enhance the inhibition of malarial parasite and the 5–phenoxy primaquine could be used as a scaffold for further drug discovery study in the future.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgement

This work was supported by Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST) scholarship, National Science and Technology Development Agency (NSTDA) No. SCA–CO–2562–9780–TH, in collaboration with National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, and the 90th Anniversary of Chulalongkorn University Scholarship.

References

Camarda, G., Jirawatcharadech, P., Priestley, R.S., Saif, A., March, A., Wong, M.H.L., Leung, S., Miller, A.B., Baker, D.A., Alano, P., Paine, M.J.I., Bhatia, S.N., O'Neill, P.M., Ward, S.A., Biagini, G.A. 2019. Antimalarial activity of primaquine operates via a two–step biochemical relay. Nat. Commun. 10: 1–10. doi.org/10.1038/s41467-019-11239-0

Elderfield, R.C., Mertel, E., Mitch, R.T., Wempen, I.M., Werble, E. 1955. Synthesis of primaquine and certain of its analogs. J. Am. Chem. Soc. 77: 4816–4819. doi.org/10.1021/ja01623a038

Fave, C., Leroux, Y., Trippe´, G., Randriamahazaka, H., Noel, V., Lacroix, J.C. 2007. Tunable electrochemical switches based on ultrathin organic films. J. Am. Chem. Soc. 129: 1890–1891. doi.org/10.1021/ja068143u

Frampton, J.E. 2018. Tafenoquine: first global approval. Drugs. 78: 1517–1523. doi.org/10.1007/s40265–018–0979–2

Kemirembe, K., Cabrera, M., Cui, L. 2017. Interactions between tafenoquine and artemisinin–combination therapy partner drug in asexual and sexual stage *Plasmodium falciparum*. Int J Parasitol Drugs Drug Resist. 7: 131–137. doi.org/10.1016/j.ijpddr.2017.03.002

O'Neill, P.M., Storr, R.C., Park, B.K. 1998. Synthesis of the 8–aminoquinoline antimalarial 5–fluoroprimaquine. Tetrahedron. 54: 4615–4622. doi.org/10.1016/S0040-4020(98)00177-X

Patnaik, S., Marugan, J.J., Liu, K., Zheng, W., Southall, N., Dehdashti, S.J., Thorsell, A.T., Heilig, M., Bell, L., Zook, M., Eskay, B., Brimacombe, K.R., Austina, C.P. 2013. Structure activity relationship of imidazo–pyridinium analogs as antagonists of neuropeptide S receptor. J. Med. Chem. 56: 9045–9056. doi: 10.1021/jm400904m

Powell, D.A., Fu, G.F. 2004. Nickel–catalyzed cross–couplings of organosilicon reagents with unactivated secondary alkyl bromides. J. Am. Chem. Soc. 126: 7788–7789. doi.org/10.1021/ja047433c

Recht, J., Ashley, E.A., White, N.J. 2018. Use of primaquine and glucose–6–phosphatedehydrogenase deficiency testing: Divergentpolicies and practices in malaria endemiccountrie. PLoS Negl Trop Dis. 12: 1–27. doi.org/10.1371/journal.pntd.0006230

Roberts, D., Alvarez, M., Joulea, J.A. 1996. Synthesis of 6–chloro–1,3,4,5–tetrahydro–7,8–dimethoxy–1–methylpyrrolo[4,3,2–de]quinoline from a quinoline; formal total syntheses of batzelline C, isobatzelline C, discorhabdin C and makaluvamine D. Tetrahedron Lett. 37: 1509–1512. doi.org/10.1016/0040–4039(96)00051–2

Shiraki, H., Kozar, M.P., Melendez, V., Hudson, T.H., Ohrt, C., Magill, A.J., Lin, A.J. 2011. Antimalarial activity of novel 5–aryl–8–aminoquinoline derivatives. J. Med. Chem. 54: 131–142. doi.org/10.1021/jm100911f

Smilkstein, M., Sriwilaijaroen, N., Kelly, J.X., Wilairat, P., Riscoe, M. 2004. Simple and inexpensive fluorescence–based technique for high–throughput antimalarial drug screening. Antimicrob. Agents Chemother. 48: 1803–1806. doi: 10.1128/AAC.48.5.1803–1806.2004

Vennerstrom, J.L., Nuzum, E.O., Miller, R.E., Dorn, A., Gerena, L., Dande, P.A., Ellis, W.Y., Ridley, R.G., Milhous, W.K. 1999. 8–aminoquinolines active against blood stage *plasmodium falciparum* in vitro inhibit hematin polymerization. Antimicrob. Agents Chemother. 43: 598–602. doi: 10.1128/AAC.43.3.598.

White, N.J. 2004. Antimalarial drug resistance. J. Clin. Invest. 113: 1084–1092. doi: 10.1172/JCI21682

Zhu, W., Wang, J., Wang, S., Gu, Z., Acen, J.L., Izawa, K., Liu, H., Soloshonok, V.A. 2014. Recent advances in the trifluoromethylation methodology and new CF_3–containing drugs. J. Fluor. Chem. 167: 37–54. doi.org/10.1016/j.jfluchem.2014.06.026

Characterization of cytolysin A and green fluorescent protein-inserted Outer Membrane Vesicles isolated from different strains of *Escherichia coli*

Sunisa Hankan, Kornkrich Rattanapan, Thanapong Sanongkhun, Anunya Sarpthipratana, Wanatchaporn Arunmanee*
Department of Biochemistry and Microbiology, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: wanatchaporn.a@chula.ac.th

Abstract

Outer membrane vesicles (OMVs) are currently used for developing vaccine delivery system. OMVs are produced from gram-negative bacteria containing lipopolysaccharides (LPS), which activate the host immune responses and show immunogenic hyper-reactivity. In this study, we characterized OMVs produced from *Escherichia coli* (*E. coli*) strains BL21-DE3 and BZB1107 expressing the OMVs with or without the outer membrane proteins (OMPs), respectively. OMPs plays an important role in the organization of outer membrane of *E. coli* hence they could also be important for OMVs. In this regard, we produced Cytolysin A (ClyA), which is an anchor antigen on the surface of OMVs, by fusing GFP at the C-terminus and expressed in *E. coli*. The characterization of isolated OMVs by dynamic light scattering (DLS) revealed the size distribution of OMVs from BL21-DE3 and BZB1107 with diameters of 40 to 290 nm and 43 to 190 nm, respectively. In addition, morphology of OMV proteins was assessed by transmission electron microscope (TEM), which could confirm the size of OMVs. However, further progress requires the immunogenic studies of both OMVs in vitro to confirm the efficacy and safety of the OMVs proteins, which has the potential to be a vaccine delivery system in the clinical applications.

Keywords: Gram-negative bacteria, Outer Membrane Vesicles, Vaccine delivery system

Introduction

Vaccine can activate adaptive immunity to memorize and recognize antigen from pathogen. Subunit vaccine is produced from purified antigen. Theoretically, most of protein antigens triggers adaptive immune response and T cell (Baxter, 2007). Apart from effectiveness, vaccine delivery system is also important for enhancing immune stimulatory capacity of vaccine. Here, we are interested in developing the efficiency of vaccine delivery system using outer membrane vesicles (OMVs) to carry vaccine to directly target immune cells. The OMVs are derived from Gram-negative bacteria with a diameter of 20–200 nm, which can penetrate to lymph vessels and can be recognized and captured by the antigen presenting cells (Kuehn and Kesty, 2005; Baxter, 2007; Bachmann and Jennings, 2010). Membrane vesicles comprises of phospholipids, polysaccharides, and outer membrane protein (OMP) (Kulp and Kuehn, 2010). All of these components can stimulate both humeral immune response and cell-mediated immune responses (Ellis and Kuehn, 2010). At present, OMV product for the use of vaccine delivery system has been approved by Food and Drug Administration (FDA). For example, vaccine for Neisseria meningitides serogroup B (Meningitis B Vaccine), which has been commercially available, also known as BEXSERO®, also uses OMV as the delivery platform (Gorringe and Pajon, 2012). Nevertheless, the main issue in vaccine development from OMVs is LPS-mediated hyperimmune reactivity, unwanted OMV-associated immunogens, batch-to-batch consistency of OMV production, and biodiversity of each strain that has various specific antigen. Therefore, genetic engineering of OMVs may be able to improve the effective vaccine delivery system for human diseases. In this research project, ClyA-GFP fusion protein, which can be a representative antigen will be inserted into OMVs derived from different strains of bacteria. Furthermore, OMVs used in this study will be made from BZB1107 and BL21-DE3 strains of *Escherichia coli*. Several studies indicated that OMVs was capable of activating innate immune responses (Galdiero et al., 2012). In fact, the surface of OMV derived from bacterial outer membrane usually contains a variety of outer membrane proteins (OMPs), which may sometimes act as either adjuvant or immuno-toxicogenic mediators (Gerritzen et al., 2017; Sinha et al., 2017; Portnyagina et al., 2018; Elizagaray et al., 2020; Malekan et al., 2020). Accordingly, it has never been clear whether OMPs have beneficial or harmful impact on the structure and stability of OMV. In addition, effect of existing OMPs on the surface of OMVs on the quality and morphology of the functional OMV platform has never been fully elucidated yet. Therefore, it is necessary to identify and compare the effects of OMP-expressing OMVs and OMVs alone that may influence to vaccine effectiveness. Because several types of OMPs such as OmpF that produces host immunogenic reaction endogenously express on the surface of OMVs and its impacts on OMV stabilization and morphology have never been investigated. To achieve this goal, we compared two strains of *E. coli* including BZB1107 (without OMP expression) and BL21-DE3 (having OMP expression) as sources for production of OMVs. The main aim of this work is to produce and characterize the properties of OMV containing ClyA-GFP-6xHistidine tag produced from BZB1107 and BL21-DE3 strains. After OMV was produced by both strains, we may be able to demonstrate whether OMP affects OMV-mediated vaccination and its morphology. The knowledge from this study may lead to the successful development of the safely effective vaccine and its delivery system in the future.

Materials and Methods

Plasmid construction and OMV production

The cloning plasmid pUC57 was cut at its restriction sites NcoI and NdeI to remove the fragment of ClyA-GFP-6xHistidine tag. Then, the sequence of ClyA-GFP-6xHistidine tag was inserted into pET-15b, which was linearized by a cut of NcoI and NdeI restriction sites. Of note, pET-15b is specific to *E.coli* BL21DE3. The pMS119 plasmid was linearized by restriction digestion at the sequence between EcoRI and Hind III to remove the original OmpF sequence. To make the insert for plasmid construction, the sequence of ClyA-GFP-6xHistidine tag in the pET-15b plasmid was amplified using PCR. Primers for amplification of this insert were 5′-CAGGAATTCATGACCGAGATTGTGGCGGATAAG-3′ (Forward primer) and 5′-CAGAAGCTTTTAGTGGTGGTGGTGGTGGTGGC-3′ (Reverse primer). This plasmid construction was performed ligase-dependent cloning. For validation, the newly plasmid construct was cut by restriction digestion at the sequence of ClyA-GFP-6xHistidine tag between EcoRI and Hind III sites. Specific fragments of the new construct were observed by agarose gel electrophoresis. To confirm the result, this construct was also sequenced by Sanger sequencing.

OMV Production

The pMS119 and pET15b plasmids containing ClyA-GFP-6xHistidine tag were transformed into *E. coli* competent cells including BZB1107 and BL21-DE3 strains of *E. coli*, respectively. Inoculation of both strains into 300 mL TB broth containing ampicillin in dilution of 1:1,000 was performed and incubated at 37 °C with 250 rpm shaking until OD_{600} value of bacterial culture was ~ 0.6. IPTG (0.5 mM) used as an inducer of protein expression was added into bacterial culture flask. Bacteria was cultured with IPTG at 37°C with shaking at 250 rpm for 8–14 hours. After induction, host bacterial cells were centrifuged at 8,000×g for 30 minutes at 4°C, and supernatant was collected using ultrafiltration membrane that can select particle with size smaller than 100 kDa. Supernatant remaining on filter membrane was centrifuged at 150,000×g for 3 hours, in 4°C. Supernatants was removed and pellets were dissolved in 1 ml PBS. OMV samples in PBS were further characterized.

SDS-PAGE and western blot analysis

SDS-PAGE and western blot analysis was performed to investigate expression of ClyA-GFP-6xHistidine tag, which is a representative antigen used for testing this vaccine delivery system platform. For detection of ClyA-GFP-6xHistidine tag, samples were blocked with 5% non-fat dry milk and stained by mouse anti-6x-His tag monoclonal antibody in dilution of 1:5,000 in blocking buffer. Samples were washed three times using washing buffer. For detection, samples were stained with goat anti-mouse IgG secondary antibody (1:5,000) and incubated with AP substrate and development, and bands were detected.

Dynamic light scattering (DLS)

To evaluate quality of the OMVs by measuring size distribution of the newly synthesized OMVs, DLS experiment was performed. In brief, purified OMV samples were 1:10 diluted in PBS. Moreover, diluted OMVs were transferred to a disposable cuvette.

For measurement, a disposable cuvette that contained OMV was put onto the Malvern zetasizer nano Z590^{TM} to analyze quality of OMVs.

Transmission electron microscope (TEM)

To further confirm the size and morphology of the newly synthesized OMVs, transmission electron microscope (TEM) was used to observe these characteristics of OMVs. Indeed, suspended OMVs were sonicated in water bath sonicator for 30 minutes. OMVs was placed onto the surface of a carbon-coated copper grid. In addition, OMVs were negatively stained with 2% uranyl acetate for 5 minutes at room temperature to allow evaporation of the remaining solution and TEM figure was captured.

Results and Discussion

Evaluation of protein expression of ClyA-GFP-6xHistidine tag in newly synthesized OMVs

To investigate whether antigen (ClyA-GFP-6xHistidine tag) made by cloning expresses on synthesized OMVs derived from BZB1107 and BL21DE3 strains of *E.coli*. The SDS-PAGE and western blot were performed, as shown in Fig. 1A – 1B, without inducer (IPTG; 0.5 mM), expression of ClyA-GFP-6xHistidine tag could be detected in neither BZB1107 nor BL21DE3 cell pellets. On the other hand, with inducer (IPTG; 0.5 mM), ClyA-GFP-6xHistidine tag band was found at ~ 62 kDa in the gel in pellet samples of both strains corresponding to its expected molecular size. According to data obtained, after inducing protein expression by IPTG, both host bacterial strains expressed protein at molecular size of ~ 62 kDa, which is a similar size to our protein of interest. Therefore, it is expected that protein expression may be a ClyA-GFP-6xHistidine tag, which is one of the components of our engineered OMVs. Although protein expression detected in SDS-PAGE with having molecular size of ~ 62 kDa may be another protein with a similar molecular size, western blot analysis was used to confirm the result. Of particular importance, in purified OMV samples from both strains, ClyA-GFP-6xHistidine tag bands were detected by western blot, indicating that development of OMV containing antigen platform was successful. However, in non-IPTG-treated groups, the 62-kDa band was still detected, but the signal were very weak, which resulted from the leakiness of IPTG-inducible promotor.

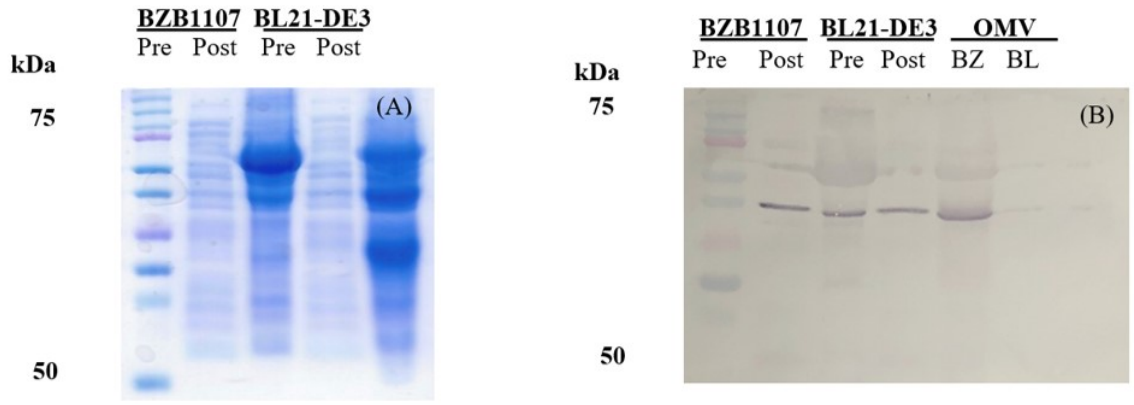


Fig. 1 Protein expression on OMVs. Using SDS-PAGE (A) and Western blot (B)

Observation of OMV size by DLS

As mentioned above, we could produce OMV containing antigen platform. However, it is still unclear that this OMV is in good quality or not. Therefore, DLS was used to test the size distribution. It was found that, in OMV made by BL21DE3 strain, the size distribution of OMVs was 43 to 300 nm in diameter (Fig. 2A). In addition, the size distribution of OMVs was 40 to 200 nm in diameter in BZB1107 strain (Fig. 2B). Specifically, based on data from three independent experiments, the average size of OMVs from BZB1107 and BL21DE3 strains were 86.77 $\pm$ 3.39 and 103.94 $\pm$ 14.7 nm, respectively. Of note, mean number percent of each sizes of OMVs from both strains was shown in Table 1. This indicates that, although sizes of OMVs derived from both strains were quite a bit different, both OMVs were comparable each other and to standard size of normal OMVs.

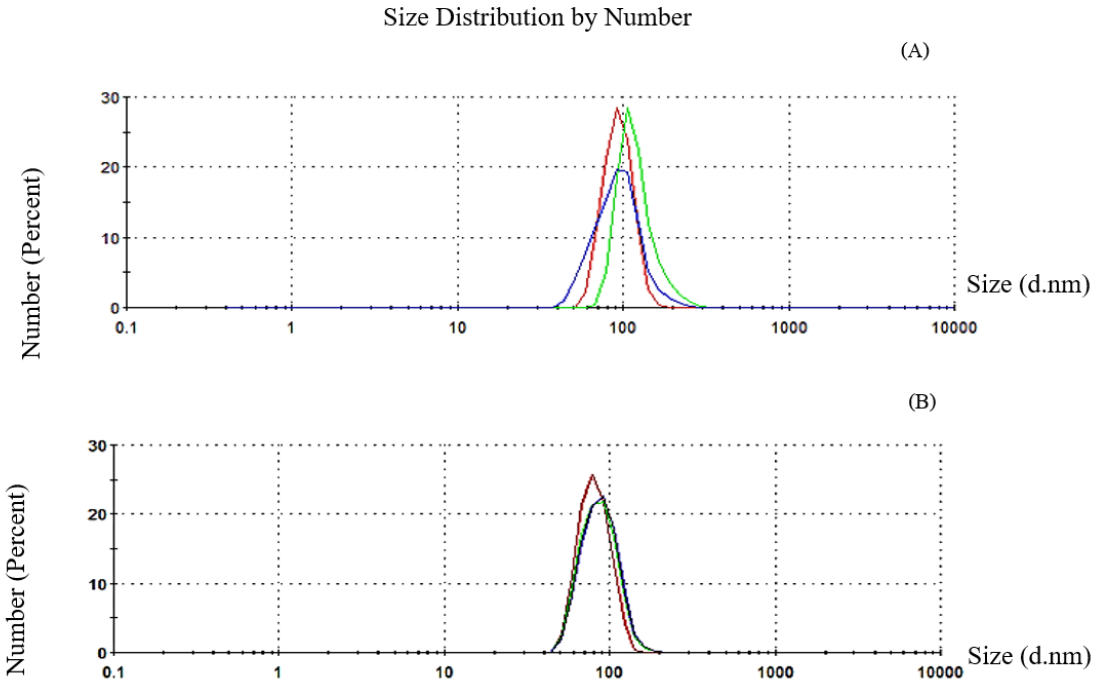


Fig. 2 Characterization of BL21-DE3 (A) and BZB1107 (B) strain in DLS

Table 1 Mean number percent of OMV particles

BZB1107		BL21-DE3	
Size (d.nm)	Mean number percent	Size (d.nm)	Mean number percent
40 - 100	74.80	40 - 100	48.30
101 - 150	24.40	101 - 150	45.50
151 - 190	0.50	151 - 190	4.80
> 190	0.30	> 190	1.20

Ultrastructure of the newly synthesized OMVs derived from BL21DE3 and BZB1107 strains

To investigate the morphology and ultrastructure of OMVs, suspended OMVs samples in DPBS were further analyzed using TEM. It was found that circular morphology of OMVs were visualized as shown in Fig 3. There is structure of two layers of phospholipid in size of around 20 - 100 nm. Of note, size of OMVs from BZB1107 were smaller than those from

BL21DE3, which is in consistent with DLS result. Of note, 20 nm OMVs could be detected in TEM image, but DLS peak at this size was not found. This may be due to indirect measures of the light scattering of DLS. Indeed, both forms of newly synthesized OMVs are mixtures of different sizes of OMV. Based on the principle of DLS, larger particles usually make more weight that may be resulted in increasing average of light scattering pattern. Therefore, in case of the OMV from BZB1107 strain, it is possible if we were unable to detect the smallest particle of OMV in DLS technique.

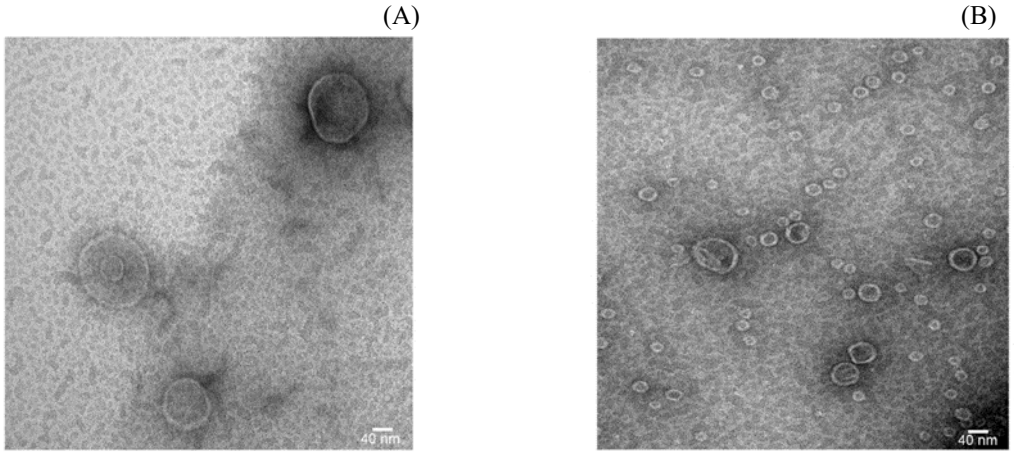


Fig. 3 Ultrastructure of BL21-DE3 (A) and BZB1107 (B) strain in TEM

After purification of OMVs, we tested expression of antigen (ClyA-GFP-6xHistidine tag) on OMVs platforms we made. Furthermore, we also demonstrated characteristics of OMVs including size, morphology, and size distribution by TEM and DLS, respectively. As expected, our newly synthesized OMVs derived from BZB1107 and BL21DE3 strains of *E.coli* were in the same standard of OMVs in term of its characteristics according to previous evidence (Kulp & Kuehn, 2010). Herein, it seems like these OMVs may contain ClyA-GFP-6xHistidine tag. Although this study finished in part of generation of OMV/antigen complex, other characteristics including expression and localization of GFP (a representative antigen) have never been fully elucidated. Finally, this impacts of OMVs containing ClyA-GFP-6xHistidine tag on inducing immunogenic effects is unidentified yet. Nevertheless, further studies are needed to be focused on the impact of differences between both OMV platforms in term of efficacy to deliver the vaccine to the target and its clinical safety. Findings of the end of this project may lead to the successful development of OMV for vaccine delivery system.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank Prof. Dr. Jeremy Lakey from Newcastle university for providing *E. coli* BZB1107.

References

Bachmann, M.F., Jennings, G.T. 2010. Vaccine delivery: A matter of size, geometry, kinetics and molecular patterns. Nat. Rev. Immunol. 10: 787–796. doi:10.1038/nri2868

Baxter, D. 2007. Active and passive immunity, vaccine types, excipients and licensing. Occup Med (Lond). 57: 552–556. doi.org/10.1093/occmed/kqm110

Elizagaray, M.L., Gomes, M.T.R., Guimaraes, E.S., Rumbo, M., Hozbor, D.F., Oliveira, S. C., Moreno, G. 2020. Canonical and non-canonical inflammasome activation by outer membrane vesicles derived from bordetella pertussis. Front Immunol. 11: 1879. doi.org/10.3389/fimmu.2020.01879

Ellis, T.N., Kuehn, M.J. 2010. Virulence and immunomodulatory roles of bacterial outer membrane vesicles. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 74: 81–94. doi.org/10.1128/MMBR.00031-09

Galdiero, S., Falanga, A., Cantisani, M., Tarallo, R., Della Pepa, M. E., D'Oriano, V., Galdiero, M. 2012. Microbe-host interactions: Structure and role of Gram-negative bacterial porins. Curr. Protein Pept. Sci. 13: 843–854. doi.org/10.2174/138920312804871120

Gerritzen, M.J.H., Martens, D.E., Wijffels, R.H., van der Pol, L., Stork, M. 2017. Bioengineering bacterial outer membrane vesicles as vaccine platform. Biotechnol Adv. 35: 565–574. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.05.003

Gorringe, A.R., Pajon, R. 2012. Bexsero: A multicomponent vaccine for prevention of meningococcal disease. Hum Vaccin Immunother. 8: 174–183. doi.org/10.4161/hv.18500

Kuehn, M.J., Kesty, N.C. 2005. Bacterial outer membrane vesicles and the host-pathogen interaction. Genes Dev. 19: 2645–2655. doi.org/10.1101/gad.1299905

Kulp, A., Kuehn, M.J. 2010. Biological functions and biogenesis of secreted bacterial outer membrane vesicles. Annu. Rev Microbiol. 64: 163–184. doi.org/10.1146/annurev.micro.091208.073413

Malekan, M., Siadat, S.D., Aghasadeghi, M., Shahrokhi, N., Afrough, P., Behrouzi, A., Mousavi, S.F. 2020. Evaluation of protective immunity responses against pneumococcal PhtD and its C-terminal in combination with outer-membrane vesicles as adjuvants. J. Med. Microbiol. 69: 465–477. doi.org/10.1099/jmm.0.001103

Portnyagina, O., Zelepuga, E., Khomenko, V., Solov'eva, E., Solov'eva, T., Novikova, O. 2018. In silico and in vitro analysis of cross-reactivity between Yersinia pseudotuberculosis OmpF porin and thyroid-stimulating hormone receptor. Int. J. Biol. Macromol. 107: 2484–2491. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.10.133

Sinha, R., Howlader, D.R., Ta, A., Mitra, S., Das, S., Koley, H. 2017. Retinoic acid pre treatment down regulates V. cholerae outer membrane vesicles induced acute inflammation and enhances mucosal immunity. Vaccine. 35: 3534–3547. doi.org/10.1016/j.vaccine.2017.05.036

ผลกระทบของความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อต่อผลลัพธ์ของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ

Effect of pressure in autoclave on results of temperature calibration

พรรษธร เหลืองวิไลย์[a,b], วันชัย มีศิริ[c], วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ[a,*]

Phansathorn Lueangwilai[a,b], Wanchai Meesiri[c], Wiwat Wongkokua[a,*]

[a]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กรุงเทพฯ 10900

[c]บริษัท บางกอกไฮแล็บ จำกัด กรุงเทพฯ 10220

[a]Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Science Service, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10400, Thailand.

[c]Bangkok High Lab Co., Ltd., Bangkok 10220, Thailand.

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

บทคัดย่อ

หม้อนึ่งฆ่าเชื้อเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับฆ่าเชื้อในทางการแพทย์หรือในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยสมบัติของไอน้ำร้อนที่มีความดันสูง สาเหตุที่ต้องมีการเทียบมาตรฐานหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ เนื่องจากทั้งอุณหภูมิและความดันมีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความดันในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อต่อการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ ด้วยการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิในสภาวะแวดล้อมความดันที่ต่างกัน โดยใช้ตัวบันทึกอุณหภูมิ เป็นเครื่องมือวัดมาตรฐาน และตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อเป็นเครื่องมือวัดเพื่อเทียบมาตรฐาน โดยทำการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อในสภาวะที่มีความดัน เปรียบเทียบกับการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิในสภาวะความดันบรรยากาศ ที่จุดอุณหภูมิ 105°C, 121°C และ 135°C จากผลการศึกษาพบว่า ความดันมีผลต่อผลลัพธ์ของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ โดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างของทั้งสองกรณีเป็น 1.50°C, 1.76°C และ 1.42°C ในแต่ละอุณหภูมิตามลำดับ

คำสำคัญ: การเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ, ตัวบันทึกอุณหภูมิ, หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

Abstract

An autoclave is an instrument used to sterilize in medical or laboratory by hot steam with high pressure. The reason to calibrate the autoclave is that both temperature and pressure influent autoclave sterilization efficiency. In this work, the effect of pressure in an autoclave on the results of temperature calibration was carried out by measuring the temperature in different pressure environments. A temperature data logger was used as the temperature standard instrument and the temperature sensor of the autoclave was used as a unit under calibration. The temperatures were calibrated in the autoclave under pressures compared with the temperatures calibrated in the water bath at atmospheric pressure at 105°C, 121°C and 135°C. As a result, pressure influences the results of temperature calibration. The average difference of both cases were 1.50°C, 1.76°C and 1.42°C at each temperature respectively.

Keywords: autoclave, temperature calibration, temperature data logger

คำนำ

หม้อนึ่งฆ่าเชื้อเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป หรือห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ ทำให้วัตถุที่ผ่านการนึ่งแล้วอยู่ในสภาพปราศจากเชื้อ โดยอุณหภูมิและความดันของหม้อนึ่งมีผลต่อการฆ่าเชื้อ ถ้าหากวัดอุณหภูมิหรือความดันของหม้อนึ่งผิดไป ประสิทธิภาพของการทำลายเชื้อก็จะลดน้อยลงด้วย ตามมาตราฐาน มอก. 2665–2557 ตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.1°C ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด โดยปกติหม้อนึ่งฆ่าเชื้อจะมีการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ โดยใช้ตัวบันทึกอุณหภูมิ เป็นเครื่องมือวัดมาตรฐานและตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อเป็นเครื่องมือวัดเพื่อเทียบมาตรฐาน โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นระบบปิด และตัวบันทึกอุณหภูมิจะสามารถสอบกลับไปยังหน่วยวัดมูลฐาน โดยทำการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลตตินั่มมาตรฐาน (SPRT) ในอ่างควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นระบบเปิด งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิระหว่างตัวบันทึกอุณหภูมิและตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ด้วยการวัดค่าของอุณหภูมิในสภาวะแวดล้อมความดันต่างกัน ที่อุณหภูมิ 105°C, 121°C และ 135°C เพื่อหาผลกระทบของความดันที่อาจมีต่อการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ

อุปกรณ์และวิธีการ

การเทียบมาตรฐานอุณหภูมิตามมาตรฐาน BS 2646, 1993 ทำได้โดยการนำตัวบันทึกอุณหภูมิวางไว้ใกล้ๆ กับตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ เมื่อเครื่องเริ่มทำงานภายในหม้อนึ่งน้ำจะเริ่มร้อนและเกิดไอน้ำ ความดันของไอน้ำจะสูงกว่าความดันบรรยากาศ ไอน้ำจะแทนที่อากาศโดยไหลเข้าสู่ห้องนึ่ง อุณหภูมิและแรงดันภายในหม้อนึ่งจะเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากเกจวัดความดัน และเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ตั้งไว้ เครื่องก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการ Sterilize ซึ่งเป็นขั้นตอนของการฆ่าเชื้อ โดยใช้ระยะเวลา 15 min เมื่อสิ้นสุดเวลา Sterilize จะเป็นการลดความดันภายในหม้อนึ่งให้เท่ากับบรรยากาศภายนอก โดยมีกระบวนการทำงานแสดงดัง Fig. 1

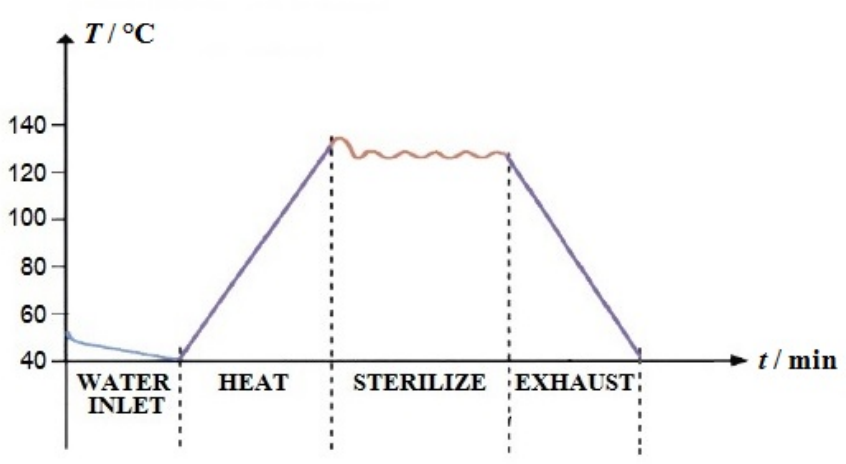


Fig. 1 Process stages of autoclave

การเทียบมาตรฐานอุณหภูมิโดยการติดตั้งตัวบันทึกอุณหภูมิซึ่งใช้เป็นมาตรฐาน และตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อซึ่งเป็นเครื่องมือวัดเพื่อเทียบมาตรฐาน ด้วยอุปกรณ์ชุดจับยึดให้มั่นคงและอยู่ในแนวตั้งฉากในท่อสแตน

เลส แล้วจุ่มบริเวณตรงกลางของอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งความลึกของการจุ่ม ต้องไม่น้อยกว่า 15 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัดอุณหภูมิแสดงดัง Fig. 2 โดยหัววัดอุณหภูมิมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 cm และความลึกในการจุ่มประมาณ 12 cm จากนั้นทำการปรับค่าอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิให้ตัวบันทึกอุณหภูมิและตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

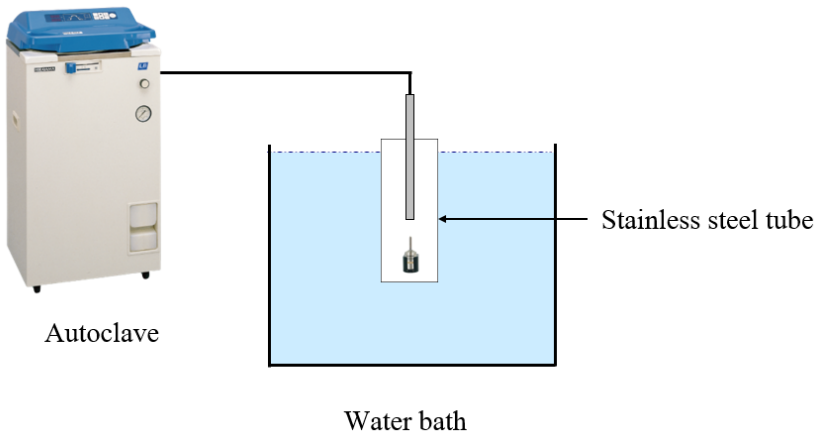


Fig. 2 Temperature calibration in water bath.

การเทียบมาตรฐานอุณหภูมิในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ จะบันทึกผลการวัดในแต่ละค่าอุณหภูมิทุก 10 s เป็นเวลา 15 min จำนวน 3 รอบ และการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จะบันทึกผลการวัดในแต่ละค่าอุณหภูมิทุก 10 s จำนวน 10 ครั้ง ทำซ้ำ 3 รอบ แล้วจึงนำมาหาค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความไม่แน่นอนของการเทียบมาตรฐาน (M3003, 2012) สามารถประเมินได้จากแบบจำลองของการถ่ายทอดความไม่แน่นอน สืบเนื่องจากความสัมพันธ์ของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิระหว่างตัวบันทึกอุณหภูมิและตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อตาม Equation 1

$$E_{\mathrm{x}} = (t_{\mathrm{a}} - t_{\mathrm{s}}) + \delta t_{\mathrm{s}} + \delta t_{\mathrm{s,d}} + \delta t_{\mathrm{res,s}} + \delta t_{\mathrm{res,a}} + \delta t_{\mathrm{uni}} + \delta t_{\mathrm{sta}} + \delta t_{\mathrm{st}} \quad (1)$$

โดยที่ E_{x} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

t_{a} คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

t_{s} คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของตัวบันทึกอุณหภูมิ

δt_{s} คือ ค่าแก้ของตัวบันทึกอุณหภูมิ

$\delta t_{\mathrm{s,d}}$ คือ ค่าแก้เนื่องจากการเลื่อนค่า (drift) ของตัวบันทึกอุณหภูมิ

$\delta t_{\mathrm{res,s}}$ คือ ค่าแก้เนื่องจากค่าความละเอียดของตัวบันทึกอุณหภูมิ

$\delta t_{\mathrm{res,a}}$ คือ ค่าแก้เนื่องจากค่าความละเอียดของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

δt_{uni} คือ ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่เป็นหนึ่งเดียวของอ่างควบคุมอุณหภูมิ

δt_{sta} คือ ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่สเถียรของอ่างควบคุมอุณหภูมิ

δt_{st} คือ ค่าแก้เนื่องจากความสามารถในการทำซ้ำในช่วงเวลาสั้นๆของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

ผลการวัดค่าอุณหภูมิของตัวบันทึกอุณหภูมิและตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ที่อุณหภูมิ 105°C, 121°C และ 135°C แสดงดัง Table 1

Table 1 The measurement results of temperature in the autoclave at 105°C, 121°C and 135°C

Temperature / °C		Error	SD	Expended Uncertainty / °C	Pressure Gauge / MPa
sensor of autoclave	data logger				
105	105.16	-0.16	0.038	0.59	0.02
	105.13	-0.13	0.055	0.59	
	105.25	-0.25	0.064	0.63	
121	121.15	-0.15	0.061	0.59	0.11
	121.22	-0.22	0.024	0.58	
	121.23	-0.23	0.061	0.62	
135	135.65	-0.65	0.047	0.59	0.21
	135.66	-0.66	0.056	0.60	
	135.63	-0.63	0.089	0.62	

จากการวัดค่าอุณหภูมิของตัวบันทึกอุณหภูมิและตัวรับรู้อุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 105°C, 121°C และ 135°C ได้ผลการทดลองแสดงดัง Table 2

Table 2 The measurement results of temperature in the water bath at 105°C, 121°C and 135°C

Temperature / °C		Error	SD	Expended Uncertainty / °C
sensor of autoclave	data logger			
105	106.85	-1.85	0.053	0.58
	106.64	-1.64	0.054	0.58
	106.56	-1.56	0.054	0.58
121	123.28	-2.28	0.026	0.58
	122.84	-1.84	0.026	0.58
	122.76	-1.76	0.027	0.58
135	137.33	-2.33	0.005	0.58
	136.98	-1.98	0.005	0.58
	136.90	-1.90	0.005	0.58

การประเมินความสอดคล้องของวิธีการวัด สามารถทำได้โดยวิธีการประเมินค่าสัดส่วน E_n (ISO/IEC 17043, 2010) ตาม Equation 2

$$E_n = \left| \frac{x - X}{\sqrt{U_a^2 + U_w^2}} \right| \quad (2)$$

โดยที่ $x - X$ คือ ผลต่างของค่าความคลาดเคลื่อนของวิธีการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ

U_a คือ ความไม่แน่นอนขยายของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

U_w คือ ความไม่แน่นอนขยายของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

ผลการประเมินค่าสัดส่วน E_n จะแสดงความสอดคล้องของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิระหว่างในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อและอ่างควบคุมอุณหภูมิเมื่อ $|E_n| \leq 1$ จากผลการเทียบมาตรฐาน ได้ผลการประเมินค่าสัดส่วน E_n แสดงดัง Table 3

Table 3 E_n ratio of the calibration methods.

Temperature / °C	$(x - X)$ / °C	U_a / °C	U_w / °C	$\|E_n\|$ / °C
105	1.69	0.59	0.58	2.0
	1.51	0.59	0.58	1.8
	1.31	0.63	0.58	1.5
121	2.13	0.59	0.58	2.6
	1.62	0.58	0.58	2.0
	1.53	0.62	0.58	1.8
135	1.68	0.59	0.58	2.0
	1.32	0.60	0.58	1.6
	1.27	0.62	0.58	1.5

สรุป

การเทียบมาตรฐานอุณหภูมิของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อในงานวิจัยนี้ โดยการเปรียบเทียบการวัดค่าอุณหภูมิในสภาวะแวดล้อมความดันต่างกัน ที่อุณหภูมิ 105°C, 121°C และ 135°C ได้ผลการประเมินค่าสัดส่วน $E_n > 1$ แสดงความไม่สอดคล้องของการเทียบมาตรฐานอุณหภูมิระหว่าง ในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อและอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจากผลการวัดค่าอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนเป็น 1.50 °C, 1.76 °C และ 1.42 °C ตามลำดับ ความไม่แน่นอนขยายของการเทียบมาตรฐานในสภาวะที่มีความดันและสภาวะความดันบรรยากาศเท่ากับ 0.60 °C และ 0.58 °C ตามลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากหน่วยปฏิบัติการวิจัยมาตรวิทยา และฟิสิกส์ของอุปกรณ์ (MPiR) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ และ บริษัทบางกอกไฮแล็บ จำกัด

เอกสารอ้างอิง

มอก. 2665. 2557. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำขนาดเล็กที่ใช้ทางการแพทย์

BS 2646. 1993. Autoclaves for sterilization in laboratories, Part 5. Methods of test for function and performance.

ISO/IEC 17043. 2010. Conformity assessment-general requirements for proficiency testing.

M3003. 2012. The expression of uncertainty and confidence in measurement.

Increasing surface charges of colicin N to prevent protein aggregation induced under various stress conditions

Methawee Duangkaew, Wanatchaporn Arunmanee*
Department of Biochemistry and Microbiology, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
* Corresponding author. E-mail address: wanatchaporn.a@chula.ac.th

Abstract

Therapeutic proteins have increasingly become a major class of drugs which is effective against a wide variety of diseases such as cancers, heart attacks, strokes, diabetes, etc. Due to their complex molecular structure, they tend to aggregate in the exposure of various environmental stress. The aggregation of therapeutic proteins in formulations can cause a reduction of efficacy and the stimulation of immunogenicity in patients. To prevent the protein aggregation, one of effective strategies is to increase the surface charges of proteins leading to the improvement of protein solubility. In this study, we are interested in colicin N (ColN) which is a bacterial toxin displaying the cytotoxic effect on both Gram-negative bacteria and cancer cells. To enhance its stability, the polycationic ColN with the six mutations changing from negatively charged to positively charged residues was cloned by Gibson assembly. Then, ColN mutant was expressed in *E. coli* BL21-AI and purified by an affinity chromatography. The aggregations of purified native ColN and ColN mutant were monitored under several stress conditions by Dynamic Light Scattering and Circular Dichroism. The stress conditions affect native ColN more than ColN mutant that changed the surface charge. Thus, ColN mutant with higher positively charged on the surface decreased protein aggregation. This study can be a benefit to the storage stability of ColN, may consider promising therapeutic proteins and drugs in the future.

Keywords: Colicins, Protein aggregation, Protein stability

Introduction

Proteins have the dynamic and various roles in the body such as catalyzing biochemical reactions, serving as receptors and channels in cell membranes, providing intracellular and extracellular scaffold support, and transporting molecules to the cell or one organ to other organs. Apart from these functions, proteins can act as therapeutic agents with high efficacy and low side effects. Nowadays, various protein therapeutics have been successfully approved for clinical use (Schellekens et al., 2002) and used to affect drug therapy (Jevševar et al., 2010). Protein therapeutics used for several diseases such as cancers, heart attacks, strokes, diabetes, etc. They offer more diverse range of indications (Schellekens et al., 2002).

In protein-based drug discovery and development, a protein aggregation is a problem for the stability of therapeutic proteins (Arakawa et al., 2007). The study of protein aggregation is also essential for regulatory approval, and delivery methods because protein aggregates tend to be biologically inactive and immunogenic. The development of aggregation studies is still using trial and error methods which can be cost and time consuming (Chennamsetty et al., 2009). To reduce protein aggregation can be achieved by altering pH and salt concentration of buffer, maintaining temperature and low concentration of protein, and adding appropriate additives. In addition to adjust environmental factors, the increase or decrease in the number of surfaces charged amino acids on proteins is another promising technique to lower the tendency to form protein aggregates. The previous study found that the aggregation proteins could be altered after surface charge engineering (Strickler et al., 2006). Therefore, the surface charge engineering was an alternative to stability protein to protect aggregation proteins.

In this study, we are interested in colicin N (ColN) which is bacteriocin produced by *Escherichia coli (E. coli)* exposed to stress from the environment or competition. ColN is used for food application and has antibacterial activity same as other several bacteriocins (Ridley et al., 2015). Moreover, ColN has previously reported for anticancer activity against human lung cancer cells (Arunmanee et al., 2020). However, ColN is still not suitable for therapeutic purposes as it tends to form aggregates during storage in PBS and freeze-thaw cycles. To reduce its aggregation, the polycationic ColN with the six mutations changing from negatively charged to positively charged residues was produced and purified. The aggregations of purified native ColN and ColN mutant were monitored under several stress conditions by Dynamic Light Scattering and Circular Dichroism. The tendency of aggregation between native ColN and ColN mutant in agitation and freeze-thaw cycle were compared.

Materials and Methods

Construction of colicin N mutant by Gibson assembly

The gene fragments were designed from native Colicin N (ColN-WT) sequence (PDB = 1A87) to change an amino acid, six positions of colicin N including E96, D105, E129, D153, D157 and D162, were change to lysine. The linearized vector were amplified by PCR using primers (ColNmut_PF (-GTGAACTGGAAGGGACCG) and ColNmut_PR (-CCTTAGCACT CGCTCCATCACCGTTATTACCTCGATTTC)). Insert fragments were amplified by (ColNmut_IF (-CGAGGTAATAACGGTGATGGAGCGAGTGCTAAGGTTG) and ColNmut_IR (-CAAGTTTATTGTTATATTTCGGTCCCTTCCAGTTCAC)). The ratio of vector and insert was calculated by the NEBiocalculator program version 1.12.0 at the ratio of 2:1 (insert: vector). The mixture of linearized vector and insert in a total volume of 2.5 µl were mixed with 2.5 µl of the NEBuilder® HiFi DNA Assembly Master Mix. After that, all mixture spin down and heated at 50˚C for 15 min. Next, the Gibson cloning product was transformed

into One Shot™ Mach1™ T1 Phage-Resistant Chemically Competent *E. coli* for increase plasmid product and confirmed plasmid mutation by DNA sequencing.

Protein expression and purification

Plasmids were transformed into *E. coli* BL21-AI for protein expression. The production of protein was induced by 0.2% (w/v) L-(+)-Arabinose at OD_{600} = 0.6-0.8. Purification of his-tagged colicin N was done by a HisTrap™ FF affinity column (GE Healthcare Technologist, West Milwaukee, WI, USA) in Fast Protein Liquid Chromatography (FPLC) ÄTKA start (GE Healthcare Technologist, West Milwaukee, WI, USA). The purity of purified ColN was monitored by SDS-PAGE and antimicrobial activity of ColN were also tested (data not shown).

Preparation of stress conditions sample

Freeze-Thaw condition

Native Colicin N (ColN-WT) and Colicin N mutant at the concentration of 0.3 mg/ml in Phosphate Buffer Saline (PBS buffer) were frozen at -20°C for 30 min and thawed at 4°C for 2 h. The freezing was repeated for a total of 3 cycles and kept at 4°C overnight on the refrigerator before analysis.

Agitated time condition

The microcentrifuge tubes containing native Colicin N (ColN-WT) and Colicin N mutant at the concentration of 0.3 mg/ml in PBS buffer were shaken at 300 rpm at room temperature. Agitated time samples were collected at 1, 3 and 6 h and kept at 4°C overnight before analysis.

Circular Dichroism

Far-UV was carried out on a CD spectrophotometer (j-815 CD Spectrophotometer, Jasco, Tokyo, Japan). In this study, a path length circular cuvette was used a 0.10 cm and the wavelength is 190–260 nm. Measurements were carried out at 25°C. Proteins concentration were used of 0.3 mg/ml and were contained in PBS buffer.

Dynamic Light Scattering (DLS)

DLS was carried out using Zeta sizer (Nano ZS, Malvern Instruments) at 25°C. Stress condition samples were measured to the average particle size and number of particles. Proteins concentration were prepared to 0.3 mg/ml and were contained in PBS buffer. This experiment was used a semi-micro plastic cuvette. Stress condition samples were added to the cuvette by collecting 5 scans for each sample in triplicates.

Results and Discussion

Gibson assembly is an efficient method to use for cloning large DNA fragments and can combine many DNA fragments in a fewer steps in one tube reaction (Fig. 1A). This method has been proven to be an efficient and effective method of assembly plasmids. Gibson cloning of ColN mutant was successfully constructed by substitution of Glu and Asp to Lys and showed

the correct of six mutations as shown in the alignment of DNA sequences between ColN-WT and ColN mutant (Fig. 1B). These mutations were called ColNmut-K.

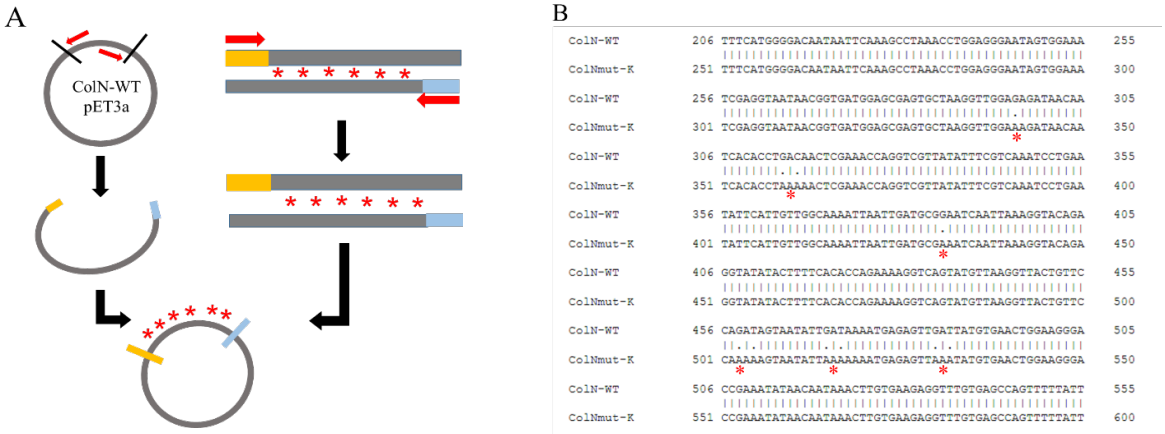


Fig. 1 Mutagenesis of colicin N.: (A) Schematic representation of Gibson assembly method used for ColN mutagenesis and; (B) the alignment of DNA sequences between ColNmut-K and wild-type ColN (B)

The plasmids encoding native ColN and mutated ColN were transferred to *E. coli* BL21-AI, protein expression induced by arabinose and the proteins were purified by FPLC. The purified ColN-WT and ColNmut-K were run on SDS-PAGE. SDS-PAGE technique was carried out to confirm the size and purity of the protein. Purified ColN-WT was compared with ColNmut-K on SDS-PAGE gel (Fig. 2). The size of ColNmut-K is expected to be 42 kDa which corresponds to the correct size of protein (Arunmanee et al., 2020).

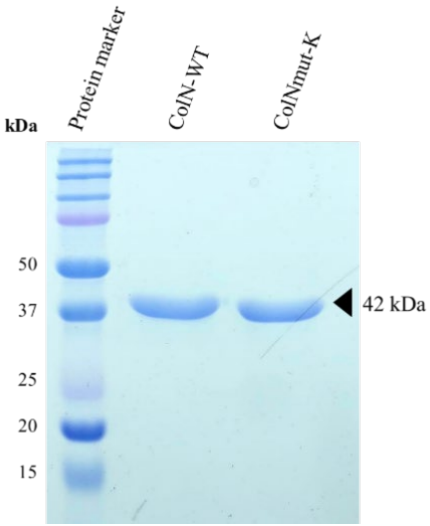


Fig. 2 SDS-PAGE analysis of purified ColN-WT and ColNmut-K. The 12% SDS-PAGE gel was stained by Coomassie blue after electrophoresis. ColN size is expected to be 42 kDa purified protein bands were at the correct size.

After preparation of agitated and freeze-thaw samples, CD analysis was performed. The CD spectra were plotted between molecular ellipticity (deg· cm^2 ·$dmol^{-1}$) and wavelength (nm). The results in Fig. 3 showed that ColN-WT and ColNmut-K in both agitated and freeze-thaw

experiments possessed a secondary structure in the same pattern as previously described in Evans et al, 1996 (Evans et al., 1996). However, ColN samples collected after agitation and freeze-thaw cycle slightly changed molecular ellipticity of CD spectra. It indicated that both ColN altered their molecular structure such as unfolding or aggregation but there is no conclusive evidences by CD showing that the mutant prevents the protein aggregation in these stress conditions.

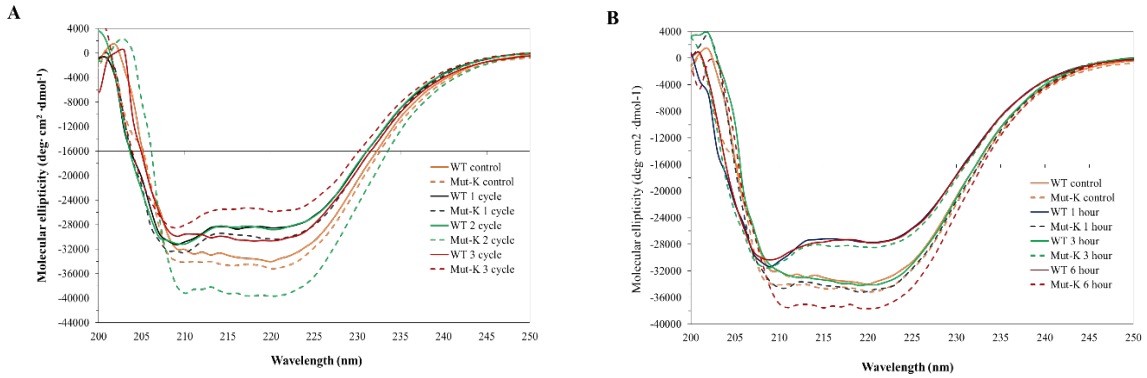
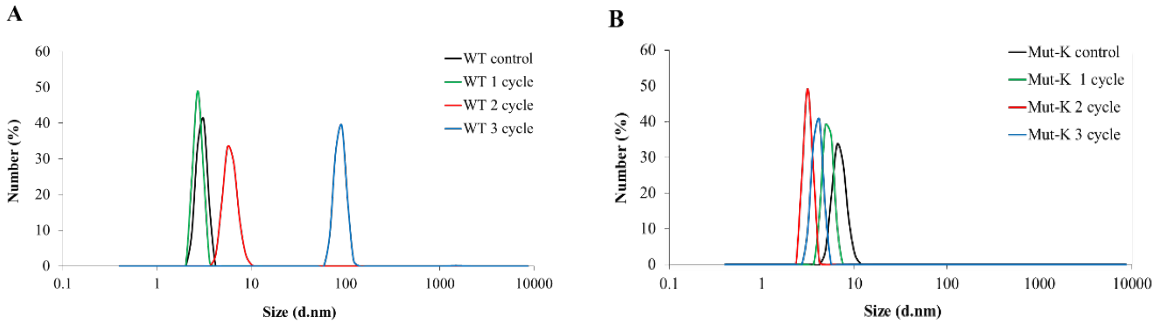


Fig. 3 Far-UV CD spectra of ColN-WT and ColNmut-K in stress conditions including: (A) freeze-thaw cycles; (B) agitation. The measurement were performed at a protein concentration of 0.3 mg/ml at 25°C by using a 1 mm path length cell. Stress condition samples were measured at 190–260 nm. Both of control samples were kept at 4°C overnight before analysis.

To monitor the aggregates, the size of all ColN particles was measured by dynamic light scattering (DLS) in Fig. 4. The size of ColN particles was found to be around 3–5 nm and 5–10 nm in diameter for ColN-WT and ColNmut-K, respectively. ColN-WT after freeze-thaw cycles demonstrated the increases in size of particles in Fig. 4A but the size of ColNmut-K remained unchanged in Fig. 4B. Regarding ColN-WT and ColNmut-K under agitation condition (Fig. 4C and 4D), the size distribution of both ColN-WT and ColNmut-K was not affected by agitation except ColN-WT after 6 hour agitation.

Therefore, ColNmut-K with higher positively charges on the surface decreased the tendency of protein aggregation.



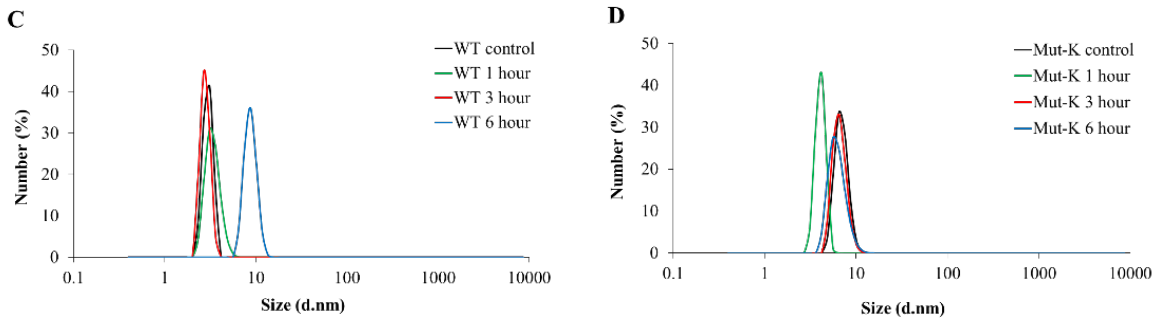


Fig. 4 Size distribution of ColN under stress conditions determined by Dynamic Light Scattering. The measurement of samples was carried out on: (A) ColN-WT under freeze-thaw cycle; (B) ColNmut-K under freeze-thaw cycle; (C) ColN-WT under agitation and; (D) ColNmut-K under agitation.

In conclusion, ColNmut-K with polycationic residues on the surface of proteins was designed by the substitution of glutamate and aspartate to lysine. ColN-WT and ColNmut-K were successfully expressed, purified, and showed correct the properties of ColN. Agitated stress conditions and freeze thaw cycles affect ColN-WT more than ColNmut-K. We studied ColN aggregation after more than one freeze-thaw cycle, it changed the size of protein particles to be larger than the control sample. This study shows ColN mutant changing the surface charges prevented protein aggregation under stress conditions. We hope this study can be a benefit to the storage stability of ColN which could be developed to be therapeutic proteins in the future.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This work has been supported by the Development and Promotion of Science Technology Talents (DPST) Research Grant 024/2559. The authors would like to thank lab members in S3 BIOLAB and Department of Biochemistry and Microbiology, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University for technical supports and facilities.

References

Tsutomu, A., John, S.P., Daisuke, E., Kouhei, T., Fumio, A. 2007. Aggregation analysis of therapeutic proteins, part 2. Bioprocess International 5: 36–47.

Wanatchaporn, A., Gea Abigail, U.E., Hnin Ei Ei, K., Methawee, D., Eakachai, P., Pithi, C., Chatchai. C. 2020. Colicin N mediates apoptosis and suppresses integrin-modulated survival in human lung cancer cells. Molecules 25: 816. doi.org/10.3390/molecules25040816

Naresh, C., Vladimir, V., Veysel, K., Bernhard, H., Bernhardt, L.T. 2009. Design of therapeutic proteins with enhanced stability. Proceedings of the National Academy of Sciences. 106: 11937–11942. doi.org/10.1073/pnas.0904191106

Evans, L.J.A., Labeit, S., Cooper, A., Bond, L.H., Lakey, J.H. 1996. The central domain of colicin N possesses the receptor recognition site but not the binding affinity of the whole toxin. Biochemistry. 35: 15143–15148. doi.org/10.1021/bi9615497

Simona, J., Menči, K., Gaberc, P.V. 2010. PEGylation of therapeutic proteins. Biotechnology Journal Healthcare Nutrition Technology 5: 113–128. doi.org/10.1002/biot.200900218

Helen, R., Jeremy, H.L. 2015. Antibacterial toxin colicin N and phage protein G3p compete with TolB for a binding site on TolA. Microbiology 161: 503. doi.10.1099/mic.0.000024

Schellekens, H. 2002. Immunogenicity of therapeutic proteins: clinical implications and future prospects. Clinical therapeutics. 24: 1720–1740. doi.org/10.1016/S0149-2918(02)80075-3

Strickler, S.S., Gribenko, A.V., Gribenko, A.V., Keiffer, T.R., Jessica, T., Reihle, T., Loladze, V.V., Makhatadze, G.I. 2006. Protein stability and surface electrostatics: A charged relationship. Biochemistry 45: 2761–2766. doi.org/10.1021/bi0600143

Identification and detection of protein markers to differentiate between Siamese crocodile (*Crocodylus siamensis*) body fluids

Chayanon Charoenkittitum, Win Chaeychomsri, Sasina Tripob, Jindawan Siruntawineti*
Department of Zoology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: fscijws@ku.ac.th

Abstract

The crocodile body fluids especially cerebrospinal fluid (CSF) of Siamese crocodile play a role in blood clotting time that has never been reported. For identification of the main crocodile body fluid proteins including CSF, blood with CSF (B.CSF) and whole crocodile blood (CB) were collected from post occipital sinus of captive Siamese crocodiles. The protein samples (CSFs and B.CSF) were determined for protein profiles by sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) technique in non-reducing condition at 7.5% (w/v) gel concentration by comparing with CB, crocodile serum (CS) and human serum (HS) as controls. The results showed protein patterns of CSFs revealed 11 bands of proteins at molecular weight (MW) of 200, 135, 112, 99, 86, 65, 62, 50, 38, 35 and 27 kDa, respectively. The B.CSF protein patterns demonstrated the same pattern between CB and CS proteins. The CSF, B.CSF and CS proteins displayed difference protein profiles when compared with HS protein. However, protein patterns of CSF revealed unique bands at the MW of 99 kDa and no band protein at 41 kDa when compared with B.CSF and CS. This data revealed the protein markers to differentiate between Siamese crocodile body fluids.

Keywords: Body fluid, Cerebrospinal fluid, Protein, Siamese crocodile

Introduction

Crocodiles including Siamese crocodiles (*Crocodylus siamensis*), have behavior on a long time underwater staying for after each breath. When they got a large and deep wound as a result of fighting with other crocodile or other reasons, the crocodiles can survive and live. Moreover, their immune system can effectively prevent an attack of underwater bacteria and other micro-organisms from unsanitary habitat and support their wound healing. These data show capabilities of immunity system and hemostasis of the crocodiles are very effective (Finger and Isberg, 2012; Chaeychomsri et al., 2013). Hemostasis is the natural process which forms clotting in the walls of damaged blood vessel and stops bleeding after an injury for maintaining blood in a fluid state within the vascular system.

Blood coagulation or clotting process is the final step of hemostasis, which similar in all species (Gentry, 2004). Pothiwong et al. (2000) and Myburgh et al. (2014) reported that cerebrospinal fluid or CSF, a type of transcellular fluids, contamination into blood during blood collection from the post-occipital sinus of the spinal vein on Siamese crocodile and Nile crocodile (*Crocodylus niloticus*) also associated with increasing blood clotting time. In addition, during studies for development of Siamese crocodile blood to be a dietary supplement, crocodile blood capsule (Chaeychomsri et al., 2013), the blood mixed with a clear body fluid (CSF) in blood collection process also presented hypercoagulation (unpublished data). Proteins in the CSF may play a role in crocodile wound healing.

However, the comparative studies of Siamese crocodile main proteins in its body fluids collected from the facilitative collection point, post-occipital sinus, have never been reported before. Therefore, this study aimed to determine the crocodile body fluids (CSF and blood) protein profiles and investigated the protein markers.

Materials and Methods

Research samples

Crocodile samples: Captive Siamese crocodiles, *C. siamensis*, were obtained from the Rungtaweechai crocodile farm, Nakhon Pathom province and Sri Ayutthaya Gold Medal crocodile farm, Phra Nakhon Sri Ayutthaya province, Thailand. Under slaughtering, the healthy crocodiles with 3–5 years of age and 160–234 cm in length were randomly selected. An electronic stunner (220 V) was used for the crocodile immobilization before sample collection.

Human sample: A female blood was collected during annual health check and donated by Jindawan Siruntawineti, with her permission.

Sample collections and preparations

The crocodile samples were collected under slaughter process using sterile syringes (10 ml), 21gauge needles. The blood was withdrawn from the post-occipital sinus site (Fig. 1A). The crocodile whole blood (CB) was collected. Moreover, the crocodile blood was prepared by centrifugation (3,500 rpm for 5 min) and collection for crocodile serum (CS). For the CSF of Siamese crocodile collection, the needle inserted deeply to subarachnoid or subdural space as shown in Fig. 1B and samples were kept in microtubes. The blood contaminated with CSF

during the collection was centrifuged at 3,500 rpm for 5 min and the supernatant (B.CSF) was kept. All samples were stored at -20°C in a freezer.

For human serum (HS), the donated blood was centrifuged at 3,500 rpm for 5 min and serum was maintained at -20°C in a freezer.

Preparation of samples for protein concentration

The samples including CB, CS, CSF, B.CSF and HS were examined for the concentration of protein by spectrophotometer (Denovix DS-11 plus, USA). The results of protein concentrations were recorded.

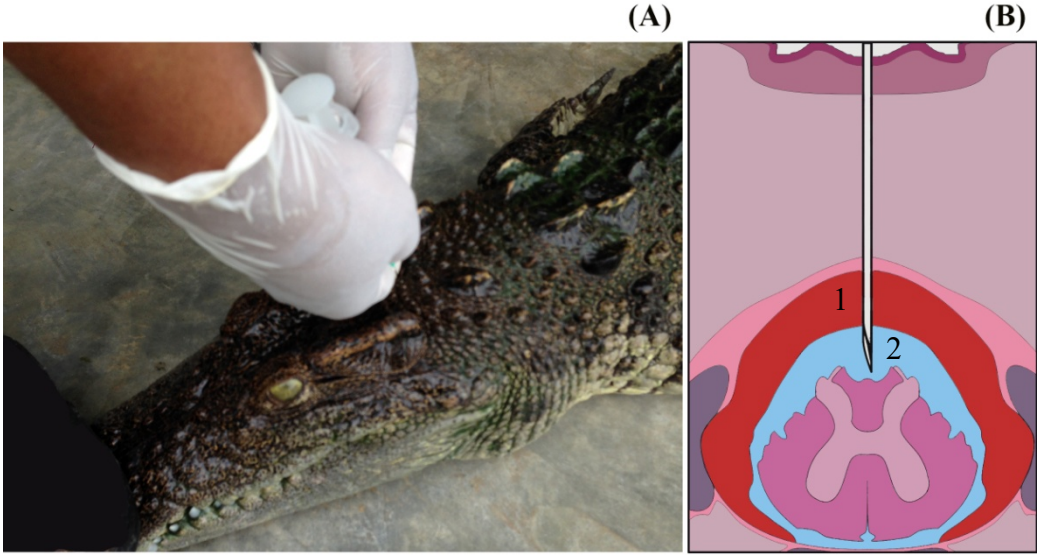


Fig. 1 Blood collection from the post-occipital sinus of Siamese crocodiles: (A). The modified picture of Myburgh et al. (2014) was shown for path of needle during puncture in histological transaction diagram of post-occipital region of Siamese crocodile; (B): the number "1" is spinal venous sinus and "2" is subarachnoid or subdural space.

Preparation of samples for sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE)

Before the protein profile determinations by SDS-PAGE, all samples at 20 µg of protein concentration, was diluted with SDS non-reducing sample buffer in their half volume. Then, separating gels at 7.5% (w/v) concentration and stacking gels at 4.5% (w/v) concentration with glass plate and chamber (miniPAGE Chamber AE-6530, (ATTO Corporation, Japan) were prepared. The protein samples were loaded and using standard proteins with known molecular weight (SDS-PAGE Molecular Weight Standards, Broad Range, Bio-Rad Laboratories, USA) as marker. Afterward, the samples and standard proteins marker were transferred via SDS-PAG to the electrode using a constant current of 20 mA per gel at 250 V. When the protein bands were reached the bottom of glass plate, the separating gels that contained protein band of samples were stained with Coomassie Brilliant Blue (CBB) stain. Then, the gel was destained until the gel background was clear. The gel protein patterns were recorded using a gel document system (InGenius3 gel document system, Syngene, USA). The protein bands were analyzed and compared. The molecular weight of the protein bands were calculated by comparing the

distance of protein band and the distance of known standard molecular weight protein using GeneTools analysis software (Syngene, USA).

Results and Discussion

This study inspired from information during the development of Siamese crocodile blood to be a dietary supplement, crocodile blood capsule: the large blood volume collection of Siamese crocodile (Chaeychomsri et al., 2013). During some blood collections, clear fluid had contaminated and effect on the blood clotting that faster than the normal. This effect is consistent with Tripob (2018) that the aforementioned clear liquid is one type of body fluids, cerebrospinal fluid (CSF) that may affect the blood clotting time. In effort to study the protein profiles of CSF in Siamese crocodile, the sample collection requires knowledge of crocodile anatomy and need special technique to prevent blood contamination (Fig. 1). This reveals the crocodile CSF collection at subarachnoid or subdural space requires specialized expertise and skill.

In order to compare the CSF of Siamese crocodile proteins, the proteins of CSF with blood contamination (B.CSF), Siamese crocodile whole blood (CB), Siamese crocodile serum (CS) and Human serum (HS) were used as comparative protein samples. The concentrations of total protein in samples are shown in Table 1.

Table 1 Total protein concentrations of cerebrospinal fluid (CSF), CSF with blood contamination (B.CSF), Siamese crocodile whole blood (CB), Siamese crocodile serum (CS) and Human serum (HS)

Total protein concentration	Samples							
	CSF1	CSF2	CSF3	CSF4	B.CSF	CB	CS	HS
mg/ml	8.40	1.42	2.49	1.33	58.7	340	120	136

To study protein profiles, the preliminary experiment was conducted with SDS-PAGE in non-reducing condition by different percentage of separating gel concentrations that clearly showed interesting protein band (s). Therefore, this study was performed by SDS-PAGE in non-reducing condition at 7.5% (w/v) gels concentration. As shown in Fig. 2, the results presented that protein profiles of Siamese crocodile CSFs were not difference between sexes (Males: CSF1, CSF2 and Females: CSF3, CSF4). It may be due to the samples were collected from Siamese crocodiles at the age of 3–5 years old. The crocodiles at these ages are classed as juvenile crocodiles. They are not yet to have sex hormones that cause protein type differences (Threenet et al., 2011).

The results (Fig. 2) showed protein patterns of CSFs in 11 protein bands at molecular weight (MW) of 200, 135, 112, 99, 86, 65, 62, 50, 38, 35 and 27 kilodaltons (kDa), respectively. The B.CSF sample exhibited 14 bands of proteins at MW of 200, 135, 117.5, 112, 99, 86, 65, 62, 50, 41, 38 36, 35 and 27 kDa, respectively. The protein profile of CB presented 8 protein bands at MW of 200, 135, 117.5, 65, 50, 36, 33.6 and 27 kDa, respectively. For protein patterns of CS, there were 12 protein bands at MW of 200, 135, 117.5, 112, 86, 65, 62, 50, 41, 38, 35and

27 kDa, respectively. In addition, the HS sample demonstrated 11 bands of proteins at MW of 199.5, 123, 102.3, 98.5, 62.4, 59, 46.8, 40.5, 38.7, 36.3 and 25 kDa, respectively.

The pattern of B.CSF, CB and CS proteins were similar and shared some components of the crocodile blood. These body fluid proteins originated from Siamese crocodiles (CSFs, B.CSF, CB and CS) presented difference protein profiles when compared with HS protein that sourced from human. There were main dominant of protein bands at 50 kDa revealed for the albumin protein and related with serum protein profile of Siamese crocodile reported by Siruntawineti et al. (2006). When compared CSF with B.CSF and CS protein profiles, the CSF protein informed a unique protein band at 99 kDa (Fig. 2, arrow head)and no band protein at 41 kDa (Fig. 2, asterisk). However, more details of the specific proteins in both protein bands have remained to be elucidated. These data revealed the protein markers to differentiate between Siamese crocodile body fluids including blood and CSF.

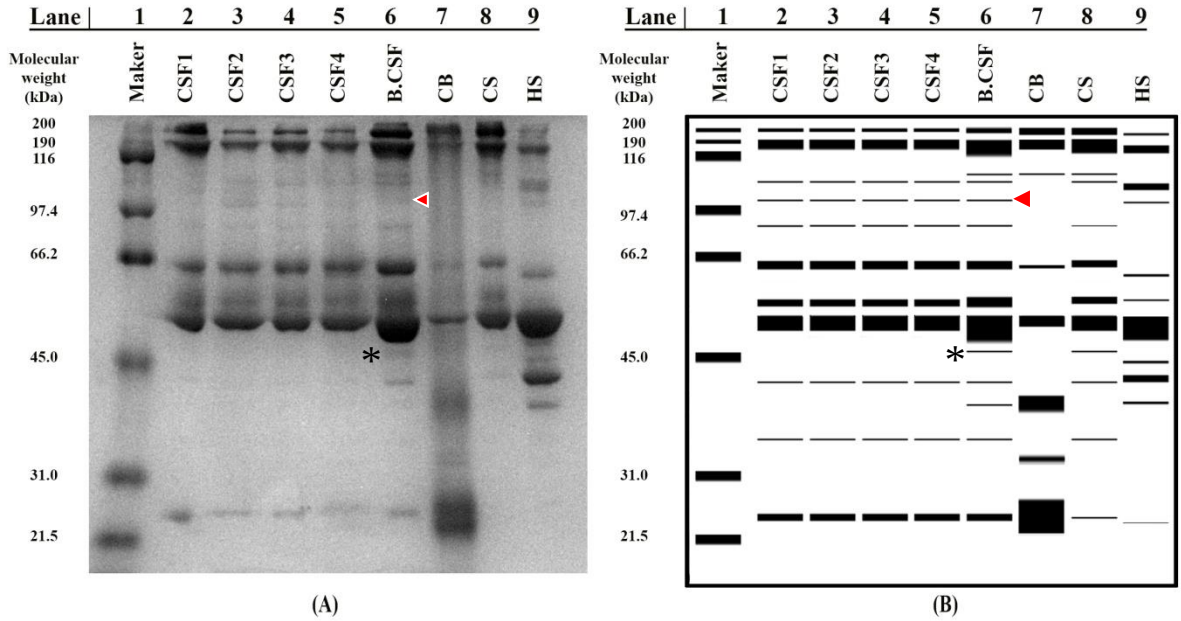


Fig. 2 The protein profiles of Siamese crocodile cerebrospinal fluid, performed by SDS-PAGE in non-reducing condition at 7.5% (w/v) gel concentration (A) and Diagram (B) showed protein patterns in each lanes include the 1st lane: Protein bands of Standard protein marker (Bio-Rad Laboratories, USA; Marker); the 2nd and 3rd lanes: Protein bands of male Siamese crocodiles' cerebrospinal fluid (CSF); the 4th and 5th lanes: Protein bands of female Siamese crocodiles' CSF; the 6th lane: Protein bands of male Siamese crocodile's CSF with blood contamination (B.CSF); the 7th lane: Protein bands of Siamese crocodile blood (CB); the 8th lane: Protein bands of Siamese crocodile serum (CS) and the 9th lane: Protein bands of Human serum (HS). In (A) and (B), arrow head show protein band at 99 kDa and asterisk demonstrate protein band at 41 kDa.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The authors acknowledge to Research and Researchers for Industries Program (RRI), in fiscal year 2015, Project No. MSD58I0003 of the Thailand Research Fund (TRF) for research funding support and be grateful to Rungtaweechai crocodile farm, Nakhon Pathom province and Sri Ayutthaya Gold Medal crocodile farm, Phra Nakhon Sri Ayutthaya province, Thailand and the farm staffs for their co-operation and assistance in Siamese crocodile samples.

References

Chaeychomsri, W., Siruntawineti, J., Chaeychomsri, S, Hengsawadi, D., Cuptapan, Y., Rungtaweechai, W. 2013. Successful development and commercialization of freeze-dried crocodile blood product. Proceedings of the 39th Congress on Science and Technology of Thailand. Bangkok, Thailand.

Finger, J.W., Isberg, S.R. 2012. A review of innate immunity functions in crocodilian. CAB Reviews: Perspectives in Agricuture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 7: 1–8. doi.org/10.1079/pavsnnr20127067

Gentry, P.A. 2004. Comparative aspects of blood coagulation. Vet. J. 168: 238–251. doi.org/10.1016/j.tvjl.2003.09.013

Myburgh, J.G., Kirberger, R.M., Steyl, J.C.A., Soley, J.T., Boovse, D.G., Huchzermeyer, F.W., Lowers, R.H., Guillette Jr., L.J. 2014. The post-occipital spinal venous sinus of the Nile crocodile (*Crocodylus niloticus*): Its anatomy and use for blood sample collection and intravenous infusions. J. S. Afr. Vet. Assoc. 85: 1–10. doi.org/10.4102/jsava.v85i1.965

Pothiwong, W., Prachammuang, P., Koykol, W. 2000. The subdural sinus of the freshwater crocodile (*Crocodylus siamensis*). Thai J. Vet. Med. 30: 51–55.

Ruttmann, T.G., Jamesand, M.F., Wells, K.F. 1999. Effect of 20% in vitro haemodilution with warmed buffered salt solution and cerebrospinal fluid on coagulation. Br. J. Anaesth. 82: 110–111. doi.org/10.1093/bja/82.1.110

Siruntawineti, J., Chaeychomsri, W., Vajarasathira, B. 2006. SDS-polyacrylamide gel electrophoresis for a study of serum proteins from Siamese crocodile, wistar rat and human. J. Med. Tech. Assoc. Thai. 34: 1444–1455. [in Thai]

Threenet, E., Siruntawineti, J., Chaeychomsri, W. 2011. Proteins profiles of Siamese crocodile blood. Proceeding of 49th Kasetsart University Annual Conference: Science. Kasetsart University, Thiland, pp. 346–352. [in Thai]

Tripob, S. 2018. Efficiency of body fluid on siamese crocodile blood clotting. M.Sc. Thesis, Graduate School, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Enhanced accumulation of glycogen and lipid under nitrogen deprivation and continuous light in the cyanobacteria *Arthrospira platensis*

Nat-Anong Mudtham, Winai Charunchaipipat, Chanchanok Duangsri, Authen Promariya, Khomson Satchasataporn, Sarawan Kaewmongkol, Suchanit Ngamkala, Wuttinun Raksajit*
Program of Animal Health Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: cvtwnr@ku.ac.th

Abstract

Glycogen and lipid are efficient substrates for biofuel production. Cyanobacteria are aquatic phototrophs that have the capacity to accumulate storage molecules including glycogen and lipid under nitrogen (N) deprivation. The present investigation aims to increase biomass, glycogen and lipid accumulation of cyanobacteria *Arthrospira platensis* by formulating an optimal growth condition and influencing expression of *glgA* gene encoding glycogen synthase. We found that the highest biomass (3.025 mg/mL) of *A. platensis* were obtained in cells grown in N-rich medium under continuous light (40 μmol photons/m^2/s) for 5 days. In addition, the glycogen and lipid accumulation were significantly increased 1.7-fold and 4-fold, respectively in cells grown in N-deprived medium under continuous light for 2 days. Besides, N-deprived *A. platensis* grown in darkness showed a rapid decrease in the biomass, glycogen, and lipid content compared to continuous light. Moreover, the *glgA* expression was found to be increased in N-deprived cells grown under continuous light responsible for increased glycogen biosynthesis. The overall results demonstrated that nitrogen limitation and light supply were viable strategies for enhancing glycogen production.

Keywords: *Arthrospira platensis*, *glgA* gene, Glycogen, Nitrogen deprivation

Introduction

Unsustainability of non-renewable fossil fuels has initiated impact of renewable fuel sources. In addition, increasing in energy demand has resulted in depletion of fossil fuels and led to explore alternative and renewable energy (Mathimani and Pugazhendhi, 2019). Cyanobacteria or microalgae have been attracted considerable worldwide due to their extensive application potential in the renewable bioenergy and biofuels (Machado and Atsumi, 2012; Mathimani and Pugazhendhi, 2019; Singh et al., 2019; Comer et al., 2020). Cyanobacteria can accumulate glycogen as the major carbohydrate store of carbon from CO_2 fixation through photosynthesis. Glycogen is the major cellular carbon- and energy-reserve compound accumulated by cyanobacteria during photoautotrophic growth and it is a polymer of glucose molecules linked by an α-1,4 glycosidic bonds for linear chains and by an α-1,6 glycosidic bonds at branch points (Cifuente et al., 2019). Cyanobacterial glycogen can be greatly accumulated whenever balanced growth is hampered by a particular nutrient deficiency (Depraetere et al., 2015). When N is depleted from the culture medium, the concentration of proteins in the biomass is reduced, while the concentration of carbohydrates and lipids are increased (Deschoenmaeker et al., 2014). The synthesis of glycogen is regulated by *glgA* gene which has been identified to encode glycogen synthase, catalyzing the final step for glycogen elongation using ADP-glucose.

In the well-studied cyanobacteria, *Arthrospira platensis* is a filamentous non-heterocystous cyanobacterium that can grow in strong sunlight and high salinity (Delrue et al., 2017; Shimamatsu, 2004). The *A. platensis* accumulate spontaneously a large amount of glycogen during cultivation under major nutrient changes or environmental stresses (Markou et al., 2012; Klanchui et al., 2018; Liu et al., 2019; Phélippé et al., 2019). Recently, this spontaneous settling has a lot of potential to be used as a low-cost and high-throughput method for the production of biofuels, and the cyanobacterial glycogen is an excellent feedstock for fermentation over starch (Möllers et al., 2014). Glycogen can be digested and converted to bioethanol (John et al., 2011). Therefore, *A. platensis* producing glycogen is an attractive candidate used as promising feedstocks for bioethanol production. However, the productivity of glycogen is still not high enough to produce bioethanol at the commercial scale. To overcome this challenge, strategies for enhancement of glycogen content in *A. platensis* is needed. In the present study, we investigated the biomass, glycogen, and lipid accumulation profiles in *A. platensis*, under nitrogen deprivation and photoperiod as well as the expression of *glgA* involved in glycogen biosynthesis.

Materials and Methods

Microorganism and culture conditions

Cells of *Arthrospira platensis* (hereafter *A. platensis*) were grown in Zarrouk medium (pH 10.0) containing $NaNO_3$ as a source of nitrogen. The effects of different concentration of nitrogen (control (2.5 g/L), 50% (1.25 g/L), 25% (0.625 g/L), and 0% (0 g/L)) on biomass, glycogen, and lipid were studied. The culture was incubated aerobically under continuous white-fluorescent illumination of 40 μmolE/m^2/s for 24 hr, or under 12 hr-light/12 hr-dark photoperiod, or under dark for 24 hr, on a rotatory shaker at 120 rpm and 32°C.

Analysis of glycogen

Since *A. platensis* accumulates carbohydrates as glycogen (Aikawa et al., 2012), the glycogen content was determined by KOH (30%w/v) extraction according to Hasunuma et al. (2013). Cells of *A. platensis* (0.5 g dry weight) were digested by 30 % (w/v) KOH and heated at 100°C for 90 min, and subsequently placed on ice. To precipitate glycogen, 900 µL of cold ethanol was added and kept on ice for 2 hr. The precipitate was recovered by centrifugation at 4°C, 8,000×*g* for 15 min. Pellets were washed twice with 90% and 70% cold ethanol, respectively and dried for 10 min at 60°C in a heat block.

Accumulation of neutral lipid

Neutral lipid accumulation in *A. platensis* was visualized by staining with Nile red dye. Briefly, two drops of 1%(w/v) Nile red dye solution were added into 200 µL of culture sample, mixed and incubated under darkness for 3 min at 55°C. Cells were taken on a glass slide and covered with a coverslip. The stained cells were observed by fluorescent microscope at an excitation wavelength of 450–490 nm under 1,000×magnification (Shrivastav et al., 2010). Neutral lipid content (%w/w dry weight, %w/w dw) was quantified using high-performance liquid chromatography (HPLC, Waters Corp., USA) according to Duangsri et al. (2020).

Analysis of C-phycocyanin

A. platensis dried cells (0.05 g) were suspended in 0.1 M sodium phosphate buffer pH 7.0. The mixture was sonicated for 15 min with 20kHz on ice under dark to avoid photodamage. After centrifugation at 4,000×*g* for 30 min, clear supernatant was collected. The C-phycocyanin content was determined according to Equation 1 (Bennett and Bogorad, 1973).

$$\text{Phycocyanin content (mg/mL)} = \frac{OD_{615}\text{-}0.474OD_{652}}{5.34} \quad (1)$$

Total RNA extraction and reverse transcription polymerase chain reaction (RT-PCR)

Cultures of *A. platensis* were harvested and then frozen in liquid nitrogen. Total RNA was extracted from cells using TRIZol reagent (Invitrogen, USA), following the manufacturer's protocol. DNA contamination was removed using RNase-free DNase (Promega, USA). One hundred nanograms of total RNA was reverse transcribed in a 20-µL reaction volume using specific primers and RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit following the manufacturer's instruction (Thermo Fisher Scientific, USA). The 286-bp of *glgA* gene, 231-bp of *cpcA* gene, and 284-bp of *16S rRNA* gene of *A. platensis* were amplified using PCR with the specific primer pairs, fglgA: 5′-TAC GGA CTC AGC CGA GAG TT-3′ and rglgA: 3′-GAA GGC AAA CCG CAT ATT GT-5′ for *glgA*, fcpcA: 5′-GAC CTA ACT ACG CGG CAA AC-3′ and rcpcA: 3′-CAG CAG CGT CAC CAG ATA AA-5′ for *cpcA*, and f16S: 5′-GTT TAC GGG ATT GGC TCA GA-3′ and r16S: 3′-TCT TGG TGA AAG CCG AGA GT-5′ for *16S rRNA*. The RT-PCR conditions of *glgA* were as follows: initial denaturation step at 94°C for 5 min, followed by 33 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 72ºC for 10 min followed by reaction storage at 4°C. In addition, RT-PCR conditions of *cpcA* and *16S rRNA* were performed by 30 and 25 cycles, respectively, of denaturation at 94°C for 45 s, then

annealing at 53°C and 50°C for 45 s, respectively, 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 products were separated by electrophoresis on a 1.2% agarose gel.

Statistical analysis

The experiments were conducted in triplicates (n=3) and the results were presented as mean values (±SD). One-way ANOVA was performed followed by Tukey's post hoc tests using the GraphPad Prism software version 5 (GraphPad Software, USA). A p value of < 0.05 was considered statistically significant.

Results and Discussion

Effect of different nitrogen concentrations and photoperiods on A. platensis biomass, glycogen, and lipid contents

A. platensis was grown in Zarrouk medium supplied with different nitrogen concentrations (control (2.5 g/L), 50% (1.25 g/L), 25% (0.625 g/L), and 0% (0 g/L)) under three different photoperiods (24:0 hr, 12:12 hr and 0:24 hr light:dark cycles) for 5 days. The cultures were started with the initial optical density (OD) at 730 nm of 0.5 at first day of cultivation and were sampled at an interval of a day. The results shown in Fig. 1A revealed that growth curve of *A. platensis* cultured in different nitrogen concentration under the three different photoperiods were not similar. The microalgal cells exhibited a prolonged lag phase under continuous illumination for 24 hr and 12:12 hr light:dark cycle in conditions supplied with nitrogen, while cells did not grow under continuous dark for 24 hr in all culture conditions during 5 days. The maximum growth of *A. platensis* was observed when the culture supplied with 2.5 g/L of nitrogen and exposed to illumination for 24 hr (40 μmolE/m^2/s). The highest biomass was obtained at day 5 when cells were grown in Zarrouk medium (2.5 g/L), was approximately 3.025 mg/mL under illumination for 24 hr (40 μmolE/m2/s) as shown in Fig. 1B. Among the environmental factors affecting the growth rates of *A. platensis*, light provides the fundamental energy to transfer electrons from water to $NADP^+$ forming NADPH (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate) and generate ATP (adenine triphosphate) that is essential factor in photosynthesis and photoautotrophic growth (Wahidin et al., 2013). In addition, nitrogen is considered one of the most important nutrients for growth, since it is a constituent in all structural and functional proteins such as enzymes, chlorophylls, and genetic materials in microalgal cells (Kim et al., 2016).

Fig. 2 showed the glycogen content of *A. platensis* cultured in Zarrouk medium supplied with different nitrogen concentration under different photoperiod cycles. The maximum glycogen content was obtained when nitrogen source in the culture was deprived under continuous illumination for 2 days. The significant increased glycogen content of *A. platensis* cells grown in N-deprived medium was 474±3.4 mg/L, approximately 1.7-fold increase, compared with those cells grown in Zarrouk medium. This was probably demonstrated that amino acids of N-deprived cells released from phycobiliprotein degradation could be further used to synthesize carbohydrate and lipid storage to maintain cell growth for a few days (Panda et al. 2006). Besides, N-deprived *A. platensis* cells accumulated neutral lipid in their cells which appeared as brightly fluorescent orange granules upon Nile-red staining (Fig.3A, B). It

was observed that more granules found in cells cultured under illumination rather than dark condition. Under continuous illumination for 2 days, the increased lipid content in N-deprived *A. platensis* cells was 9.6 ± 0.5% (w/w dw), approximately 4-fold increase, compared with those cells grown in Zarrouk medium (Fig.3C). The result indicated that neutral lipid was considered a normal constituent of *A. platensis* cells which could be induced in N-deprived cells under illumination condition (Duangsri et al., 2020). Previous finding demonstrated that light was essential for triacyl glyceride production and fatty acid synthesis in various bacterial species (Khotimchenko and Yakovleva, 2005). Although illumination promoted lipid accumulation in *A. platensis* and other cyanobacterial species, it was not required for lipid accumulation in *N. muscorum*. The lipid content of *N. muscorum* was highly accumulated when grown in the dark for 7 days (Sharma and Mallick 2005). Low concentration of ATP in cells during darkness likely resulted in low lipid depolymerization activity (Jau et al., 2005).

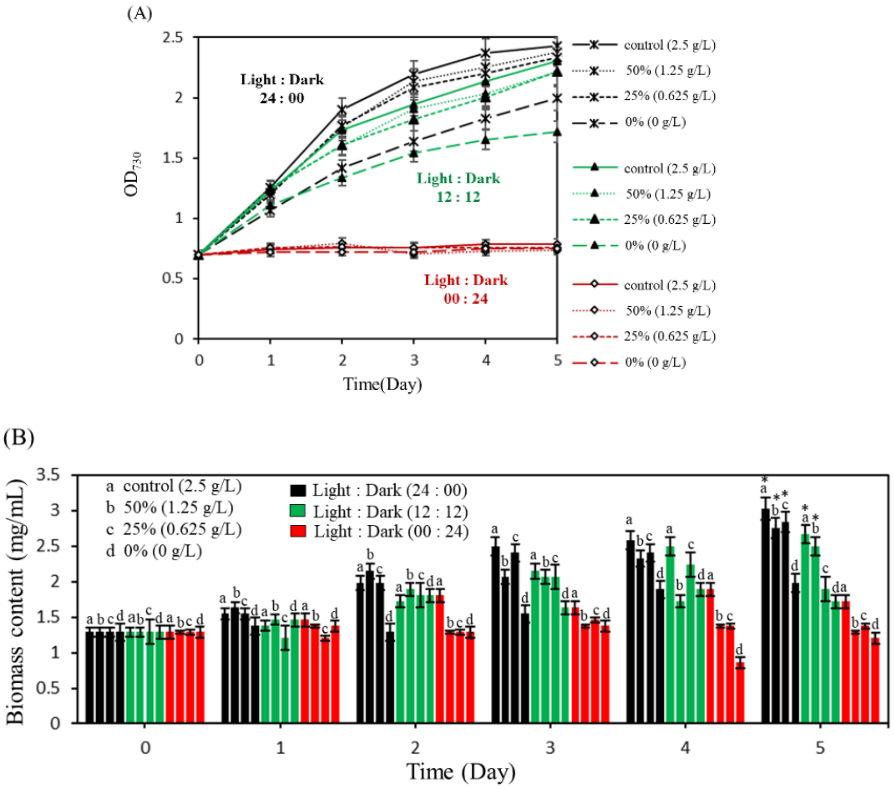


Fig. 1 Effect of different nitrogen concentrations and photoperiods on growth and biomass of *A. platensis*.: (A) Growth rate and; (B) biomass content when cultured in Zarrouk medium supplied with different concentration of nitrogen (control (2.5 g/L, solid lines), 50% (1.25 g/L, dotted lines), 25% (0.625 g/L, densely-dashed lines), and 0% (0 g/L, loosely-dashed lines)) under three different photoperiods (24:0 light:dark cycle (black lines), 12:12 light:dark cycle (green lines) and 0:24 hr light:dark cycle (red lines)) for 5 days. The letters (a, b, c, d) on bar charts indicate various nitrogen concentration. Asterisks (*) indicate significant different between control and treatments ($p < 0.05$).

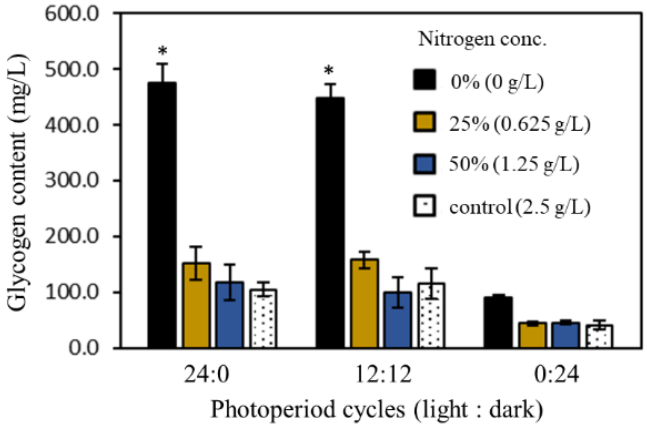


Fig. 2 Glycogen content of *A. platensis* cultured in Zarrouk medium supplied with different concentration of nitrogen (control (2.5 g/L), 50% (1.25 g/L), 25% (0.625 g/L), and 0% (0 g/L)) under three different photoperiods (24:0, 12:12 and 0:24 hr light:dark cycles) for 2 days (mean value ±SD). Asterisks (*) indicate significant different between control and treatments ($p < 0.05$).

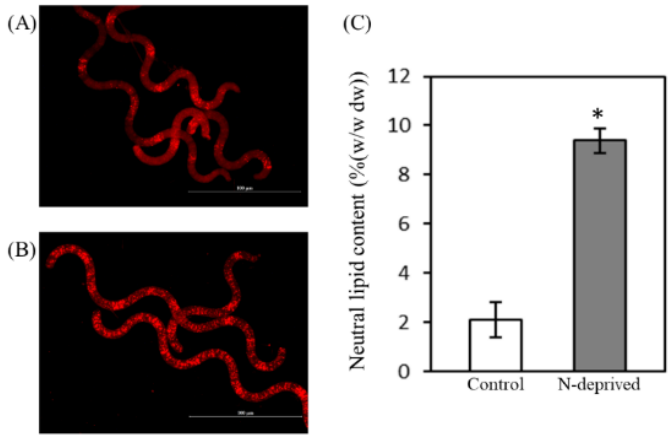


Fig. 3 Neutral lipid contents of *A.platensis* cultivated in Zarrouk medium (control) and N-deprived medium under continuous illumination (mean value ±SD). (A) Nile red stained cells grown in Zarrouk medium, (B) Nile red stained cells grown in N-deprived medium, (C) Neutral lipid contents. Asterisks (*) indicate significant different between control and treatments ($p < 0.05$).

Effect of different nitrogen concentrations and photoperiods on expression of glgA and cpcA genes of A. platensis

The expression of *A. platensis glgA* gene known to be involved in glycogen biosynthesis was analyzed by RT-PCR. Cells grown in Zarrouk medium with different nitrogen concentrations under continuous illumination or darkness were examined. Fig. 4A, C revealed that under continuous illumination and 12:12 hr light-dark cycle, the expression of *glgA* gene was found to be significantly higher in cells grown in N-deprived medium by 1.3-fold and 1.2-fold increase, respectively, rather than those cells grown in Zarrouk medium. On the contrary, under darkness the expression of *glgA* gene was found to be significantly lower in cells grown in N-deprived medium by 1.8-fold decrease, rather than those cells grown in Zarrouk medium.

The results suggested that the expression of *glgA* gene was light- and N-dependent, and the results raised the possibility that, when nitrogen was missing, amino acids released from proteins were immediately assimilated into other metabolites, including glycogen (Hasunuma et al., 2013). In addition, the nitrate was previously reported as a common nitrogen source for microalgae cultivation whereby cells could concentrate nitrate within their biomass and phycocyanin (Martínez et al., 2017; Eriksen, 2008). The biomass and phycocyanin decreased remarkably when nitrate concentration in the culture was depleted. Therefore, we further examined the expression of *A.platensis cpcA* gene known to be involved in C-phycocyanin biosynthesis using RT-PCR. Fig. 4B, D revealed that under continuous illumination and 12:12 hr light:dark cycle, the expression of *cpcA* gene was found to be significantly higher in cells grown in Zarrouk medium by 1.2-fold and 1.5-fold increase, rather than those cells grown in N-deprived medium. Conversely, under darkness the expression of *cpcA* gene was greatly decreased in cells grown in Zarrouk medium compared to that those cells grown in N-deprived medium. These results suggested that light and nitrogen source were required for the *cpcA* gene expression. However, *A. platensis* cells enhanced the upregulation of the *cpcA* gene in N-deprived condition under darkness. The result indicated that *cpcA* expression was required for C-phycocyanin synthesis in N-deprived cells under darkness. This was in line with previous report demonstrating that expression of the *cpcA* gene was greatly decreased during nitrogen starvation in *Anabaena variabilis* ATCC 29413 (Johnson et al., 1988).

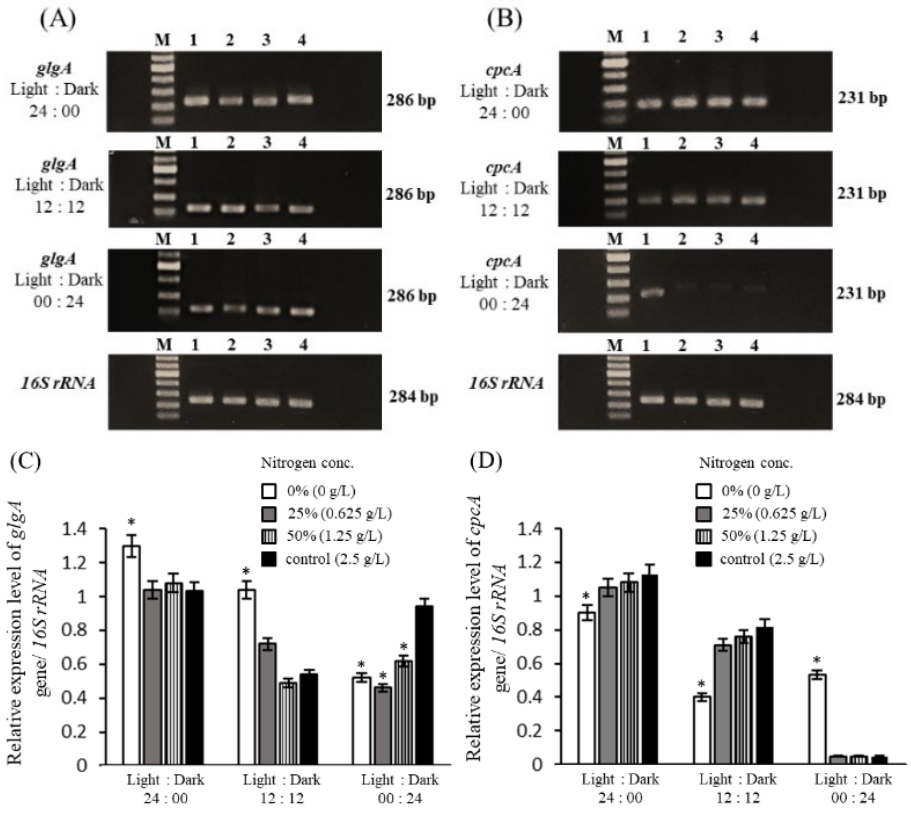


Fig. 4 Expression of *glgA* and *cpcA* genes of *A. platensis* grown in different nitrogen concentration conditions and three different photoperiods (24:0 hr, 12:12 hr and 0:24 hr light:dark cycles). The upper panel (A, B) shows typical example of DNA products resolved

on an agarose gel (Lane M: DNA ladder, lane 1: 0% (0 g/L), lane 2: 25% (0.625 g/L), lane 3: 50% (1.25 g/L), lane 4: control (2.5 g/L)) and the lower panel (C, D) shows the relative expression of *glgA* and *cpcA* genes (mean values ± SD). Asterisks (*) indicate significant different between control and treatments ($p < 0.05$).

Our results suggested that N-deprived *A. platensis* could effectively produce glycogen and lipid, which were mediated by the increased expression of *glgA* gene involved in glycogen biosynthesis under continuous light. The results of this study offered a promising utilization of alkaliphilic cyanobacteria *A. platensis* for biofuels production.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This research is funded by the Capacity Building of KU Students on Internationalization Program (KUCSI 2020), Kasetsart University, Bangkok, Thailand to N. Mudtham and W. Raksajit, by the Kasetsart University and Development Institute (KURDI), Bangkok, Thailand to W. Raksajit, by the Graduate School Fellowship Program in agriculture and agro-industry from the Agricultural Research Development Agency (Public Organization) as of fiscal year 2020 to W. Charunchaipipat, and by graduate study development scholarship from the National Research Council of Thailand as of 2020 fiscal year to C. Duangsri and W. Raksajit.

References

Aikawa, S., Izumi, Y., Matsuda, F., Hasunuma, T., Chang, J.-S., Kondo, A. 2012. Synergistic enhancement of glycogen production in *Arthrospira platensis* by optimization of light intensity and nitrate supply. Bioresour. Technol. 108: 211–215. doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.004

Bennett, A., Bogorad, L. 1973. Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga. J. Cell Biol. 58: 419–435. doi.org/10.1083/jcb.58.2.419

Cifuente, J.O., Comino, N., Trastoy, B., D'Angelo, C., Guerin, M.E. 2019. Structural basis of glycogen metabolism in bacteria. Biochem. J. 476: 2059–2092. doi.org/10.1042/BCJ20170558

Comer, A.D., Abraham, J.P., Steiner, A.J., Korosh, T.C., Markley, A.L., Pfleger, B.F. 2020. Enhancing photosynthetic production of glycogen-rich biomass for use as a fermentation feedstock frontiers. Energy Res. 8: 93. doi.org/10.3389/fenrg.2020.00093

Delrue, F., Alaux, E., Moudjaoui, L., Gaignard, C., Fleury, G., Perilhou, A., Richaud, P., Petitjean, M., Sassi, J.F. 2017. Optimization of *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) growth: from laboratory scale to pilot scale. Fermentation. 3: 59. doi.org/10.3390/fermentation3040059

Depraetere, O., Deschoenmaeker, F., Badri, H., Monsieurs, P., Foubert, I., Leys, N., Wattiez, R., Muylaert, K. 2015. Trade-off between growth and carbohydrate accumulation in nutrient-limited *Arthrospira* sp. PCC 8005 studied by integrating transcriptomic and proteomic approaches. PLoS ONE. 10: doi.org/10.1371/journal.pone.0132461

Deschoenmaeker F., Facchini R., Leroy B, Badri, H., Zhang, C.C., Wattiez, R. 2014. Proteomic and cellular views of *Arthrospira* sp. PCC 8005 adaptation to nitrogen depletion. Microbiology. 160: 1224–1236. doi.org/10.1099/mic.0.074641-0

Duangsri, 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. doi.org/10.1007/s10811-020-02272-4

Eriksen, N.T. 2008. Production of phycocyanin-a pigment with applications in biology, biotechnology, foods and medicine. Appl. Microbiol. Biotechnol. 80: 1–14. doi.org/10.1007/s00253-008-1542-y

Hasunuma, T., Kikuyama, F., Matsuda, M., Aikawa, S., Izumi, Y., Kondo, A. 2013. Dynamic metabolic profiling of cyanobacterial glycogen biosynthesis under conditions of nitrate depletion. J. Exp. Bot. 64: 2943–2954. doi.org/10.1093/jxb/ert134

Jau, M.H., Yew, S.P., Toh, P.S.Y., Chong, A.S.C., Chu, W.L., Phang, S.M., Najimudin, N., Sudesh, K. 2005. Biosynthesis and mobilization of poly(3-hydroxybutyrate) [P(3HB)] by *Spirulina platensis*. Int. J. Biol. Macromol. 36: 144–151. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2005.05.002

John, R.P., Anisha, G.S., Nampoothiri, K.M., Pandey, A. 2011. Micro and macroalgal biomass: a renewable source for bioethanol. Bioresour. Technol. 102: 186–193. doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.139

Johnson, T.R., Haynes, J.I., Wealand, J.L., Yarbrough, L.R. and Hirschberg, R. 1988. Structure and regulation of genes encoding phycocyanin and allophycocyanin from *Anabaena variabilis* ATCC 29413. J. Bacteriol. 170: 1858–1865. doi.org/10.1128/jb.170.4

Khotimchenko S.V., Yakovleva I.M. 2005. Lipid composition of the red alga *Tichocarpus crinitus* exposed to different levels of photon irradiance. Phytochemistry. 66: 73–79. doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.10.024

Kim, G., Mujtaba, G., Lee, K. 2016. Effects of nitrogen sources on cell growth and biochemical composition of marine *Chlorophyte tetraselmis* sp. for lipid production. Algae. 31: 257–266. doi.org/10.4490/algae.2016.31.8.18

Klanchui, A., Dulsawat, S., Chaloemngam, K., Cheevadhanarak, S., Prommeenate, P., Meechai, A. 2018. An improved genome-scale metabolic model of *Arthrospira platensis* C1 (iAK888) and its application in glycogen overproduction. Metabolites. 8: 84. doi.org/10.3390/metabo8040084

Liu, Q., Yao, C., Sun, Y., Chen, W., Tan, H., Cao, X., Xue, S., Yin, H. 2019. Production and structural characterization of a new type of polysaccharide from nitrogen-limited *Arthrospira platensis* cultivated in outdoor industrial-scale open raceway ponds. Biotechnol. Biofuels. 12: 131. doi.org/10.1186/s13068-019-1470-3

Machado, I.M., Atsumi, S. 2012. Cyanobacterial biofuel production. J. Biotechnol. 162: 50–56. doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.03.005

Markou, G., Angelidaki, I., Georgakakis, D. 2012. Microalgal carbohydrates: an overview of the factors influencing carbohydrates production, and of main bioconversion technologies for production of biofuels. Appl. Microbiol. Biotechnol. 96: 631–645. doi.org/10.1007/s00253-012-4398-0

Martínez, J.M., Luengo, E., Saldaña, G., Álvarez, I., Raso, J. 2017. C-phycocyanin extraction assisted by pulsed electric field from *Artrosphira platensis*. Food Res. Int. 99: 1042–1047. doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.029

Mathimani, T., Pugazhendhi, A. 2019. Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation. Biocatal. Agric. Biotechnol. 17: 326–330. doi.org/10.1016/j.bcab.2018.12.007

Möllers, K.B., Cannella, D., Jørgensen, H., Frigaard, N.-U. 2014. Cyanobacterial biomass as carbohydrate and nutrient feedstock for bioethanol production by yeast fermentation. Biotechnol. Biofuels. 7: 64. doi.org/10.1186/1754-6834-7-64.

Panda, B., Jain, P., Sharma, L., Mallick, N. 2006. Optimization of cultural and nutritional conditions for accumulation of poly-β-hydroxybutyrate in *Synechocystis* sp. PCC 6803. Bioresour. Technol. 97: 1296–1301. doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.013

Phélippé, M., Gonçalves, O., Thouand, G., Cogne, G., Laroche, C. 2019. Characterization of the polysaccharides chemical diversity of the cyanobacteria *Arthrospira platensis*. Algal Res. 38: 101426. doi.org/10.1016/j.algal.2019.101426

Sharma, L., Mallick, N. 2005. Accumulation of poly-β-hydroxybutyrate in *Nostoc muscorum*: regulation by pH, light-dark cycles, N and P status and carbon sources. Bioresour. Technol. 96: 1304–1310. doi.org/10.1016/j.biortech.2004.10.009

Shimamatsu, H. 2004. Mass production of *Spirulina*, an edible microalga. Hydrobiologia 512: 39–44. doi.org/10.1023/B:HYDR.0000020364.23796.04

Shrivastav, A., Mishra, S.K., Mishra, S. 2010. Polyhydroxyalkanoate (PHA) synthesis by *Spirulina subsalsa* from Gujarat coast of India. Int. J. Biol. Macromol. 46: 255–260. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.01.001

Singh, H., Varanasi, J. L., Banerjee, S., Das, D. 2019. Production of carbohydrate enrich microalgal biomass as a bioenergy feedstock. Energy. 188: doi.org/10.1016/j.energy.2019.116039

Wahidin, S., Idris, A., Shaleh, S.R.M. 2013. The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis* sp. (2013) Bioresour. Technol. 129: 7–11. doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.032

ความหลากชนิดและการแพร่กระจายของตัวอ่อนแมลงปอ (Odonata: Anisoptera) ในบ่อน้ำ จังหวัดนครนายกและนครปฐม

Species diversity and distribution of dragonfly nymphs (Odonata: Anisoptera) in ponds of Nakhon Nayok and Nakhon Pathom Provinces

ชูศักดิ์ สุขเกษม, บุญเสฐียร บุญสูง*

Chusuk Sukkasem, Boonsatien Boonsoong*

ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Zoology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Coresponding author. E-mail address: fscibtb@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาศึกษาความหลากชนิด และการแพร่กระจายของตัวอ่อนแมลงปอในบ่อน้ำ จังหวัดนครนายก และนครปฐม เก็บตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอทั้งหมด 15 สถานี (6 สถานีอ้างอิง และ 9 สถานีทดสอบ) จำนวน 4 ครั้ง ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2561 ถึงเดือนกรกฎาคม 2562 สถานี ทำการเลี้ยงตัวอ่อนระยะสุดท้ายจนเป็นตัวเต็มวัยเพื่อระบุชนิดแมลงปอ ผลการศึกษาพบตัวอ่อนแมลงปอทั้งสิ้น 2 วงศ์ 9 สกุล 10 ชนิด ผลการวิเคราะห์การจัดอันดับความสัมพันธ์ตัวอ่อนแมลงปอในแต่ละสถานีเก็บตัวอย่างในจังหวัดนครนายก และนครปฐม พบว่าสถานีอ้างอิงมีความหลากชนิดของตัวอ่อนแมลงปอมากกว่าสถานีทดสอบ ตัวอ่อนแมลงปอที่มีความสัมพันธ์กับสถานีอ้างอิง ได้แก่ *Brachydiplax chalybea, Macrodiplax cora, Rhyothemis phylis, Rhyothemis varigata* และ *Neurothemis fluctuans* มีแนวโน้มพบในบ่อน้ำที่มีแหล่งอาศัยที่เหมาะสม ขณะที่ตัวอ่อนแมลงปอชนิด *Ictinogomphus decoratus, Brachythemis contaminata* และ *Crocothemis servilia* มีแนวโน้มพบในบ่อน้ำที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์

คำสำคัญ: การแพร่กระจาย, ความหลากชนิด, ตัวอ่อนแมลงปอ, นครนายก, นครปฐม

Abstract

This study aims to investigate the species diversity and distribution of dragonfly nymphs in ponds of Nakhon Nayok and Nakhon Pathom provinces. Dragonfly nymphs were collected from 15 sampling stations (6 reference sites and 9 test sites) on 4 occasions between October 2018 and July 2019. The full-grown nymphs were reared until emerged to adults for species identification. The results showed that 10 species from 9 genera and two families of dragonfly nymphs were founded. The result of the PCA and CCA ordination plot showed that the reference sites were strongly correlated with *Brachydiplax chalybea, Macrodiplax cora, Rhyothemis phylis, Rhyothemis varigata* and *Neurothemis fluctuans* while *Ictinogomphus decoratus, Brachythemis contaminata* and *Crocothemis servilia* nymphs correlated with test sites.

Keywords: distribution, species diversity, dragonfly nymph, Nakhon Nayok, Nakhon Pathom

คำนำ

แมลงปอ (dragonflies) เป็นแมลงน้ำจัดอยู่ในอันดับ Odonata อันดับย่อย Anisoptera วงชีวิตส่วนใหญ่เป็นตัวอ่อนอยู่ในน้ำ และตัวเต็มวัยอาศัยบนบก แมลงปอเป็นกลุ่มที่มีบทบาทในสายใยอาหารของระบบนิเวศแหล่งน้ำจืดมีบทบาทเป็นผู้ล่าทั้งในระยะตัวอ่อนและตัวเต็มวัย ทั้งนี้แมลงปอยังเป็นอาหารของสัตว์อื่น เช่น ปลา นก เป็นต้น ตัวอ่อนแมลงปอมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในแหล่งน้ำปานกลาง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแหล่งอาศัยและคุณภาพน้ำจะส่งผลต่อความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอลดลง (Villalobos-Jimenez, 2016) ดังนั้นตัวอ่อนแมลงปอจึงสามารถใช้เป็นดัชนีชีวภาพในการประเมินคุณภาพของแหล่งน้ำจืด (จีรนันท์ และนฤมล, 2553) การศึกษาแมลงปอในประเทศไทยมีมาอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 1999 มีการรวบรวมรายชื่อแมลงปอไว้ประมาณ 314 ชนิด และจัดทำหนังสือ Atlas of Dragonflies of Thailand (Hamalainen and Pinratana, 1999) ซึ่งส่วนใหญ่มีรายงานเฉพาะตัวเต็มวัย ส่วนการศึกษาตัวอ่อนแมลงปอในปัจจุบันของประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่เป็นตัวอ่อนของแมลงปอที่อาศัยในแหล่งน้ำไหล (Boonsoong and Chainthong, 2014a, 2014b; Chainthong and Boonsoong, 2016) อย่างไรก็ตามข้อมูลตัวอ่อนแมลงปอในแหล่งน้ำนิ่งยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อยการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากชนิดและการแพร่กระจายของตัวอ่อนแมลงปอในบ่อน้ำจังหวัดนครนายก และนครปฐม และหาความสัมพันธ์ของชนิดตัวอ่อนแมลงปอกับปัจจัยสภาพแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาวิจัย

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก และอำเภอกำแพงแสน เก็บตัวอย่างจำนวนทั้งหมด 15 สถานี ประกอบด้วยสถานีอ้างอิง (reference site) ซึ่งเป็นบ่อน้ำที่ได้รับผลกระทบน้อย และสถานีทดสอบ (test site) ซึ่งเป็นบ่อน้ำที่ได้รับผลกระทบอย่างเห็นได้ชัด (Table 1 and Fig. 1) ตรวจวัดปัจจัยคุณภาพน้ำทางกายภาพ และเคมีบางประการ ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ความเป็นกรดด่าง การนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ปริมาณไนเตรท ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพน้ำ YSI 30 และปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพน้ำ YSI *550*A ประเมินคะแนนแหล่งอาศัย และเก็บตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอ 4 ครั้ง ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2561 จนถึงเดือนกรกฎาคม 2562

การเก็บตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอ

เก็บตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอเชิงคุณภาพโดยใช้สวิงรูปตัว D (D-frame net) บริเวณริมฝั่งที่มีพืชปกคลุมและบริเวณพื้นท้องน้ำให้ครอบคลุมทั้งบ่อ นำตะกอนที่ได้มาคัดแยกตัวอ่อนแมลงปอระยะสุดท้าย (ตุ่มปีกจะมีสีดำเข้ม) เพื่อนำไปเลี้ยงเชื่อมโยงสู่ตัวเต็มวัย

Table 1 All 15 sampling stations in Nakhon Nayok Province (NN) and Nakhon Pathom Province (NP)

Station code	Geographic coordinates	Use of the area around the station	Station type
NN01	14°16'28.3"N 101°02'55.7"E	Community and agriculture	Test station
NN02	14°16'27.5"N 101°03'00.0"E	Less disturbed	Reference station
NN03	14°16'23.1"N 101°02'32.6"E	Less disturbed	Reference station
NN04	14°16'32.3"N 101°02'29.0"E	Less disturbed	Reference station
NN05	14°16'29.4"N 101°03'08.3"E	Community	Test station
NN06	14°17'03.5"N 101°01'55.3"E	Community	Test station
NN09	14°11'08.6"N 101°02'26.5"E	Agriculture	Test station
NN12	14°05'57.4"N 100°57'28.8"E	Agriculture	Test station
NP01	13°58.081'N 100°00.357'E	Agriculture	Test station
NP02	13°57.339'N 100°00.571'E	Less disturbed	Reference station
NP03	14°05.088'N 099°57.812'E	Agriculture	Test station
NP05	14°01.664'N 099°53.338'E	Community	Test station
NP08	14°02.401'N 099°57.282'E	Agriculture	Test station
NP11	13°57'42.4"N 99°59'03.9"E	Less disturbed	Reference station
NP12	13°59.335'N 099°57.290'E	Less disturbed	Reference station



Fig. 1 Pond location map and some sampling stations: (A) Ban Na District, Nakhon Nayok Province and; (B) Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom Province

การเลี้ยงเชื่อมโยงตัวอ่อนและตัวเต็มวัยในห้องปฏิบัติการ และการจัดจำแนกชนิด

เลี้ยงตัวอ่อนแมลงปอระยะสุดท้ายในภาชนะโถดินเผาระยะวลา 15–30 วัน โดยใช้น้ำปราศจากคลอรีน ใส่ก้อนหินเพื่อเป็นที่เกาะพัก ให้อาหารตัวอ่อนด้วยหนอนแดง และใช้ผ้ามุ้งครอบภาชนะดินเผาเพื่อป้องกันตัวเต็มวัยที่ลอกคราบบินหนี ดองรักษาสภาพคราบตัวอ่อนและตัวเต็มวัยที่เลี้ยงเชื่อมโยงได้ด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา และจัดจำแนกชนิดตัวอ่อนแมลงปอจากตัวเต็มวัยที่เลี้ยงเชื่อมโยงได้ โดยใช้เอกสารของ Asahina (1993), Orr (2004) และ Hamalainen and Pinranata (1999)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดตัวอ่อนแมลงปอที่พบ สถานีเก็บตัวอย่าง และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมด้วยสถิติ Principal Components Analysis (PCA) และ Canonical Correspondence Analysis (CCA) ในโปรแกรมสำเร็จรูป PC-ORD version 7.01 (McCune a& Mefford, 2011)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความหลากชนิดและการแพร่กระจายของตัวอ่อนแมลงปอ

ผลการศึกษาความหลากชนิดของตัวอ่อนแมลงปอในบ่อน้ำจังหวัดนครนายก และนครปฐม พบตัวอ่อนแมลงปอจำนวน 2 วงศ์ 9 สกุล 10 ชนิด ได้แก่ วงศ์ Gomphidae 1 ชนิดได้แก่ *Ictinogomphus decoratus* และวงศ์ Libellulidae 9 ชนิด ได้แก่ *Brachydiplax chalybea, Brachythemis contaminata, Crocothemis servilia, Macrodiplax cora, Rhyothemis phylis, Rhyothemis varigata, Neurothemis fluctuans, Urothemis signata* และ *Zyxomma petiolatum* (ตารางที่ 2) จำนวนชนิดของแมลงปอที่พบมีความสอดคล้องกับการศึกษาความหลากชนิดของตัวอ่อนแมลงปอในห้วยหนองหิ้ง จังหวัดบึงกาฬ พบตัวอ่อนแมลงปอวงศ์ Libellulidae 7 ชนิด (กุลธิดา, 2555) และ ศศิธร (2561) ศึกษาความหลากชนิดของแมลงปอในสวนสาธารณะหนองนารี จังหวัดเพชรบูรณ์พบแมลงปอ 12 ชนิด เมื่อพิจารณาความหลากชนิดระหว่างสถานีอ้างอิงกับสถานีทดสอบพบว่าพบจำนวนชนิดของตัวอ่อนแมลงปอในสถานีอ้างอิงสูงกว่าสถานีทดสอบในพื้นที่ทั้งสองจังหวัด

ผลการวิเคราะห์การจัดอันดับด้วยข้อมูลพบ/ไม่พบตัวอ่อนแมลงปอในแต่ละสถานีเก็บตัวอย่าง จังหวัดนครนายก และ จังหวัดนครปฐม ด้วย PCA พบว่าสถานีอ้างอิงมีความหลากชนิดของตัวอ่อนแมลงปอมากกว่าสถานีทดสอบ (ภาพที่ 3) ตัวอ่อนแมลงปอที่มีความสัมพันธ์กับสถานีอ้างอิง ได้แก่ *Brachydiplax chalybea, Macrodiplax cora, Rhyothemis phylis, Rhyothemis varigata* และ *Neurothemis fluctuans* ในขณะที่ *Brachythemis contaminata* มีความสัมพันธ์กับสถานีทดสอบ สถานีอ้างอิงมีสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแมลงปอ เช่น พืชริมฝั่ง พืชน้ำปกคลุมเหมาะกับการวางไข่ของตัวเต็มวัย เป็นที่หลบภัยจากผู้ล่า และเป็นแหล่งอาศัยของเหยื่อ สอดคล้องกับการศึกษาของ Sandamini (2019) ที่ได้รายงานว่าจำนวนชนิดของแมลงปอเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มชนิดของพืชริมน้ำและพืชน้ำในสถานีเก็บตัวอย่าง และ Yixiong (2018) ที่พบว่าสังคมพืชริมน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแพร่กระจายของแมลงปอ

Table 2 Species of dragonfly larvae found in sampling stations in Nakhon Nayok Province and Nakhon Pathom Province

Family	Species Dragonfly larvae	Nakhon Nayok Province		Nakhon Pathom Province	
		Reference station	Test station	Reference station	Test station
Libellulidae	*Brachydiplax chalybea*	+	-	+	-
	Brachythemis contaminata	+	+	+	+
	Crocothemis servilia	+	+	+	+
	Macrodiplax cora	-	-	+	+
	Neurothemis fluctuans	+	-	+	+
	Rhyothemis phylis	+	-	+	-
	Rhyothemis variegata	+	-	+	-

Table 2 (continued).

Family	Species Dragonfly larvae	Nakhon Nayok Province		Nakhon Pathom Province	
		Reference station	Test station	Reference station	Test station
	Urothemis signata	+	+	+	-
	Zyxomma petiolatum	+	+	+	-
Gomphidae	*Ictinogomphus decoratus*	+	+	+	+
Total number of species		9	5	10	5

Note: + = find , - = Not found

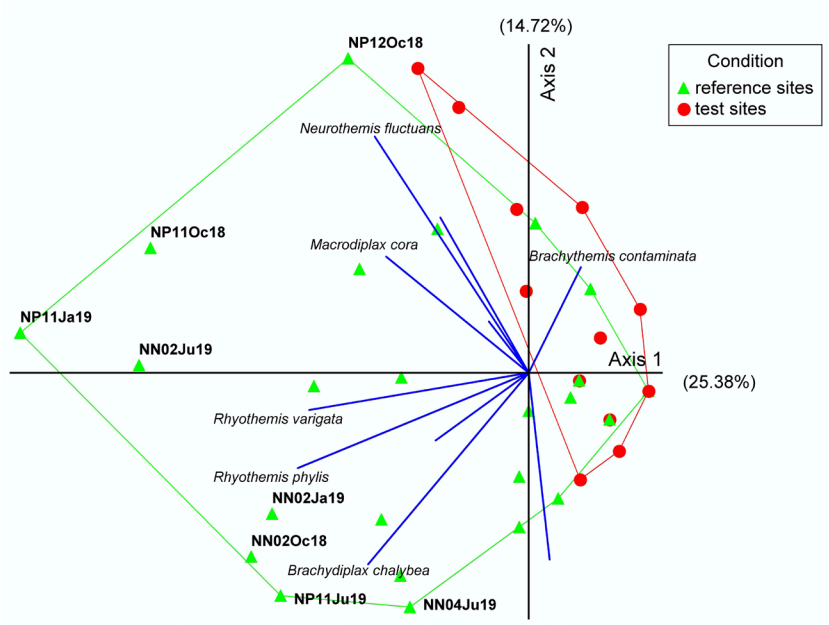


Fig 2 Results of the dragonfly larvae data rankings in the pond reference station. And the test station by PCA (Principal Component Analysis)

ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมกับการแพร่กระจายของตัวอ่อนแมลงปอ

ค่าเฉลี่ยปัจจัยทางกายภาพและเคมีของน้ำบางประการในสถานีอ้างอิงและสถานีทดสอบจังหวัดนครนายกและนครปฐม แสดงดังตารางที่ 3 สถานีอ้างอิงมีปัจจัยทางกายภาพและเคมีของน้ำแตกต่างจากสถานีทดสอบ ยกเว้นสถานีอ้างอิง NP02 เดือนเมษายน 2562 และเดือนกรกฎาคม 2562 เป็นช่วงที่มีการรื้อบ่อเกิดขึ้น ทำให้สภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณของแข็งละลายน้ำมีค่าสูงเหมือนกับสถานีทดสอบ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ลดลงมากซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเพชราพรรณและชายฉัตร (2559) พบว่าค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในแหล่งน้ำลดลงและการรื้อบ่อทำให้ตะกอนริมบ่อไหลลงไปทับถมในบ่อทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำและค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสมพิศ และนฤมล (2560) ผลการจัดอันดับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมกับการแพร่กระจายของ

ตัวอ่อนแมลงปอด้วยสหสัมพันธ์คาโนนิคอล (CCA) พบว่าการรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ในระยะทาง 100 เมตร (huact100m) มีความสัมพันธ์กับตัวอ่อนแมลงปอ *Ictinogomphus decoratus, Brachythemis contaminata* และ *Crocothemis servilia* (Fig. 3) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sandamini (2019) พบการแพร่กระจายของ *Brachythemis contaminata* และ *Crocothemis servilia* ในแหล่งอาศัยที่มีการรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์สูง การศึกษาของ Leksono (2017) พบว่า *Brachythemis contaminata* เป็นชนิดที่มีความทนสูงและพบการแพร่กระจายมากในแหล่งน้ำที่มีคุณภาพน้ำต่ำ ซึ่งแมลงปอในกลุ่มนี้อาจจะนำมาใช้ประโยชน์ในด้านตัวชี้วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของแหล่งน้ำได้

Table 3 Average of physical and chemical factors of some water in reference stations and testing stations in Nakhon Nayok Provinces and Nakhon Pathom Province

Physical and chemical factors.	Nakhon Nayok Province		Nakhon Pathom Province	
	Reference station	Test station	Reference station	Test station
Water temperature (°C)	31.14 ± 1.92	33.68 ± 2.77	30.36 ± 1.52	31.70 ± 1.91
Acidity-Alkalinity	5.72 ± 0.29	7.26 ± 0.69	6.71 ± 3.07	6.90 ± 2.58
Electric induction of water (µs/cm)	1225.95 ± 37.42	795.64 ± 1014.90	2117.26 ± 3168.80	1822.16 ± 3149.151
Amount of Dissolved oxygen (mg/l)	10.20 ± 2.26	8.48 ± 3.92	4.72 ± 2.14	5.65 ± 2.26
Amount of dissolved solids (mg/l)	649.28 ± 19.15	457.90 ± 530.58	1466.94 ± 2347.32	711.83 ± 341.94
Amount of nitrate (mg/l)	38.24 ± 14.87	22.26 ± 19.58	9.40 ± 6.27	12.56 ± 11.85
Amount of Chlorophyll A (µg/l)	24.33 ± 11.13	24.67 ± 23.09	13.29 ± 18.84	16.37 ± 10.85
Amount of Blue-green algae (µg/l)	2.62 ± 0.49	2.48 ± 3.65	0.71 ± 0.70	1.58 ± 1.66

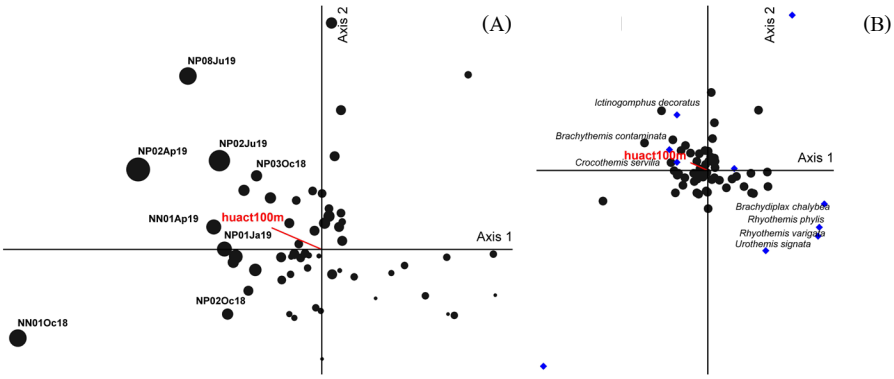


Fig. 3 Correlation analysis results Canonicol the relationship between dragonfly larvae Spread with environmental factors

สรุป

การศึกษาความหลากชนิดและการแพร่กระจายของตัวอ่อนแมลงปอพบพบตัวอ่อนแมลงปอจำนวน 2 วงศ์ 9 สกุล 10 ชนิด เมื่อพิจารณาความหลากชนิดระหว่างสถานีอ้างอิงกับสถานีทดสอบพบว่าพบจำนวนชนิดของตัวอ่อนแมลงปอในสถานีอ้างอิงสูงกว่าสถานีทดสอบตัวอ่อนแมลงปอชนิด *Brachydiplax chalybea, Macrodiplax*

cora, Rhyothemis phylis, Rhyothemis varigata และ *Neurothemis fluctuans* มีแนวโน้มพบในบ่อน้ำสถานีอ้างอิงมีแหล่งอาศัยที่เหมาะสม ขณะที่ตัวอ่อนแมลงปอชนิด *Brachythemis contaminata Ictinogomphus decoratus, Brachythemis contaminata* และ *Crocothemis servilia* มีแนวโน้มพบในบ่อน้ำที่ได้ผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านความหลากหลายทางชีวภาพ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (BDC-PG2-161004) และภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

กุลธิดา แก่นแก้ว, ชุติมา หาญจวณิช. 2555. แมลงปอจากห้วยหนองหิ้ง อำเภอเซกา จังหวัดบึงกาฬ. ใน: โครงการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 13. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

จีรนันท์ รัตนบุทา, นฤมล แสงประดับ. 2553. ความหลากชนิดและการกระจายตัวของตัวอ่อนแมลงปอในแม่น้ำพอง.วารสารวิจัย มข (ฉบับบัณฑิตศึกษา). 10: 1–6.

เพชราพรรณ สืบสันต์, ชายฉัตร บุญญานุสิทธ์. 2559. ความสัมพันธ์ระหว่างสังคมสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังขนาดใหญ่หน้าดินและพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมของอ่างเก็บน้ำสามแห่งในจังหวัดสุรินทร์. ใน: การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ 2559. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สมพิศ ชินภักดี, นฤมล แสงประดับ. 2560. ความหลากหลายของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินในน้ำตกตาดโตน จังหวัดอุดรธานี. ใน: การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ 2560. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ศศิธร ดวงจิตร, ศิริรัตน์ อิ่มรักษา, กาญจน์ คุ้มทรัพย์. 2563. ความหลากชนิดของแมลงปอในสวนสาธารณะหนองนารี อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์. Psru Journal of Science and Technology. 4: 61–72.

Asahina, S. 1993. A list of the odonata from Thailand (Parts I-Xxi). Bosco Offset, Bangkok, Thailand.

Boonsoong, B., Chainthong, D. 2014a. Description of the last stadium larva and female of *Microgomphus thailandica* Asahina (Odonata: Gomphidae). Zootaxa 3811: 271–279.

Boonsoong, B., Chainthong, D. 2014b. Description of the final instar larva of *Heligomphus selysi* Fraser (Odonata: Gomphidae). Zootaxa. 3764: 482–488

Chainthong, D., Boonsoong, B. 2016. Description of two final stadium *Onychogomphus* larvae from Thailand (Odonata: Gomphidae). Zootaxa. 4066: 561–570.

Hamalainen, M., Pinratana, A. 1999. Atlas of Dragonflies of Thailand maps by province. Chok Chai creation Printing Group Co. Ltd, Bangkok, Thailand.

Leksono, A.S., Feriwibisono, B., Arifianto, T., Pratama, A. F. 2017. The abundance and diversity of Odonata along an altitudinal gradient in East Java, Indonesia. Entomological Research. 47: 248–255

McCune, B., Mefford, MJ. 2011. PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data. Version 6.0. MjM Software, Gleneden Beach, USA.

Orr, A.G., Butler , S.G., Hamalainen, M., Kemp, R.G. 2004. Freshwater Invertebrates of the Malaysian Region. Academy of Sciences Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia. Jalan Tun Ismail. 50480: 902–904

Sandamini, P.M.M.A., Gunarathna, S.D., Chandana, E.P.S. 2019. Habitat quality and climate variability determine odonate species diversity and distribution patterns in selected habitats of southern Sri Lanka. Asian Journal of Conservation Biology 8: 47–57.

Villalobos-Jimenez, G., Dunn, A.M., Hassall, C. 2016. Dragonflies and Damselflies (Odonata) in Urban Ecosystems. A Review European Journal of Entomology 133: 217–232.

Yixiong C., Ng, C.Y., Robin, W.J.N. 2018. Diversity, distribution and habitat characteristics of dragonflies in Nee Soon freshwater swamp forest, Singapore. Gardens' Bulletin Singapore. 70: 123–153.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสำหรับกระบวนการผลิตที่มีการแจกแจงปัวซงที่มีศูนย์มาก

The comparison of efficiency of control chart for the Zero Inflated Poisson process

เนรัญชรา เกตุมี*, อุมาพร สุขบท

Narunchara Katemee*, Umaporn Sukkhabot

กลุ่มวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก 63000

Mathematics and Statistics Subject group, Science Disciplines, Faculty of Agricultural Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak 63000, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: narun_ess@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบแผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิ (*c-Chart*) เมื่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงปัวซงที่มีศูนย์มาก (*ZIP*) ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยของจำนวนรอยตำหนิ(μ_0) ค่าสัดส่วนของรอยตำหนิที่เป็นศูนย์ (ω) และการเปลี่ยนแปลงของจำนวนรอยตำหนิ (ρ) โดยแผนภูมิควบคุมที่เปรียบเทียบคือ แผนภูมิที่พัฒนาจากแผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิตัวแบบ *ZIP* (c_{MZIP}-*Chart*) และแผนภูมิที่พัฒนาจาก *c-Chart* (c_{MChi}-*Chart*) โดย c_{MZIP}-*Chart* เป็นการปรับค่าประมาณของค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนในขีดจำกัดควบคุมของ c_{ZIP}-*Chart* ส่วน c_{MChi}-*Chart* เป็นการปรับค่าความแปรปรวนในขีดจำกัดควบคุมของ *c-Chart* ด้วยพารามิเตอร์ไคกำลังสองไร้ศูนย์กลาง(λ_{Chi}) ที่เหมาะสม ทำการเปรียบเทียบกับ *c-Chart* ประสิทธิภาพแผนภูมิควบคุมพิจารณาร่วมกันทั้งค่าความยาววิ่งเฉลี่ยและค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมเฉลี่ย พบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยจำนวนรอยตำหนิไม่เปลี่ยนแปลง c_{MZIP}-*Chart* มีประสิทธิภาพทุกค่า μ_0 และ ω ส่วนค่าเฉลี่ยของจำนวนรอยตำหนิมีการเปลี่ยนแปลง c_{MChi}-*Chart* เป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพ ในทุกค่า μ_1 , ρ และ ω เท่ากับ 0.3-0.7 แต่เมื่อ ω สูงขึ้น พบว่า *c-Chart* เป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: กระบวนการผลิตที่มีการแจกแจงปัวซงที่มีศูนย์มาก, การแจกแจงแบบไคกำลังสองไร้ศูนย์กลาง, ความน่าจะเป็นคลอบคลุมเฉลี่ย, ความยาววิ่งเฉลี่ย, แผนภูมิควบคุมรอยตำหนิ

Abstract

This paper aims to efficiency comparison of nonconformities control chart (*c-Chart*) based on Zero-Inflated Poisson (*ZIP*) processes. The study in case of the mean of nonconformities (μ_0), the proportion of zero nonconformity (ω) and the mean shifts) ρ (. This research, two nonconforming control charts are studied. 1. the control chart is developed by adjusting both the estimated value of mean and variance used in control limit for *ZIP* control chart with we call c_{MZIP}-*Chart*. 2. the c_{MChi}-*Chart* is developed by replacing estimated value of the mean with the estimator of the mean of the non-central chi-square distribution (λ_{Chi}) and adjusting the variance with the inter-quartile range. The performance measure of these control charts such as the Average Run Length (*ARL*) and the Average Coverage Probability (*ACP*) are compared with the *c-Chart*. We have found that for the process in-control, c_{MZIP}-*Chart* performs for all μ_0 and ω. The process out-of-control, the c_{MChi}-*Chart* performs for all μ_1 , ρ and ω = 0.3-0.7. Whereas high ω , *c-Chart* is performed.

Keywords: average coverage probability, average run length, non-central chi-square distribution, nonconforming control chart, zero-inflated poisson process

คำนำ

c-Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมจำนวนรอยตำหนิที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตที่มีการแจกแจงปัวซง เมื่อสุ่มตัวอย่างตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขึ้นมาตรวจสอบ แล้วไม่พบรอยตำหนิบนผลิตภัณฑ์หน่วยนั้น หรือพบจำนวนรอยตำหนิที่เป็นศูนย์ หากเกิดจำนวนรอยตำหนิที่เป็นศูนย์มากในกระบวนการผลิต ทำให้การแจกแจงของจำนวนรอยตำหนิเรียกว่า Zero-Inflated Poisson (*ZIP*) ทำให้เกิดตัวประมาณค่าเฉลี่ยของการแจกแจงปัวซงจะมีค่าต่ำเกินจริง (Underestimate) และต่ำกว่าค่าความแปรปรวน ซึ่งเรียกว่าการเกิด Over Dispersion ส่งผลให้ *c-Chart* มีช่วงกว้างของขีดจำกัดควบคุมแคบเกินไป (Sim and Lim, 2008) นำไปสู่การเกิดข้อผิดพลาดสูงของอัตราการเตือนการไม่อยู่ภายใต้การควบคุม (False Alarm Rate) นักวิจัย Cohen (1991) ได้พัฒนาตัวแบบ *ZIP* ด้วยการใช้ตัวประมาณค่าแบบไลลิฮูดสูงสุด (The Maximum Likelihood Estimates: *MLEs*) เพื่อให้ค่าประมาณของพารามิเตอร์ λ ของการแจกแจงปัวซงที่ให้ค่าใกล้เคียงค่าจริง และได้มีนักวิจัยหลายคนนำไปประยุกต์ใช้ เช่น Gupta et al. (1996) และ Bohning et al. (1999) ต่อมา Sim and Lim (2008) ได้พัฒนาแผนภูมิควบคุมรอยตำหนิตามวิธี Jeffreys Prior Interval (c_J *-Chart*) โดยเปรียบเทียบกับ *c-Chart* และ c_{ZIP}*-Chart* พบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยของกระบวนการผลิตไม่เปลี่ยนแปลง c_J*-chart* เหมาะสม แต่กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง พบว่า *c-Chart* สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ดีกว่า แต่ให้ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมไม่ดีกว่าแผนภูมิควบคุมอื่นๆ วิลาสินี และธิดาเดียว (2010) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจาก Sim and Lim โดยการเพิ่มระดับค่าสัดส่วนของรอยตำหนิที่เป็นศูนย์ และเพิ่มระดับการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของกระบวนการผลิต พบว่าให้ผลการศึกษาใกล้เคียงกับ Sim and Lim เนรัญชรา และธิดาเดียว (2011) ได้ปรับขีดจำกัดควบคุม โดยปรับค่าประมาณของค่าเฉลี่ยและค่าประมาณของความแปรปรวนในขีดจำกัดควบคุมของ c_{ZIP}*-Chart* เรียก c_{MZIP}*-Chart* พบว่า c_{MZIP}*-Chart* มีประสิทธิภาพ เมื่อจำนวนรอยตำหนิในกระบวนการผลิตเปลี่ยนแปลงไป และพวกเขายังได้ศึกษาการแจกแจงของตัวแบบ *ZIP* ที่สามารถประมาณได้ด้วยการแจกแจงแบบ Non-central Chi-square ที่พารามิเตอร์ λ แตกต่างกัน พบว่า c_{MChi}*-Chart* เป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพเมื่อสัดส่วนของรอยตำหนิที่เป็นศูนย์เกิดขึ้นมาก

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิสำหรับตัวแบบปัวซงที่มีศูนย์มาก (*ZIP*) ทำการศึกษาแผนภูมิควบคุมที่พัฒนาจากแผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิตัวแบบ *ZIP* (c_{MZIP}*-Chart*) และแผนภูมิที่พัฒนาจาก *c-Chart* (c_{MChi}*-Chart*) โดยเปรียบเทียบกับ *c-Chart* เมื่อประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมพิจารณาด้วยค่าความยาววิ่งเฉลี่ย (Average Run Length: *ARL*) และค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมเฉลี่ย (Average Coverage Probability: *ACP*) โดยทำการศึกษาในแต่ละระดับค่าเฉลี่ยของจำนวนรอยตำหนิ และแต่ละระดับค่าสัดส่วนของรอยตำหนิที่เป็นศูนย์

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตัวแบบปัวซงที่มีศูนย์มาก (Zero-Inflated Poisson: ZIP)

Gupta and Tripathi (1996) ได้พัฒนาตัวแบบปัวซงที่มีศูนย์มากโดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นดังนี้

$$P(Y=y)=\begin{cases}\omega+(1-\omega)\exp(-\lambda) & , \ y=0\\ \dfrac{(1-\omega)\exp(-\lambda)\lambda^{y}}{y!} & , \ y>0\end{cases} \quad (1)$$

เมื่อ ค่า Y คือตัวแปรสุ่มแทนจำนวนรอยตำหนิที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ 1 หน่วยตัวอย่าง

ค่า λ คือค่าเฉลี่ยของจำนวนรอยตำหนิที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ 1 หน่วยตัวอย่าง

ค่า ω คือสัดส่วนจำนวนรอยตำหนิที่เป็นศูนย์ที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ 1 หน่วยตัวอย่าง

โดย $E(Y)=\mu=(1-\omega)\lambda$, $V(Y)=\mu+\left(\dfrac{\omega}{1-\omega}\right)\mu^{2}$

การแจกแจงแบบ Non-central Chi-square มีฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น (K. Krishnamoorthy (2006)) ดังนี้

$$f(Y=y)=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\exp\left(-\frac{\lambda_{Chi}}{2}\right)\left(\frac{\lambda_{Chi}}{2}\right)^{k}}{k!}\frac{\exp\left(-\frac{y}{2}\right)y^{\frac{n+2k}{2}-1}}{2^{\frac{n+2k}{2}}\tau\left(\frac{n+2k}{2}\right)} \quad , \ 0\le y<\infty \quad (2)$$

เมื่อ ค่า Y คือตัวแปรสุ่มของการแจกแจงแบบ non-central chi-square

ค่า n คือองศาความเป็นอิสระให้เท่ากับศูนย์

ค่า λ_{Chi} คือผลรวมกำลังสองของสัดส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Y

โดย $E(Y)=n+\lambda_{Chi}$, $V(Y)=2(n+2\lambda_{Chi})$ (3)

แผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิพื้นฐานชิวฮาร์ท (*c-Chart*) มีขีดจำกัดควบคุมดังนี้

$$\begin{aligned} UCL &= c+3\sqrt{c}\\ CL &= c\\ LCL &= c-3\sqrt{c}\end{aligned} \quad (4)$$

c คือค่าเฉลี่ยของจำนวนรอยตำหนิที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ 1 หน่วยตัวอย่าง ในกรณีที่ไม่ทราบค่า c จะประมาณด้วย $\overline{c}$

แผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิตัวแบบ ZIP (c_{ZIP}*-chart*) ในปี ค.ศ. 2008 Sim and Lim ได้ศึกษาตัวแบบ*ZIP* ที่ถูกปรับฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นจากสมการ (1) ดังนี้

$$P(Y=y) = \omega I_{(y,0)}+(1-\omega)g(y;\lambda) \ ; y=0,1,2,\ldots \quad (5)$$

เมื่อตัวแปรสุ่ม Y คือจำนวนรอยตำหนิของกระบวนการผลิตที่มีศูนย์มาก โดยกำหนดให้ ถ้า $y=0$ แล้ว $I_{(y,o)}=1$ และถ้า $y\neq 0$ แล้ว $I_{(y,o)}=0$ โดยที่ $g(y;\lambda)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการแจกแจงปัวซงพื้นฐาน โดยCohenได้ศึกษาค่าประมาณแบบไลลิฮูดสูงสุด (*MLEs*) ของพารามิเตอร์ λ ในตัวแบบ *ZIP* คือ

$$\hat{\lambda} = \overline{y}^{+}[1-e^{-\hat{\lambda}}] \quad (6)$$

เมื่อ $\overline{y}^{+}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตตัวอย่างที่เป็นบวก (y_i^{+}) จำนวน m_{+} ค่า เมื่อ m_{+} คือจำนวนของค่าสังเกต

ตัวอย่างที่เป็นบวก และ $\bar{y}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตตัวอย่างทั้งหมด โดยค่าประมาณของพารามิเตอร์ λ ถูกนำมาคำนวณขีดจำกัดควบคุมของ c_{ZIP}-*Chart* โดยมีหลักการสร้างแผนภูมิควบคุมเช่นเดียวกับ *c-Chart* ขีดจำกัดควบคุมของ c_{ZIP}-*Chart* เป็นดังนี้ (Xie et al. (2001))

$$\begin{aligned} UCL &= \hat{\lambda} + 3\sqrt{\hat{\lambda}} \\ CL &= \hat{\lambda} \\ LCL &= \hat{\lambda} - 3\sqrt{\hat{\lambda}} \end{aligned} \tag{7}$$

แผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิที่พัฒนาจากแผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิตัวแบบ ZIP (c_{MZIP}-*Chart*) เป็นการปรับทั้งค่าประมาณของค่าเฉลี่ยและค่าประมาณของความแปรปรวนในขีดจำกัดควบคุมของ c_{ZIP}-*Chart* และกำหนดให้แผนภูมินี้ชื่อว่า c_{MZIP}-*Chart* โดยมีขีดจำกัดควบคุมดังนี้

$$\begin{aligned} UCL &= \frac{\bar{c}}{(1-\omega)} + 3\sqrt{\bar{c} + \left(\frac{\omega}{1-\omega}\right)\bar{c}^{-2}} \\ LCL &= 0 \end{aligned} \tag{8}$$

เมื่อ $\frac{\bar{c}}{(1-\omega)}$ คือค่าประมาณของ λ ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของตัวแบบ *ZIP* และ $\sqrt{\bar{c} + \left(\frac{\omega}{1-\omega}\right)\bar{c}^{-2}}$ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวแบบ *ZIP*

แผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิที่พัฒนาจาก c-Chart (c_{MChi}-*Chart*) เป็นการปรับขีดจำกัดควบคุมของ *c-Chart* โดยประมาณค่าเฉลี่ยของตัวแบบ *ZIP* ด้วยตัวประมาณค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบ Non-central Chi-square ที่องศาความเป็นอิสระเท่ากับศูนย์ และปรับค่าความแปรปรวนของตัวแบบ *ZIP* ด้วยค่าพิสัยระหว่างควอร์ไทล์ $(IQR(c))$ ดังนั้น c_{MChi}-*Chart* มีขีดจำกัดควบคุมดังนี้

$$\begin{aligned} UCL &= E(Y) + 3\sqrt{IQR(c)} \\ LCL &= 0 \end{aligned} \tag{9}$$

เมื่อ $IQR(c) = Q_3 - Q_1,\ E(Y) = n + \lambda_{Chi}$

ขอบเขตการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย

ทำการศึกษาในกระบวนการผลิตที่มีค่าเฉลี่ยของจำนวนรอยตำหนิ (μ_0) = 4.5 และ 5.0 มีค่าเฉลี่ยของจำนวนรอยตำหนิในกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนแปลงไปคือ $\mu_1 = \mu_0 + \rho$ เมื่อ ρ = 0.00 และ 0.40 มีสัดส่วนของจำนวนรอยตำหนิที่เป็นศูนย์ (ω) = 0.30 (0.10) 0.90 มีระดับการเกิด Over Dispersion (φ) = 1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้ 1. ใช้โปรแกรม R จำลองข้อมูลจำนวนรอยตำหนิของกระบวนการผลิตที่มีศูนย์มากสำหรับตัวแบบ *ZIP* ที่ค่าพารามิเตอร์ $(n_0, \mu_0, \varphi, \omega)$ 2. หาค่าพารามิเตอร์ λ_{Chi} ของการแจกแจงแบบ Non-central Chi-square ที่ตรงกับพารามิเตอร์ของตัวแบบ *ZIP* โดยจะยอมรับว่าการแจกแจงของตัวแบบ *ZIP* ตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสามารถประมาณได้ด้วยการแจกแจง Non-central Chi-square ที่ค่าพารามิเตอร์ λ_{Chi} เมื่อผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงด้วยการทดสอบ Kolmogorov-Smirnov ได้ข้อสรุปว่ามีการแจกแจงเดียวกันไม่ต่ำกว่า 95% จากการจำลองค่าและการทดสอบสมมติฐานซ้ำ 20,000 ครั้ง ในแต่ละระดับค่าพารามิเตอร์ 3. สำหรับ *c-Chart* c_{MZIP}-*Chart*

และ c_{MChi}-*Chart* หาค่าเฉลี่ยของขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ จากการคำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิซ้ำ 100,000 รอบ ในแต่ละระดับค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ *ZIP* 4. คำนวณค่า *ARL* และ *ACP* ของแต่ละแผนภูมิที่ได้จากการจำลองข้อมูลซ้ำ 100,000 รอบ ในแต่ละระดับค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ *ZIP* 5. เปลี่ยนระดับค่าพารามิเตอร์ในการศึกษาจนครบตามที่กำหนดในขอบเขตการวิจัย

ผลการวิจัย

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมจะแสดงผลในบางระดับค่า μ_0, μ_1, ω และ ρ ได้ผลการวิจัยดังนี้ Table 1 แสดงค่า $\hat{\lambda}_{Chi}$ ของการแจกแจงแบบ Non-central Chi-square ที่ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงได้ข้อสรุปว่าตรงกับการแจกแจงของตัวแบบ *ZIP* ตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด พิจารณาในทุกระดับค่า μ เมื่อ ω มีค่าต่ำ พบว่า $\hat{\lambda}_{Chi}$ จะมีค่าใกล้เคียงค่า μ ของตัวแบบ *ZIP* แต่เมื่อ ω มีค่าสูงขึ้น (0.7–0.9) พบว่า $\hat{\lambda}_{Chi}$ จะมีค่าคงที่เท่ากับ 1.44 ในทุกระดับค่า μ สำหรับเมื่อกระบวนการผลิตไม่เปลี่ยนแปลง ($\rho = 0.00$) Table 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า ARL_0 และ *ACP* ของ *c-Chart* (*c*), c_{MZIP}-*Chart* (c_{MZIP}) และ c_{MChi}-*Chart* (c_{MChi}) พบว่าในทุกระดับค่า μ_0 และ ω นั้น c_{MZIP}-*Chart* ให้ค่า ARL_0 สูงสุด นั่นคือ c_{MZIP}-*Chart* เป็นแผนภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ช้าสุด และเมื่อพิจารณาการแสดงผลต่างแบบไม่คิดเครื่องหมายระหว่างค่า *ACP* กับค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นเป้าหมาย 0.9973 (*ACP-DIFF*) เฉพาะ c_{MZIP}-*Chart* ในทุกระดับค่า μ_0 และ ω พบว่า ให้ค่า *ACP-DIFF* ต่ำ นั่นคือ c_{MZIP}-*Chart* ให้ค่า *ACP* ใกล้เคียงค่าเป้าหมาย ดังนั้นหากพิจารณาร่วมกันทั้งค่า ARL_0 และ *ACP* ในทุกระดับค่า μ_0 และ ω พบว่า c_{MZIP}-*Chart* เป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพ สำหรับเมื่อกระบวนการผลิตเปลี่ยนแปลง ($\rho > 0.00$) Fig. 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า ARL_1 ในทุกระดับค่า μ_1, ω และ ρ พบว่า *c-Chart* และ c_{MChi}-*Chart* ให้ค่า ARL_1 ต่ำสุดใกล้เคียงกัน นั่นคือ *c-Chart* และ c_{MChi}-*Chart* เป็นแผนภูมิที่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้เร็วสุดใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่า *ACP-DIFF* เฉพาะ *c-Chart* และ c_{MChi}-*Chart* ใน Fig. 2 ในทุกระดับค่า μ_1 และ ρ เมื่อ $\omega = 0.3–0.7$ พบว่า c_{MChi}-*Chart* ให้ค่า *ACP- DIFF* ต่ำสุด นั่นคือให้ค่า *ACP* ใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่สุด แต่เมื่อ ω มีค่าสูงขึ้น พบว่า *c-Chart* ให้ค่า *ACP* ใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากกว่า ดังนั้นหากพิจารณาร่วมกันทั้งค่า ARL_1 และ *ACP* ในทุกระดับค่า μ_1 และ ρ เมื่อ $\omega = 0.3–0.7$ พบว่า c_{MChi}-*Chart* เป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพ แต่เมื่อ ω มีค่าสูงขึ้น พบว่า *c-Chart* เป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพ

Table 1 The reveals that for $\hat{\lambda}_{Chi}$ value of non-central chi-square which corresponds to the distribution of the *ZIP* model for each μ and ω values.

	ω	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
μ	4.5	3.08	3.08	2.50	1.90	1.44	1.44	1.44
	5.0	3.36	3.35	2.50	1.90	1.44	1.44	1.44

Table 2 The comparison of ARL_0 and ACP values of the c-*Chart* c_{MZIP}-*Chart* and c_{MChi}-*Chart* for each μ_0 and ω

μ_0	ω	*ARL*			*ACP*		
		c	c_{MZIP}	c_{MChi}	c	c_{MZIP}	c_{MChi}
4.5	0.3	34.483	765.894	82.7	0.9640	0.9993	0.9886
	0.5	10.821	823.361	48.4	0.9153	0.9991	0.9798
	0.7	6.125	609.331	10.2	0.8614	0.9986	0.9252
	0.9	11.021	244.54	9.7	0.9160	0.9960	0.9063
5.0	0.4	11.477.	818.811	51.2	0.9229	0.9993	0.9820
	0.6	5.549.	997.513	17.9	0.8679	0.9992	0.9479
	0.8	5.845	534.011	4.2	0.8570	0.9979	0.8059
	0.9	10.374	300.977	9.4	0.9143	0.9965	0.9018

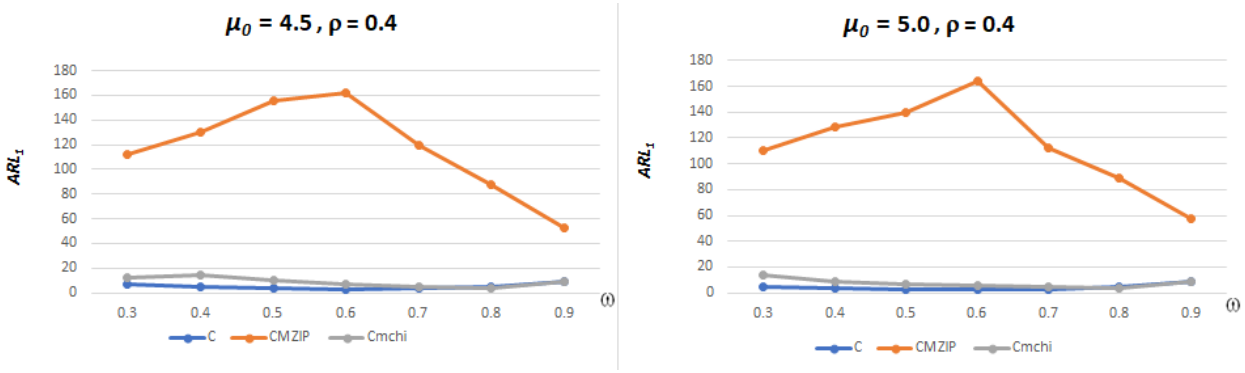


Fig. 1 The comparison of $ARL=ARL_1$ of the c-*Chart*, c_{MZIP}-*Chart* และ c_{MChi}-*Chart* for each μ_1 ω and ρ values.

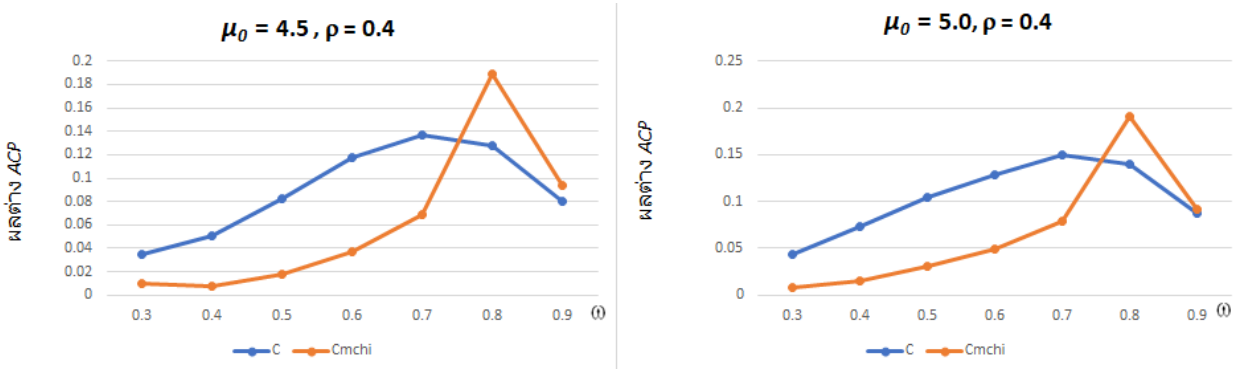


Fig. 2 The comparison of the *ACP - DIFF* of the c-*Chart*, c_{MZIP}-*Chart* and c_{MChi}-*Chart Chart* for each μ_1, ω and ρ values.

สรุป

การเปรียบเทียบแผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิ (*c-Chart*) เมื่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงปัวซงที่มีศูนย์มาก (*ZIP*) ได้แก่ c_{MZIP}-*Chart* และ c_{MChi}-*Chart* โดย c_{MZIP}-*Chart* เป็นการปรับค่าประมาณของ

ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนในขีดจำกัดควบคุมของ c_{ZIP}-*Chart* และ c_{MChi}-*Chart* เป็นการปรับค่าความแปรปรวนในขีดจำกัดควบคุมของ *c-Chart* ด้วยพารามิเตอร์ไคกำลังสองไร้ศูนย์กลาง(λ_{Chi}) ที่เหมาะสม ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิทั้ง 2 แบบกับ *c-Chart* ประสิทธิภาพของแผนภูมิจะพิจารณาร่วมกันทั้งค่า *ARL* และค่า *ACP* ได้ผลสรุปแผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพแสดงดังใน Table 3

Table 3 The preferable control charts for each situation process

Change in the number of defects;	Number average Blemishes (μ_0 / μ_1)	Number proportion Blemishes at Zero (ω)	Powerful control charts		
			Consider the value *ARL*	Consider the value *ACP*	Total Consider the value *ARL* and *ACP*
Unchanged change	4.5 and 5.0	0.3–0.9	c_{MZIP}-*Chart*	c_{MZIP}-*Chart*	c_{MZIP}-*Chart*
		0.3–0.7	*c-Chart* , c_{MChi}-*Chart*	c_{MChi}-*Chart*	c_{MChi}-*Chart*
	4.5 and 5.0	0.8–0.9	*c-Chart*	*c-Chart*	*c-Chart*

เอกสารอ้างอิง

วิลาสินี, ปีระจิตร, ธิดาเดียว. 2010. แผนภูมิควบคุมรอยตำหนิสำหรับกระบวนการผลิตที่มีศูนย์มาก. การประชุมวิชาการสถิติและสถิติประยุกต์ ครั้งที่ 11. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, หน้า 61.

เนรัญชรา, ธิดาเดียว. 2011. แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวแบบปัวซงที่มีศูนย์มาก. การประชุมวิชาการสถิติและสถิติประยุกต์ระดับชาติ ครั้งที่ 12, สงขลา, หน้า 51.

Bohning, D., Dietz, E., Schlattmann, P. 1999. The zero-inflated poisson model and the decayed, missing and filled teeth index in dental epidemiology. Journal of the Royal Statistical Society-Series 162: 195–209.

Gupta, P.L., Gupta, R.C., Tripathi, R.C. 1996. Analysis of zero-adjusted count data. Computational Statistics & Data Analysis 23: 207–218.

Krishnamoorthy, K. 2006. Handbook of statistical distribution with applications. Taylor & Francis Group. New York, USA, pp. 207–212.

Sim, C.H., Lim, M.H. 2008. Attribute charts for zero-inflated processes. Journal of Communications in Statistics-Simulation and Computation 37: 1440–1452.

สาขาวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์
Subject: Engineering and Architecture

ภาคบรรยาย
Oral Presentation

ผลกระทบของข้อบกพร่องที่มีต่อพฤติกรรมและกำลังยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต

Effects of defect on the behavior and bond strength of FRP/concrete bond joints

ทศพล ทองอ่อน*, จักรพันธ์ เทือกต๊ะ

Tossapon Thong-oon*, Chakrapan Tuakta

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: tossapon96@gmail.com

บทคัดย่อ

ข้อบกพร่องในรูปแบบรอยหลุดลอกที่รอยต่อระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer หรือ FRP) และคอนกรีต หรือช่องว่างภายในชั้นอีพอกซี่ อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการติดตั้งหรือหลังจากการใช้งานแบบเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตด้วย FRP ซึ่งงานวิจัยในอดีตที่มีอยู่อย่างจำกัดได้บ่งชี้ว่า การเกิดขึ้นของข้อบกพร่องนั้น มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้สมรรถนะโดยรวมขององค์อาคารคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย FRP ลดลง โดยเฉพาะการใช้งานแบบพันธะยึดเหนี่ยววิกฤติ (bond – critical application) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับแรง สติฟเนส และความคงทนของโครงสร้างลดลง และอาจเกิดการวิบัติก่อนที่คาดการณ์ไว้หากไม่ได้รับการแก้ไข โดยงานวิจัยได้ศึกษาผลกระทบของข้อบกพร่องในรูปแบบของช่องว่างที่อยู่ในรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต โดยใช้คานคอนกรีตล้วนขนาดเล็กที่มีรอยบากกึ่งกลางคาน และเสริมกำลังด้วย FRP เพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะของข้อบกพร่องในการติดตั้ง FRP ในรูปแบบต่างๆ คือ ความกว้าง ขนาด และตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่องในรอยต่อ ที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวและพฤติกรรมของรอยต่อ จากการศึกษาพบว่าข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต มีผลต่อการแจกแจงของหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อ และส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของรอยต่อลดลงได้ในหลายกรณี

คำสำคัญ: ข้อบกพร่อง, รอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต, กำลังยึดเหนี่ยว, หน่วยแรงเฉือนในรอยต่อ

Abstract

Defects such as debonded region at FRP/concrete interface (or void in epoxy layer), which can occur during installation or over time in fiber-reinforced polymer (FRP) strengthened concrete structures. Limited numbers of researches have showed that the overall performance of reinforced concrete members strengthened with FRP can deteriorate due to the presence of defects, especially in bond-critical applications. This can result in reduction of load capacity, stiffness, and durability, potentially causing premature failure, if not treated properly. This study investigated the effects of defect (or defect criticality) at bond level, using 3-point bending test of small pre-notched plain concrete beam specimens strengthened with FRP.The defect was in the form of debonded region at FRP/concrete interface. The parameters included FRP configurations, size and location of defect. The results have showed that, in most cases, the distribution of interfacial shear stress and bond strength were affected by the presence of defects.

Keywords: bond strength, defect, FRP/concrete interface, interfacial shear stress

บทนำ

ปัจจุบัน การปรับปรุงหรือซ่อมแซมอาคารเกิดขึ้นมากในประเทศไทย โดยเฉพาะอาคารที่มีอายุการใช้งานมาเป็นเวลานาน หรืออาคารที่ต้องการปรับปรุง ต่อเติม เพิ่มเติมโครงสร้างอื่นๆ เข้าไป ซึ่งมีผลต่อการรับกำลังของโครงสร้างดังกล่าว รวมถึงผลของการเกิดอุบัติเหตุ เช่น เพลิงไหม้ แผ่นดินไหว เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อช่วยในการเสริมกำลังโครงสร้าง ให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยวัสดุที่นิยมใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบัน คือ วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer หรือ FRP) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ มีอัตราส่วนระหว่างกำลังและน้ำหนักที่สูง (strength-to-weight ratio) มีความคงทนต่อการกัดกร่อนที่สูง น้ำหนักเบา การติดตั้งไม่ซับซ้อน สามารถเข้าติดตั้งในบริเวณที่ยากต่อการทำงาน เป็นต้น ทั้งนี้ การติดตั้งวัสดุ FRP ที่ผิวขององค์อาคารคอนกรีตโดยใช้กาวเชื่อมประสาน (adhesive) เช่น อีพอกซี่จะส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกและสติฟเนสขององค์อาคารโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลขององค์อาคารที่เสริมกำลังด้วย FRP และกระบวนการออกแบบอยู่มากมาย แต่ยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาในด้านผลกระทบของข้อบกพร่อง ความคงทน และการบำรุงรักษาระบบเสริมกำลังหลังการติดตั้ง เนื่องจากการติดตั้งจำเป็นต้องเตรียมความพร้อมของพื้นผิว และทักษะการติดตั้งที่ดี

ระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP นั้น จะทำงานในลักษณะของวัสดุประกอบ (composite action) ร่วมกับองค์อาคารคอนกรีตในการรับแรงดัดและแรงเฉือน ดังนั้นสมรรถนะของรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต (FRP/concrete interface) จึงมีความสำคัญ ซึ่งในการออกแบบจะสมมุติให้รอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP มีความสมบูรณ์ อย่างไรก็ดี ข้อบกพร่องในรูปแบบของรอยหลุดลอกระหว่าง FRP และคอนกรีตหรือระหว่างชั้น FRP เองอาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการติดตั้งโดยแรงงานที่ไม่ชำนาญ หรือเกิดจากความเสียหาย การเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมในระหว่างการใช้งาน มีงานวิจัยอยู่จำนวนหนึ่งที่ได้นำเสนอการเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP และข้อบกพร่องในการเสริมกำลังของวัสดุ FRP เช่น การศึกษาการเสริมกำลังแผ่นพื้นคอนกรีตด้วย FRP (Seim et al., 2001) การศึกษาผลกระทบของผิวหน้าคอนกรีตที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมก่อนการติดตั้ง FRP (Kalayci et al., 2009) การศึกษาผลกระทบของข้อบกพร่องต่อความคงทนของระบบเสริมกำลัง FRP (Karbhari et al., 2008) การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นต่อพฤติกรรมของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP และคอนกรีตในระยะยาว (Dai et al., 2010) เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของข้อบกพร่องที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยว โดยจะเน้นที่การพิบัติที่รอยต่อระหว่าง FRP และองค์อาคารคอนกรีตที่มีผลต่อกำลังรับแรงดัด โดยใช้วิธีการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตขนาดเล็กที่มีรอยบากที่บริเวณกึ่งกลางคาน พร้อมติดตั้ง FRP ในแนวการรับแรงดัดของคาน และได้กำหนดตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่องของตัวเชื่อมประสาน นำไปทดสอบภายใต้แรงดัดด้วยเครื่องทดสอบ เอนกประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการหลุดลอกในรอยต่อต่อลักษณะการวิบัติ กำลังยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP และคอนกรีต และการแจกแจงของหน่วยแรงเฉือนที่รอยต่อ

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากข้อบกพร่องที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP และคอนกรีต โดยการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตล้วนขนาด 125 × 125 × 700 มม. พร้อมรอยบาก ผลิตจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดทรงกระบอกที่ 28 วัน เท่ากับ 32 MPa ติดตั้งด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอนชนิดแผ่นแข็ง (FRP laminate) ขนาด 50 × 600 มม. หนา 1.2 มม. ที่ท้องคาน โดยฝั่งที่ไม่ได้พิจารณาการหลุดลอก ทำการติดตั้งแผ่นเส้นใยคาร์บอนชนิดแผ่นอ่อน (FRP sheet) สำหรับพันยึดที่ปลายแผ่น FRP ไว้ เพื่อบังคับให้มีการหลุดลอกฝั่งเดียว มีตัวอย่างคานทั้งหมด 30 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นตัวอย่างคานควบคุม 3 ตัวอย่าง และคานที่มีจุดบกพร่อง (defect) 27 ตัวอย่าง ซึ่งจุดบกพร่องซึ่งจุดบกพร่องได้จากการแปะแถบกาวเทฟล่อนตามขนาดและตำแหน่งจุดบกพร่องที่กำหนดก่อนติดตั้ง FRP ดังแสดงใน Fig 1

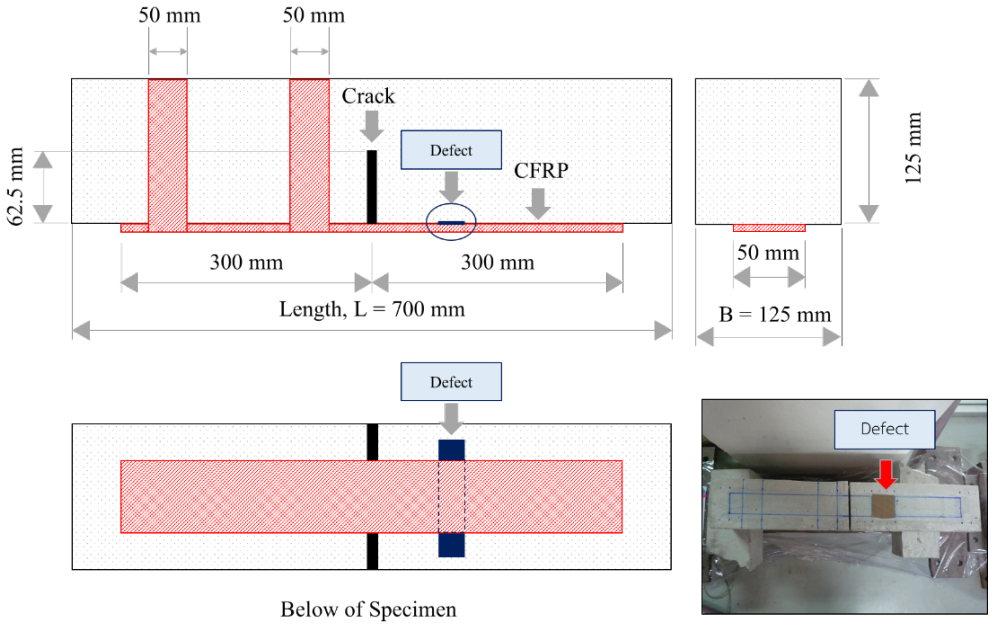


Fig. 1 Schematic representation of beam specimen

ในงานวิจัยนี้ แบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ติดตั้ง CFRP โดยไม่มีจุดบกพร่อง จำนวน 3 ตัวอย่าง กลุ่มที่ 2 ติดตั้ง CFRP และมีจุดบกพร่องขนาด 20 มม. ที่ตำแหน่ง 20 มม. 60 มม. และ 100 มม. จากกึ่งกลางคาน จำนวนอย่างละ 3 ตัวอย่าง กลุ่มที่ 3 ติดตั้ง CFRP และมีจุดบกพร่องขนาด 40 มม. ที่ตำแหน่ง 20 มม. 60 มม. และ 100 มม. จากกึ่งกลางคาน จำนวนอย่างละ 3 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ 4 ติดตั้ง CFRP และมีจุดบกพร่องขนาด 60 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง 20 มม. 60 มม. และ 100 มม. จากกึ่งกลางคาน จำนวนอย่างละ 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง รายละเอียดดัง Table 1 ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (strain gauge) ที่ผิวบนของ FRP ทุกระยะ 20 มม. ตั้งแต่รอยบากที่กึ่งกลางคานตัวอย่างจนถึงระยะปลายแผ่น FRP ด้านที่พิจารณา โดยในช่วงจุดบกพร่อง ทำการติดตั้ง strain gauge ที่ตำแหน่งเริ่มต้น ตำแหน่งกึ่งกลางและตำแหน่งท้ายของจุดบกพร่อง เพื่อดูพฤติกรรมในตำแหน่งดังกล่าว

Table 1 beam specimen

Specimens	Defect Size (mm)	Location of Defect * (mm)
Control	No Defect	No Defect
D20L20	20	20
D20L60	20	60
D20L100	20	100
D40L20	40	20
D40L60	40	60
D40L100	40	100
D60L20	60	20
D60L60	60	60
D60L100	60	100

*Location from midspan

การทดสอบตัวอย่างคาน

ทดสอบคานตัวอย่างภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบ 3 จุด (3-point bending) โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 650 มม. ตาม Fig. 2 ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ให้แรงกดโดยควบคุมความเร็วของหัวกดที่ 0.25 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งคานตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกแรงกระทำ การโก่งที่กึ่งกลางคาน และค่าความเครียดที่ได้จาก strain gauge โดยเครื่อง data logger เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากข้อบกพร่องที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP และคอนกรีต จากผลการทดสอบ สามารถนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ ใน FRP และสามารถวิเคราะห์การแจกแจงหน่วยแรงเฉือนที่รอยต่อโดยสมมุติให้ผิวคอนกรีตไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างการเพิ่มแรงดึงที่ปลายด้านหนึ่งของ FRP ค่าของหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP คำนวณได้ตาม Equation 1 (Dai et al, 2005)

$$\tau_i = \frac{E_f t_f (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{\Delta x} \quad (1)$$

โดยที่ τ_i = ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนที่ตำแหน่งของ strain gauge i

ε_i และ $\varepsilon_{(i-1)}$ = ค่าของความเครียดที่ได้จาก strain gauge i และ i-1

E_f = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP

t_f = ความหนาของ FRP

Δx = ระยะห่างระหว่าง strain gauge i และ i-1



Fig. 2 Testing of beam specimen in laboratory

ผลและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ สามารถจำแนก ได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ พฤติกรรมการพิบัติของรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าความเครียดใน FRP การแจกแจงหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต และรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวของ FRP (bond-slip)

พฤติกรรมการพิบัติของรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต

การพิบัติของคานตัวอย่างเป็นแบบการหลุดลอกของ FRP โดยเริ่มจากตำแหน่งกึ่งกลางคาน และเคลื่อนที่ไปสู่ปลายคานตามแนวรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต ตามด้วยการแตกร้าวที่กึ่งกลางคานแบบทันทีทันใดพร้อมๆกับการหลุดลอกอย่างสมบูรณ์ของ FRP ดังแสดงใน Fig. 3



Fig. 3 Debonding failure in specimen

เมื่อเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดของคานตัวอย่างทั้งสองแบบ พบว่า พฤติกรรมการหลุดลอกระหว่าง FRP และคอนกรีต ในคานตัวอย่างที่ไม่มีข้อบกพร่องเป็นแบบต่อเนื่องไปจนตัวอย่างเกิดการพิบัติโดยสมบูรณ์ ในขณะที่คานตัวอย่างที่มีข้อบกพร่องแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การหลุดลอกช่วงที่ 1 เป็นการหลุดลอกตั้งแต่รอยบากถึงจุดบกพร่อง และการหลุดลอกช่วงที่ 2 เป็นการหลุดลอกจากจุดบกพร่องไปที่ปลายแผ่น FRP โดยคานตัวอย่าง D20L20, D40L20 และ D60L20 มีการหลุดลอกช่วงที่ 1 ภายใต้แรงกระทำ 0.99 kN, 1.04 kN และ 1.53 kN ตามลำดับ ในขณะที่คานตัวอย่าง D20L60, D20L100, D40L60, D40L100, D60L60 และ D60L100 มีการหลุดลอกช่วงที่ 1 ภายใต้แรงกระทำประมาณ 50 – 70% ของแรงกระทำสูงสุด (max load) ในส่วนการหลุดลอกช่วงที่ 2 มีการหลุด

ลอกภายใต้แรงกระทำใกล้เคียงแรงกระทำสูงสุด ก่อนที่คานตัวอย่างคอนกรีตจะแตกหักตามรอยบากต่อไปในทุกคานตัวอย่าง ดัง Table 2

Table 2 Load for FRP debonding

Specimens	Max load (kN)	First debonding load (from crack to defect) (kN)	Second debonding load (from defect to last strain gauge) (kN)
Control	21.96	-	-
D20L20	17.99	0.99	17.50
D20L60	19.35	11.95	16.80
D20L100	22.74	17.02	23.46
D40L20	28.43	1.04	27.95
D40L60	24.37	13.01	23.64
D40L100	24.30	17.92	23.47
D60L20	19.57	1.53	18.05
D60L60	20.01	9.64	18.63
D60L100	26.45	15.69	24.61

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าความเครียดใน FRP

แสดงการแจกแจงของค่าความเครียดใน FRP ภายใต้แรงกระทำขนาดต่างๆ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่ 1 เป็นช่วงก่อนการหลุดลอกช่วงที่ 1 ซึ่งความเครียดเกิดขึ้นเฉพาะในรอยต่อส่วนก่อนจุดบกพร่อง โดยค่าความเครียดสูงสุดจะอยู่ที่รอยบากที่กึ่งกลางคาน และแบบที่ 2 เป็นช่วงภายหลังการหลุดลอกช่วงที่ 1 ค่าความเครียดที่จุดบกพร่องมีค่าสูงขึ้นและมีผลทำให้ค่าความเครียดหลังจุดบกพร่องมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับแรงกระทำที่ทำให้เกิดการหลุดลอกใน Table 2 เมื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ตำแหน่งท้ายจุดบกพร่องแรงกระทำที่เท่ากันดังแสดงใน Fig. 4A พบว่าในการหลุดลอกช่วงที่ 1 จุดบกพร่องที่ตำแหน่ง 20 มม. มีค่าความเครียดใน FRP มากกว่ากรณีของข้อบกพร่องที่ตำแหน่งอื่น และค่าความเครียดเพิ่มขึ้นตามขนาดของจุดบกพร่อง แต่สำหรับการหลุดลอกช่วงที่ 2 พบว่า จุดบกพร่องที่ตำแหน่ง 20 มม.และ 40 มม. มีค่าความเครียดมากกว่ากรณีของข้อบกพร่องตำแหน่งอื่น โดยแนวโน้มค่าความเครียดมีลักษณะเดียวกับการหลุดลอกช่วงที่ 1 ดัง Fig. 4B นั้นคือ จุดบกพร่องขนาดใหญ่ จะมีค่าความเครียดที่มากกว่าขนาดจุดบกพร่องขนาดเล็ก

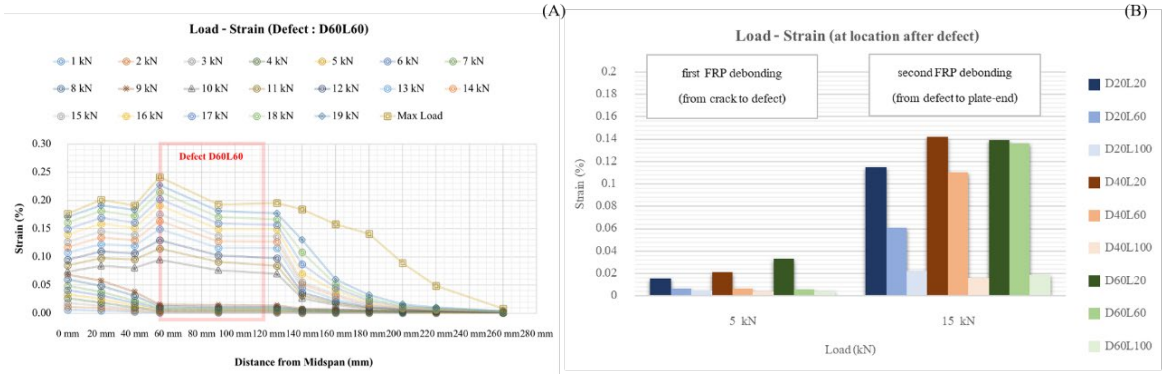


Fig. 4 Strain distribution in FRP. (A) example: specimen D60L60; (B) all specimens at location after defect

การแจกแจงหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต

Fig. 5 แสดงตัวอย่างการแจกแจงของหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อในตัวอย่างที่มีข้อบกพร่อง พบว่า ในการหลุดลอกช่วงที่ 1 หน่วยแรงเฉือนในรอยต่อมีค่าสูงตั้งแต่ช่วงรอยบากถึงจุดบกพร่อง และเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำ ส่วนตำแหน่งหลังจุดบกพร่องมีหน่วยแรงเฉือนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าสูงสุดในตำแหน่งใกล้ข้อบกพร่องดัง Fig. 5A ในการหลุดลอกช่วงที่ 2 พบว่า เนื่องจากบริเวณรอยบากถึงจุดบกพร่อง FRP ได้มีการหลุดลอกไปแล้ว ค่าความเครียดที่ตำแหน่งดังกล่าวจึงมีค่าลดลง ในขณะที่ ช่วงตำแหน่งตั้งแต่จุดบกพร่องถึงปลาย FRP มีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใกล้จุดบกพร่องดัง Fig. 5B การแจกแจงหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำเช่นเดียวกัน จาก Fig. 6 พบว่า การหลุดลอกของ FRP ในช่วงที่ 2 จากตำแหน่งจุดบกพร่องไปที่ปลายแผ่น FRP คานตัวอย่างที่มีจุดบกพร่องขนาด 20 มม. มีหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อต่ำกว่าคานตัวอย่าง D40 L20 D40 L60 D60 L20 และ D60 L60 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของจุดบกพร่อง 40 มม. และ 60 มม. ที่ตำแหน่ง 20 มม. และ 60 มม. ส่งผลต่อการแจกแจงหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีต

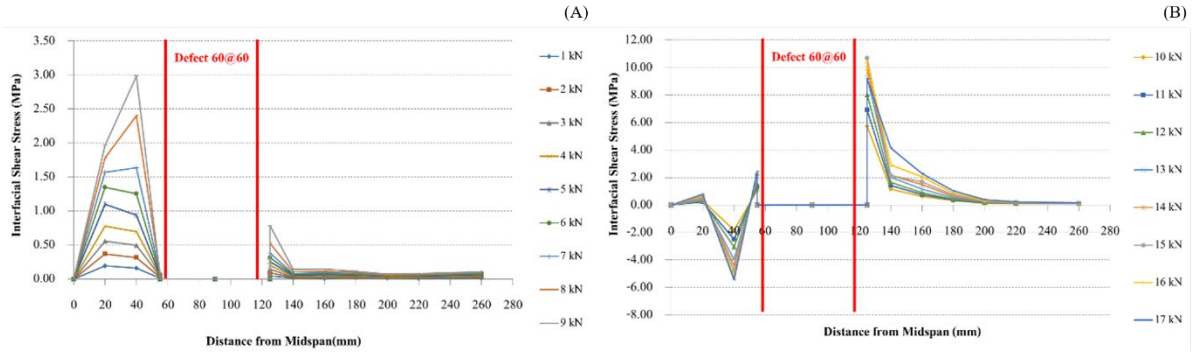


Fig. 5 Distribution of interfacial shear stress (example: specimen D60L60). (A) FRP debonding from crack to defect; (B) FRP debonding from defect to plate-end

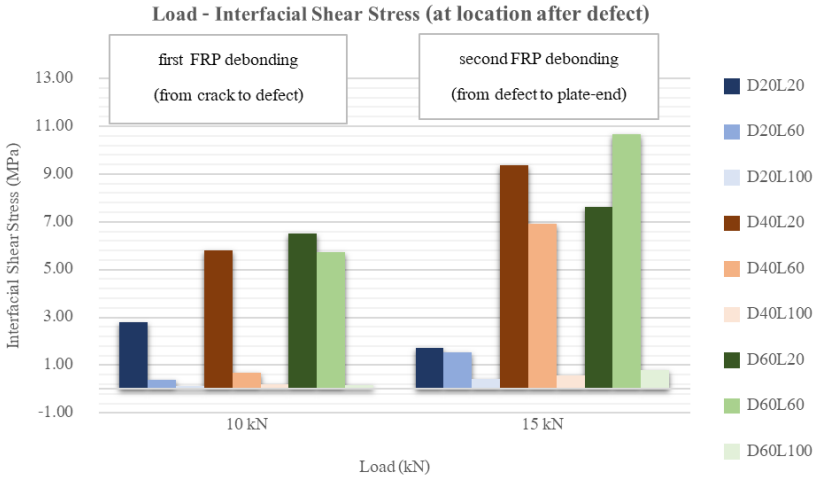


Fig. 6 Interfacial shear stress at location after defect under loads of 5 kN and 15 kN (all specimens at location after defect)

รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ (bond-slip)

เมื่อวิเคราะห์หน่วยแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ คานตัวอย่างที่มีข้อบกพร่อง มีความแตกต่างระหว่างตำแหน่งก่อนจุดบกพร่องและตำแหน่งหลังจุดบกพร่อง โดยตำแหน่งก่อนจุดบกพร่องมีหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อมีค่าต่ำ ในขณะที่การเคลื่อนตัว (slip) มีค่าสูง และที่ตำแหน่งหลังจุดบกพร่องมีหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อมีค่าสูง ในขณะที่การเคลื่อนตัว (slip) มีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง control ซึ่งหน่วยแรงเฉือนในรอยต่อมีค่าสูง ดังแสดงใน Fig. 7

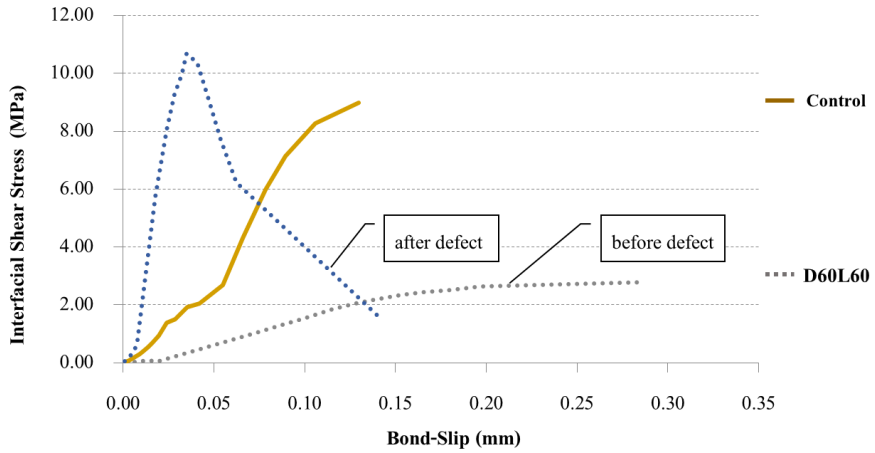


Fig. 7 comparison of bond-slip behavior at different locations

สรุป

1. พฤติกรรมการหลุดลอกของ FRP สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 การหลุดลอกตั้งแต่รอยบากถึงจุดบกพร่อง และช่วงที่ 2 การหลุดลอกจากจุดบกพร่องไปที่ปลายแผ่น FRP
2. จุดบกพร่องที่ตำแหน่ง 20 มม. (ใกล้รอยบาก) มีการหลุดลอกช่วงที่ 1 ด้วยแรงกระทำที่น้อยกว่าตำแหน่งอื่น (ประมาณ 1 kN) และจุดบกพร่องที่ตำแหน่ง 60 มม. และ 100 มม. มีการหลุดลอกช่วงที่ 1 ภายใต้แรงกระทำประมาณ 50 – 70% ของแรงกระทำสูงสุด (max load)
3. ค่าความเครียดที่ตำแหน่งจุดบกพร่องแปรผันตรงกับแรงที่กระทำและขนาดของจุดบกพร่อง
4. แนวโน้มของค่าหน่วยแรงเฉือนที่ตำแหน่งสุดท้ายของจุดบกพร่องในทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการหลุดลอกช่วงที่ 1 และ 2 แต่ในตัวอย่างที่มีจุดบกพร่องขนาด 40 มม.และ 60 มม. มีค่าหน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
5. แนวโน้มของค่าหน่วยแรงเฉือนที่ตำแหน่งสุดท้ายของจุดบกพร่องในทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการหลุดลอกช่วงที่ 1 และ 2 แต่ในตัวอย่างที่มีจุดบกพร่องตำแหน่ง 20 มม. และ 60 มม. มีค่าหน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
6. ข้อบกพร่องมีผลต่อพฤติกรรมระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ (bond-slip) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง control

ข้อเสนอแนะ

1. สภาพความเสียหายโดยทั่วไปของคาน อาจเกิดรอยแตกร้าวได้มากกว่า 1 ตำแหน่ง ซึ่งถ้าเกิดจุดบกพร่องภายในรอยต่อหว่าง FRP และคอนกรีต สามารถนำข้อมูลในงานวิจัยไปวิเคราะห์ร่วมกับวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ต่อได้
2. การใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง อาจส่งผลต่อคุณสมบัติของรอยต่อระหว่าง FRP และคอนกรีตได้ สามารถนำข้อมูลในงานวิจัยไปวิเคราะห์ผลกระทบของจุดบกพร่องต่อได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย พร้อมทั้งขอขอบคุณพระคุณ บริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ในความอนุเคราะห์สนับสนุนวัสดุในการทำวิจัยโครงการวิทยานิพนธ์

เอกสารอ้างอิง

Dai, J., Yokota, H., Lwanami, M., Kato, E. 2010. Experimental investigation of the influence of moisture on the bond behavior of FRP to concrete interfaces. J. Compos. Constr. 14: 834–844. doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000142

Dai, J., Ueda, T., Sato, Y. 2005. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method. J. Compos. Constr. 9:52–62. doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:1(52)

Kalayci, A.S., Yalim, B., Mirmiran, A. 2009. Effect of untreated surface disbonds on performance of frp-retrofitted concrete beams. J. Compos. Constr. 13: 476–485. doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000032

Karbhari, V.M., Navada, R. 2008. Investigation of durability and surface preparation associated defect criticality of composites bonded to concrete. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 39: 997–1006. doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.03.003

Seim, W., Horman, M., Karbhari, V., Seible, F. 2001. External FRP poststrengthening of scaled concrete slabs. J. Compos. Constr. 5: 67–75. http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:2(67)

การเปรียบเทียบปริมาณวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมในการออกแบบอาคารเตี้ยเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวระหว่างอ้างอิงตามกฎกระทรวงและตามมาตรฐาน มยผ. ตัวใหม่ สำหรับบริเวณ อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี

Comparison for amount of concrete and reinforcements used in seismic resistance design for low rise building according to Law regulation and DPT new standard for Dan Makham Tia District, Kanchanaburi

อดิเทพ อิศรางกูร ณ อยุธยา*, ทรงพล จารุวิศิษฏ์

Adithep Israngu Na Ayutthaya*, Songpol Charuvisit

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: adithep.i@ku.th

บทคัดย่อ

กฎกระทรวง พ.ศ. 2550 กำหนดให้อาคารที่สูงไม่เกิน 15 เมตรไม่จำเป็นต้องออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว แต่มาตรฐาน มยผ.1302-52 (ตัวเก่า) และ 1301/1302-61 (ตัวใหม่) ที่ออกมาภายหลังระบุให้อาคารพักอาศัยสูงไม่เกิน 2 ชั้นในบริเวณที่ค่า S_s น้อยกว่า 0.4 จึงจะไม่จำเป็นต้องออกแบบ ซึ่งหากตรวจสอบพื้นที่ในจังหวัดกาญจนบุรีจะพบว่าค่า S_s มากกว่า 0.4 ทั้งหมด ดังนั้นอาคารพักอาศัยทั้งหมดจะต้องออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว งานศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างอาคาร 1–4 ชั้น ในพื้นที่ดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความแข็งแรง โดยใช้แบบบริการประชาชนของกรมโยธาธิการและผังเมือง ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตเทียบเท่าและพลศาสตร์เชิงเส้นตามที่มาตรฐานกำหนด ผลการวิเคราะห์พบว่า วิธีสถิตเทียบเท่าและพลศาสตร์เชิงเส้นให้ผลในทิศทางเดียวกันโดยการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน มยผ.1302-52 (ตัวเก่า), กฎกระทรวง พ.ศ. 2550 และ มยผ.1301/1302-61 (ตัวใหม่) ให้ผลค่าแรงภายในโครงสร้างเรียงจากน้อยที่สุด, เพิ่มขึ้นปานกลาง และสูงสุดตามลำดับ ซึ่งต้องเสริมความเหนียวและเพิ่มขนาดองค์อาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

คำสำคัญ: การออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว, วิธีพลศาสตร์เชิงเส้น, วิธีสถิตเทียบเท่า

Abstract

The ministerial regulation, B.E.2550, specifies that building less than 15 m. high does not need Seismic resistance design. However both old and new standards of the Department of Public works and Town & Country Planning (D.P.T.), which later proclaimed; DPT1302-52 and DPT1301/1302-61, specify that only residential building less than 2-story in area of S_s less than 0.4 shall not need Seismic resistance design. Therefore, all residential buildings in Kanchanaburi province must be designed for Seismic resistance since all area has S_s higher than 0.4. In this study, 1 to 4-story buildings based on the public service building drawings provided by the D.P.T. were analyzed and designed for seismic resistance to verify their strength. The Equivalent static and Linear Dynamic analysis were applied according to the standards. The analysis from both methods shows results in the same pattern in which applying the ministerial regulation, the DPT1302-52 and the DPT1301/1302-61 gave the lowest, moderate and highest forces in the structural members, respectively. Moreover, the ductility strengthening and increasing of the structural member size are required.

Keywords: equivalent static method, linear dynamic method, seismic resistance design

คำนำ

กฎกระทรวง พ.ศ. 2550 กำหนดให้อาคารต้องได้รับการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว และสามารถออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าได้สำหรับอาคารที่มีความสม่ำเสมอ แต่หากอาคารมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอต้องทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ที่ทางสภาวิศวกรรับรอง หรือที่จัดทำขึ้นโดยหน่วยงานราชการ ดังนั้นมาตรฐานที่ใช้ออกแบบร่วมจึงประกอบด้วยมาตรฐาน มยผ.1302-52 ซึ่งต่อมาได้ปรับปรุงเป็นมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 อันเป็นฉบับแก้ไขล่าสุดโดยได้เปลี่ยนแปลงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น 0.2 วินาทีและที่คาบ 1 วินาที และปรับปรุงการวิเคราะห์แรงเฉือนในองค์อาคารแนวดิ่งด้วยวิธีที่เรียกว่า Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) ตามที่งานวิจัยของ คิมเล็ง คี (2561) ได้ทำการศึกษาอาคารที่มีผนังรับแรงเฉือน (จำนวน 6 หลัง) หรือโครงต้านทานแรงดัด (จำนวน 4 หลัง) เป็นระบบต้านทานแรงด้านข้าง โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ และเชียงใหม่กระทำต่ออาคาร ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Response Spectrum Analysis (RSA) และวิธี Nonlinear Response History Analysis (NLRHA) และปรับปรุงการวิเคราะห์เป็นวิธี MRSA โดยพบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีเดิม (RSA) ให้ค่า Story Drift ถูกต้องสำหรับโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนแต่จะให้ค่าต่ำไปสำหรับอาคารโครงต้านทานแรงดัด ส่วนวิธี MRSA จะให้ค่าแรงเฉือนใกล้เคียงกับวิธี NLRHA ส่วนการออกแบบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดด้วยวิธี MRSA ได้ผลเหมือนกับวิธี RSA แบบเดิมแต่เพิ่มขั้นตอนตรวจสอบความเครียดในองค์อาคารแนวดิ่งเพื่อหาตำแหน่งเสริมความเหนียวให้โครงสร้าง นอกจากนี้มาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ยังได้กำหนดให้วิเคราะห์ผลของผนังก่ออิฐโดยการสร้างแบบจำลองอาคารด้วยการกำหนดค้ำยันเทียบเท่า ทำให้อาคารโดยรวมมีสติฟเนสที่สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันก็ทำให้เกิดแรงเฉือนเนื่องจากแรงดันผนังกระทำต่อเสาเพิ่มขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม มยผ.1301/1302-61 นั้นกำหนดเพียงสมการคำนวณค่าแรงเฉือนเนื่องจากแรงดันของผนังก่ออิฐแบบเต็มแผงเท่านั้นไม่ได้กำหนดสมการพิจารณากรณีที่ผนังมีช่องเปิดแต่อย่างใด จรัญ และสุทัศน์ (2563) ได้ทำการศึกษาโครงต้านทานแรงดัดโดยพิจารณาผลของผนังก่ออิฐที่มีช่องเปิดรูปแบบต่างกัน 7 รูปแบบจากการสำรวจอาคารจำนวน 126 อาคาร พบว่าผนังแบบมีช่องเปิดจะมีสติฟเนสและกำลังต้านทานแรงของผนังน้อยกว่าแบบมีช่องเปิด

ที่ผ่านมาในอดีต อมรชัย และชานนท์ (2563) ได้ทำการศึกษาอาคารพาณิชย์ ค.ส.ล.ความสูง 4 ชั้นที่เดิมไม่ได้รับการออกแบบให้ต้านท้านแรงแผ่นดินไหวมาวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหวด้วยแบบจำลองแบบ 2 มิติ โดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 และพิจารณาประเภทชั้นดินแบบ D (ปกติ) พบว่าอาคารมีความเสียหายที่เสาและคานอย่างรุนแรงโดยพฤติกรรมโดยรวมเกินกว่าระดับสมถรรนะป้องกันการพังทลาย

เกรียงศักดิ์ และยุพิน (2563) ศึกษาประเมินความมั่นคงตัวอาคารตึกแถวอนุรักษ์ไทย 4 ชั้นตามมาตรฐาน มยผ.1303-57 โดยการจำลองโครงสร้างอาคารรูปแบบสามมิติ ตั้งอยู่ที่ จ.เชียงใหม่ วิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear Pushover Analysis และ Nonlinear Time History Analysis โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว 9 คลื่นพบว่า วิธี Pushover ให้ผลความแข็งแรงของอาคารอยู่ในระดับปลอดภัยต่อชีวิตในทิศทางตามขวางและระดับใช้งานได้ทันทีในทิศทางยาว ส่วนวิธี Time History ให้ผลค่าความเสียหายน้อยกว่าวิธีแรก โดยพบความเสียหายมากในเสาบริเวณชั้น 2 และ 3 ซึ่งสรุปได้ว่าอาคารเสียหายมากที่สุดในชั้นที่3 แต่ยังอยู่ในระดับปลอดภัยต่อชีวิต

อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ออกแบบด้วยมาตรฐานที่แตกต่างกันต่อขนาดของโครงสร้างหรือปริมาณวัสดุและค่าก่อสร้าง

งานศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบออกแบบอาคารเตี้ย ค.ส.ล. เพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว ระหว่างการออกแบบอ้างอิงตามกฎกระทรวง และตามมาตรฐาน มยผ. ตัวเก่าและตัวใหม่ ถึงผลกระทบต่อปริมาณวัสดุก่อสร้างหลัก (คอนกรีต, ไม้แบบและเหล็กเสริม) และค่าก่อสร้างที่แตกต่างกัน โดยสร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคารเตี้ย 3 รูปแบบ (อาคารพักอาศัย 1, 2 ชั้นและอาคารพาณิชย์ 4 ชั้น) อันเป็นแบบบริการประชาชนของกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งเดิมไม่ได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว แม้ว่าอาคารพักอาศัย 1 และ 2 ชั้นจะไม่เข้าข่ายต้องออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวเพราะความสูงไม่เกินข้อกำหนดที่บัญญัติไว้ในกฎกระทรวงฯ ก็ตาม แต่หากพิจารณาตามมาตรฐาน มยผ. อาคารที่ตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณที่มีค่า S_s ตั้งแต่ 0.4 ขึ้นไปต้องทำการออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวทั้งหมด ซึ่งในที่นี้ได้สมมติว่าพิจารณาอาคารที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ อ.ด่านมะขามเตี้ย จ.กาญจนบุรี ที่มีค่า S_s สูงกว่า 0.4 และเลือกใช้สมการสำหรับประเมินค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังสติฟเนสและกำลังของผนังก่ออิฐตามงานวิจัยของ Durrani and Luo (1994)

อุปกรณ์และวิธีการ

งานศึกษานี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างอาคารเตี้ย 1, 2 และ 4 ชั้น เป็นตัวอย่างในการศึกษาด้วยโปรแกรม Midas Gen โดยมีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

1. การวิเคราะห์ออกแบบตามกฎกระทรวงฯ ของทุกตัวอย่าง ใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่า
2. การวิเคราะห์ออกแบบตามมาตรฐาน มยผ.1302-52 และ มยผ.1301/1302-61 ใช้วิธีพลศาสตร์เชิงเส้นตามวิธี RSA และ MRSA ซึ่งสมมติว่าอาคารตั้งอยู่ในพื้นที่ อ.ด่านมะขามเตี้ย จ.กาญจนบุรี ซึ่งจะถูกจัดให้เป็นประเภทความรุนแรงแผ่นดินไหว ง. และต้องพิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหวกระทำ 2 ทิศทางตั้งฉากกัน
3. พิจารณาชั้นดินแบบประเภท D (ปกติ)
4. พิจารณาเฉพาะผลของวัสดุ คอนกรีต ไม้แบบ และเหล็กเสริม
5. ไม่พิจารณาผลของ วัสดุเหล็กรูปพรรณหลังคา และส่วนงานที่อยู่ในดินทั้งหมด (ฐานรากและเสาเข็ม)
6. สำหรับการจำลองโครงสร้างตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 พิจารณาผลของผนังก่ออิฐที่ทำจากอิฐมีคุณภาพดีมากร่วมด้วย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์อาคารตัวอย่างตามแบบเดิม

Table 1 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลองอาคารตัวอย่างตามแบบแสดงใน ค่าอัตราส่วนแรงกระทำภายนอกต่อชิ้นส่วนเสาและคาน ต่อ กำลังรับแรงของชิ้นส่วนนั้น (Demand to Capacity Ratio, D/C) ตามมาตรฐานกฎกระทรวงฯ (LAW), มยผ.1302-52 (DPT-52) และ มยผ.1301/1302-61 (DPT-61) ตามลำดับ โดยในแต่ละมาตรฐานจะใช้วิธีการรวมผลของแรงที่แตกต่างกันดังแสดงไว้ในตาราง ค่า P แสดงถึงแรงอัด, ค่า M แสดงถึงโมเมนต์ดัด และค่า V แสดงถึงแรงเฉือน โดยสำหรับโครงสร้างเสา กำลังรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดจะต้องวิเคราะห์ร่วมกันตามกราฟปฏิสัมพันธ์ของเสา (Interaction Diagram) ซึ่งค่าที่แสดงในตารางจะพิจารณาค่ากำลังรับแรงของ

เสาที่มีระยะเยื้องศูนย์เท่ากันกับแรงกระทำภายนอก ผลการวิเคราะห์ที่ได้ค่า D/C < 1.0 แสดงว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงปลอดภัย สามารถรับแรงกระทำภายนอก

Table 1 Maximum results of Demand to Capacity Ratio (D/C) in Column and Beam

D/C	LAW			DPT-52			DPT-61		
Load combination for EQ	0.75(1.7D+2.0L)+2.0E			1.2D+1.0L+1.0E			0.75(1.4D+1.7L)+1.0E		
Column	P	M	V	P	M	V	P	M	V[1]
1 Story	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.02
2 Story	1.80	1.83	<1	1.38	1.39	<1	1.48	1.47	3.45[2]
4 Story	2.36	2.35	1.63	2.08	2.14	<1	1.52	1.57	11.92[2]
Beam	M		V	M		V	M		V
1 Story	<1		<1	<1		<1	<1		<1
2 Story	<1		<1	<1		<1	<1		<1
4 Story	1.33		1.28	1.06		1.04	<1		<1

[1] Shear force by MRSA analysis including in-plane force transferred from masonry wall

[2] load combination of 0.9D+1.0E

จากผลการวิเคราะห์พบว่า สำหรับอาคาร 1 ชั้น โครงสร้างตามแบบสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ แม้จะมีค่าแรงเฉือนสูงสุดในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน มยผ.1302/1301-61 สูงกว่าที่เสาสามารถรับได้ก็ตาม แต่ก็สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (2%)

ส่วนอาคาร 2 ชั้นและ4 ชั้น พบว่าโครงสร้างตามแบบไม่สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้โดยมีค่า D/C ในเสาเกิน 1.0 ทั้ง 2 แบบไม่ว่าจะวิเคราะห์ตามมาตรฐานใดก็ตาม และมีค่า D/C ในคานสูงเกิน 1.0 เฉพาะแบบอาคาร 4 ชั้น ทั้งนี้ ค่าโมเมนต์ดัดและแรงอัดสูงสุดจะมีค่า D/C ในเสาเกินอยู่ในช่วงประมาณ 1.38–2.36 แต่ค่าแรงเฉือนสูงสุดจะมีค่า D/C สูงถึงระดับ 3.45–11.92 อันเป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี MRSA และแรงเฉือนจากแรงดันของผนังก่ออิฐ โดยเฉพาะสำหรับอาคาร 4 ชั้น เนื่องจากอาคารมีรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอเป็นอย่างมากทำให้มีผลต่อรูปแบบการสั่นไหวของอาคารและค่าของแรงเฉือนที่เพิ่มมากขึ้นเป็นพิเศษ

ตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 แรงเฉือนที่เสาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี MRSA ซึ่งปรับเปลี่ยนการคำนวณแรงเฉือนโดยการลดทอนแรงเฉือนด้วยค่าตัวประกอบปรับผลการตอบสนอง (R) หารเฉพาะในโหมดการสั่นไหว (Mode Shape) ที่โดดเด่นเพียงโหมดเดียวเท่านั้นเช่นการสั่นไหวในโหมดแรกดัง Equation 1 เนื่องด้วยค่า R มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละรูปร่างของโหมดการสั่นไหว

$$V = I\sqrt{\left(\frac{S_F \Omega_0 V_1}{R}\right)^2 + V_2^2 + V_3^2 + \cdots} \quad (1)$$

เมื่อ I คือค่าความสำคัญของอาคาร

S_F คือค่าปรับแก้ไข Scale Factor = $\frac{0.85V}{V_t}$ เมื่อ V และ V_t คือแรงเฉือนที่ฐานจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและวิธีพลศาสตร์ตามลำดับ

Ω_0 คือค่าตัวประกอบกำลังส่วนเกิน

R คือค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง

V_1, V_2, V_3 คือค่าแรงเฉือนของลำดับรูปร่างโหมดการสั่นไหว

นอกจากนี้ มาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ยังกำหนดให้ต้องพิจารณาผลของผนังก่ออิฐซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างมีสติฟเนสในภาพรวมดีขึ้นโดยอาจใช้การจำลองเป็นผนังเทียบเท่าแบบเยื้องศูนย์และนำค่าแรงเฉือนเนื่องจากแรงดันผนังมาคำนวณออกแบบต่อได้โดยไม่ต้องนำไปวิเคราะห์แยกเหมือนการจำลองค้ำยันเทียบเท่าแบบตรงศูนย์ แต่อย่างไรก็ตาม มาตรฐานไม่ได้กล่าวถึงค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Drift) ที่ยอมให้ในการพิจารณาผลจากผนังก่ออิฐ ซึ่งหากผนังก่ออิฐเกิดการแตกร้าว สติฟเนสของโครงสร้างโดยรวมที่มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างโครงสร้างเสาคานและผนังก่ออิฐจะลดลงและทำให้เกิดแรงกระทำเข้าสู่โครงสร้างเสาเพิ่มขึ้นโดยตรง

Paul et al. (2019) ได้จำลองผนังก่ออิฐที่ทำจากดินเหนียวแบบ Wall micro model, ปูนที่ใช้ในการประสานอิฐและทำการทดสอบตัวอย่าง โดยพบว่าค่า Drift ที่ต่ำกว่า 0.3% ผนังจะยังคงไม่เกิดความเสียหาย ส่วนผนังที่มีค่า Drift มากกว่า 1.1% จะมีขนาดรอยแตกร้าวกว้างกว่า 4 มม.

Hak et al. (2017) ทำการศึกษาผนังก่ออิฐที่ทำจากดินเหนียวสำหรับอาคารโครงต้านทานโมเมนต์ดัด 3, 6 และ 9 ชั้น พบว่า ผนังก่ออิฐที่มีคุณภาพดีจะอยู่ในสมรรถนะสามารถใช้งานได้ทันทีหากค่า Drift ไม่เกิน 0.3% แต่ผนังที่ได้รับความเสียหายจะมีค่า Drift สูงกว่า 0.5%

ในการศึกษานี้จึงได้เลือกพิจารณาเกณฑ์ที่ยอมให้ของค่า Drift ที่ยังไม่ทำให้ผนังก่ออิฐแตกร้าวอยู่ระหว่าง 0.3–0.5 % โดยได้เลือกใช้ค่าที่ 0.35% และจากการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างทั้งหมดพบว่า ค่า Drift ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด อีกทั้งจากการตรวจสอบค่า Story Drift ของทุกอาคารตัวอย่าง พบว่าผ่านค่าเกณฑ์ที่ยอมให้ตามมาตรฐานในทุกมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพ (θ) น้อยกว่า 0.1 จึงไม่ต้องพิจารณาผลของ P-Delta

ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์อาคารที่ได้รับการปรับปรุงขนาดหน้าตัด

จากผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างในส่วนที่ 1 หากค่า D/C ขององค์อาคารใดมีค่าเกิน 1.0 จะทำการออกแบบปรับปรุงหน้าตัดโครงสร้างและการเสริมเหล็กใหม่ให้เหมาะสม โดยได้ผลการออกแบบสรุปเป็นค่าอัตราส่วนของปริมาณวัสดุก่อสร้างหลักที่เพิ่มขึ้นจากการออกแบบตามกฎกระทรวงได้ดัง Table 2

Table 2 Comparison of increased material ratio

Material	1 Story	2 Story	4 Story
	LAW : DPT-52 : DPT-61	LAW : DPT-52 : DPT-61	LAW : DPT-52 : DPT-61
Concrete	No increasing of material	1 : 1.852 : 2.704	1 : 1.031 : 2.631
Formwork	No increasing of material	1 : 1.663 : 2.326	1 : 1.016 : 2.25
Main Rebar	No increasing of material	1 : 0.364 : 0.284	1 : 3.411 : (-0.145)
Stirrup-Rebar	1 : 1 : 1	1 : 0.716 : 1.496	1 : 1.096 : 9.041

Table 3 Amount of increased material after redesign for earthquake resistance

Material	Unit	1 STORY			2 STORY			4 STORY		
		LAW50	DPT52	DPT61	LAW50	DPT52	DPT61	LAW50	DPT52	DPT61
Concrete	Qu-m	0	0	0	0.82	1.52	2.22	6.52	6.72	17.16
Form work	Sq-m	0	0	0	9.4	15.63	21.86	53.28	54.13	119.88
Main-Rebar	kg	0	0	0	458	167	130	896	3055	-129.8
Stirrup-Rebar	kg	145.14	145.14	145.14	237	170	355	331	363	2995.2

จาก Table 2 พบว่าอาคารชั้นเดียวจะเพิ่มเฉพาะปริมาณเหล็กปลอกเท่านั้น (โดยปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้นสามารถดูค่าได้จาก Table 3) โดยค่าอัตราส่วนปริมาณเหล็กปลอกที่เพิ่มขึ้น 1:1:1 เป็นผลมาจากการเสริมเหล็กปลอกให้ถี่ขึ้นที่รอยต่อระหว่างเสาและคานเพื่อให้เกิดความเหนียวของโครงสร้าง โดยการออกแบบตามทุกมาตรฐานได้ผลปริมาณที่เพิ่มขึ้นเท่ากันเพราะเป็นการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกตามข้อกำหนดขั้นต่ำของมาตรฐาน

สำหรับอาคาร 2 และ 4 ชั้น ปริมาณคอนกรีตและไม้แบบที่ต้องเพิ่มขึ้นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวจากการออกแบบตามมาตรฐาน มยผ.1302-52 และ 1301/1302-61 มีค่ามากกว่าการออกแบบตามกฎกระทรวงฯ แต่ปริมาณเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกอาจเพิ่มขึ้นในปริมาณที่น้อยกกว่าการออกแบบตามกฎกระทรวงฯ ทั้งนี้เนื่องจากการขยายหน้าตัดโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้นส่งผลให้ใช้ปริมาณเหล็กเสริมเพิ่มในจำนวนที่น้อยกว่าได้ หรือถึงขั้นที่ใช้ปริมาณเหล็กเสริมหลักลดลงจนน้อยกว่าที่มีตามแบบเดิม โดยสำหรับอาคาร 2 ชั้น เนื่องจากอาคารมีมวลไม่มากและรูปทรงอาคารที่สม่ำเสมอ นอกเหนือจากการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกแล้ว ได้ทำการขยายหน้าตัดเสาบางส่วนให้ใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

แต่สำหรับอาคารพาณิชย์ 4 ชั้นพบว่าอาคารมีมวลค่อนข้างมากและมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงอาคารที่บริเวณชั้น 3–4 (ดังแสดงใน Fig. 1) เพราะมีส่วนยื่นของอาคารเยื้องออกนอกระนาบของเสา การออกแบบตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ทำให้ปริมาณเหล็กปลอกเฉลี่ยโดยรวมทั้งหมดของอาคารเพิ่มขึ้นถึง 9 เท่าเมื่อเทียบกับการออกแบบตามกฎกระทรวงฯ เนื่องจากการปรับค่าแรงเฉือนด้วยวิธี MRSA ทำให้แรงเฉือนนั้นสูงขึ้น อีกทั้งจากผลของรูปทรงอาคารที่ไม่สม่ำเสมอและมีผนังก่ออิฐทึบเต็มแผงภายในทำให้แรงเฉือนเนื่องจากแรงดันผนังมีค่าสูงกว่าผนังแบบมีช่องเปิด และเมื่อทำการออกแบบปรับปรุง พบว่าการขยายหน้าตัดโครงสร้างให้ใหญ่มากขึ้นไม่สามารถช่วยให้โครงสร้างผ่านเกณฑ์ Drift ที่ไม่ทำให้ผนังก่ออิฐแตกร้าวได้ (0.35%) จึงจำเป็นต้องเพิ่มค้ำยัน ค.ส.ล. ขนาด 0.20 × 0.35 ม. ที่ด้านหน้าบริเวณชั้น 2–3 ของอาคารในทิศทางตามยาวของอาคาร จึงจะทำให้โครงสร้างผ่านเกณฑ์ดังกล่าวและพบว่าเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุด เมื่อได้ขยายหน้าตัดเสาและเสริมค้ำยันเพิ่มแล้วพบว่าสามารถลดปริมาณเหล็กเสริมหลักแนวตั้งลงได้จากแบบเดิม (ดังแสดงเป็นค่าติดลบ -0.145 ใน Table 2)

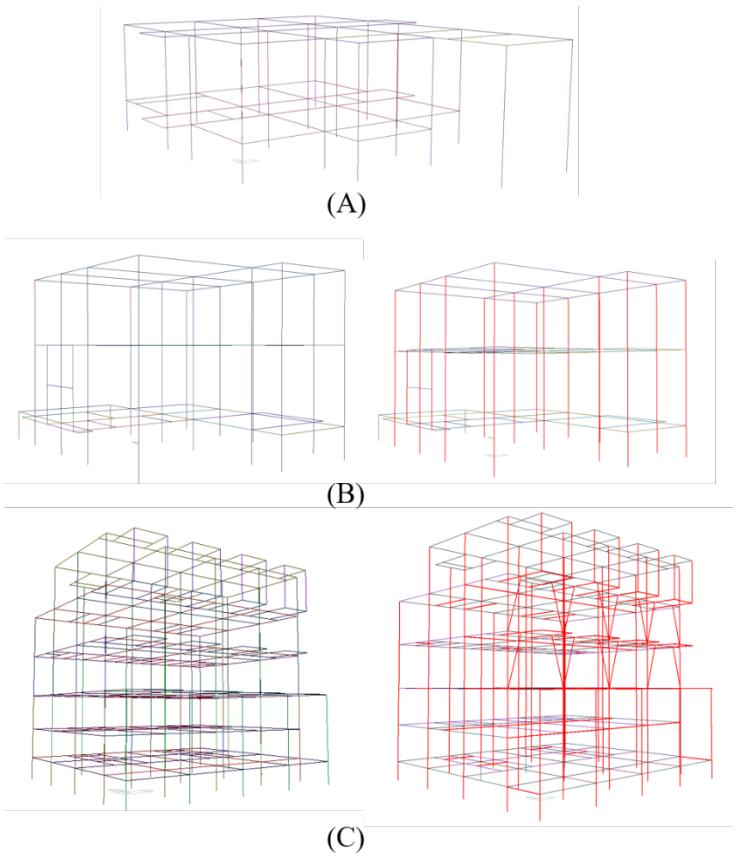


Fig. 1 Frame elements of Structural models before and after redesign (Red Line indicates redesigned element). (A) 1 Story (No need to redesign); (B) 2 Story (Left : Before redesign, Right : After redesign); (C) 3 Story (Left : Before redesign, Right : After redesign)

สรุปผลและเสนอแนะ

1. เมื่อทำการเสริมเหล็กปลอกให้รอยต่อโครงสร้างเกิดความเหนียวตามที่กำหนดในมาตรฐาน มยผ. พบว่าอาคารบ้านพักอาศัย 1 ชั้นไม่จำเป็นต้องปรับปรุงหน้าตัดโครงสร้างแต่อย่างใด ค่า D/C < 1.0 ในทุกมาตรฐาน สามารถนำแบบไปใช้ได้ในทุกอำเภอของจังหวัดกาญจนบุรี

2. สำหรับอาคารบ้านพักอาศัย 2 ชั้น เมื่อได้รับการออกแบบตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ที่คิดค่าแรงเฉือนตามวิธี MRSA และเพิ่มค่าแรงเฉือนเนื่องจากแรงดันผนังก่ออิฐ พบว่าต้องขยายหน้าตัดเสาและเสริมเหล็กปลอกเพิ่มขึ้นที่รอยต่อโครงสร้าง ทำให้ปริมาณวัสดุคอนกรีต ไม้แบบและเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามโครงสร้างมีมวลไม่มากและมีรูปทรงที่สม่ำเสมอ ปริมาณวัสดุที่เพิ่มยังมีค่าไม่มากนัก

3. สำหรับอาคาร 4 ชั้น การออกแบบตามวิธี MRSA ให้ค่าปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องเพิ่มขึ้นเฉลี่ยโดยรวมสูงมากประมาณ 9 เท่าเมื่อเทียบกับการออกแบบตามกฎกระทรวงฯ เนื่องจากผลของรูปทรงอาคารที่ไม่สม่ำเสมอ และผลของแรงดันจากผนังก่ออิฐภายในที่เป็นผนังเต็ม อีกทั้งจากการกำหนดเกณฑ์ค่าที่ยอมให้ของ Drift เพื่อไม่ให้ผนังก่ออิฐเสียหาย จึงต้องเสริมค้ำยัน ค.ส.ล. ที่ชั้น 2 และ3 ในทิศทางตามยาวของอาคาร แต่เมื่อเพิ่มขยายหน้าตัดโครงสร้างแล้ว ทำให้สามารถลดปริมาณเหล็กเสริมแนวตั้งลงได้

ก่ออิฐเสียหาย จึงต้องเสริมค้ำยัน ค.ส.ล. ที่ชั้น 2 และ3 ในทิศทางตามยาวของอาคาร แต่เมื่อเพิ่มขยายหน้าตัดโครงสร้างแล้ว ทำให้สามารถลดปริมาณเหล็กเสริมแนวตั้งลงได้

4. รูปทรงของอาคารมีผลสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้าง เพราะมีผลต่อรูปแบบการสั่นไหวของอาคารและค่าแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ทำให้ต้องใช้โครงสร้างขนาดใหญ่และเสริมเหล็กมากกว่าอาคารรูปทรงปกติ

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงมหาดไทย. 2550. กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2561. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1301/1302-61)

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2552. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302-52)

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, ยุพิน พรมหล่อ. 2563. การประเมินความมั่นคงแข็งแรงของอาคารชุดตึกแถวอนุรักษ์ไทยจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 22: 58–71

คิมเล็ง คี. 2561. การปรับปรุงวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมผลตอบสนองเพื่อการออกแบบอาคารสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จรัญ ศรีชัย, สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์. 2563. ผลการประเมินของช่องเปิดต่อพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ. ใน: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, หน้า STR39-1– STR39-10

อมรชัย ใจยงค์, ชานนท์ กวางเจริญ. 2563. การต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียว. ใน: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, หน้า STR45-1–STR45-9

Durrani, A.J., Luo, Y.H. 1994. Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. In: Proceedings of National Center for Earthquake Engineering. National Center for Earthquake Engineering Research, San Francisco, California, Technical report NCEER-94-0004, pp. 1–8.

Paul, A.K., Michele, L., Edwin, M., Jan, G.R. 2019. Crack initiation and propagation in unreinforced masonry specimens subjected to repeated in-plane loading during light damage. Bull. Earthq. Eng. 17: 4651–4687.

Hak, S., Morandi, P., Magenes, G. 2017. Verification of drift demands in the design of RC Buildings with Masonry Infills. 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Santiago Chile, pp. 2–12

การสำรวจวางหมุดควบคุมทางราบด้วยเทคโนโลยี RTN สำหรับงานวิศวกรรมก่อสร้าง

Surveying and establishing horizontal benchmark with RTN for construction engineering

ชยณัฐ คีรีนารถ*, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์

Chayanut Kerenart*, Soravis Supavetch, Anuphao Aobpaet

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: Chayanut_k@hotmail.com

บทคัดย่อ

การรังวัดแบบ RTN ได้พัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของการรังวัดแบบ RTK ในเรื่องของระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งาน โดยการใช้สถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมถาวร ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำหนดตำแหน่งด้วยเทคนิค RTN โดยใช้ค่าพิกัดจากการประมวลผลด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) ที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้ โดยมุ่งเน้นการสร้างข้อแนะนำที่สมเหตุสมผล สำหรับการประยุกต์ใช้การรังวัดแบบ RTK และ RTN สำหรับใช้ในงานวิศวกรรมก่อสร้าง โดยใช้มาตรฐานความละเอียดถูกต้องตามข้อแนะนำในเอกสาร Engineering and Design NAVSTAR ในการควบคุมความถูกต้องของผลการกำหนดตำแหน่งพิกัด สำหรับงานวิศวกรรมเป็นกรอบในการพิจารณาเสนอแนะ ได้ผลการทดสอบเป็นการรังวัดแบบ RTK ได้ผลลัพธ์ของค่า RMSEr เท่ากับ 41.0 มม. และค่า CE95 เท่ากับ 70.9 มม. ในการเปรียบเทียบเกณฑ์ของ NAVSTAR ในงานวิศวกรรมก่อสร้างนั้นงานที่ต้องการความละเอียดในการรังวัดสูงกว่า 70.9 มม. การรังวัดแบบ RTK จะไม่ผ่านเกณฑ์นี้ ส่วนการกำหนดตำแหน่งด้วยระบบ RTN นั้นเมื่อศึกษาและทดสอบพบว่าการอ้างอิงค่าพิกัดที่กรอบพิกัดอ้างอิง (reference frame) มีความต่างกันระหว่างระบบ RTN กับ PPP ทำให้ค่าพิกัดที่คำนวณได้แตกต่างกันจึงไม่สามารถเปรียบเทียบได้

คำสำคัญ: การรังวัดแบบจลน์ในทันที, โครงข่ายการรังวัดแบบจลน์ในทันที, สถานีอ้างอิงรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่อง

Abstract

Real-time Network (RTN) was developed to reduce the limitation of RTK in case of distance between base station and rover station by using Continuously Operating Reference Station (CORS) as base. This study tests the positioning performance of RTN by using the position from processing with Precise Point Positioning (PPP) technique, which is accurate and reliable, as standard for comparing the accuracy of the position. As for applying RTK and RTN technique in Engineering Construction, using recommendation from the Engineering and Design NAVSTAR. The results from RTK have a RMSEr o 41.0 mm. and CE95 of 70.9 mm. In the comparison with NAVSTAR in Engineering Construction standard, the project work that needs accuracy more than 70.9 mm., RTK surveying does not pass. As for surveying with RTN, the reference frame between RTN system and PPP system are different, therefore the difference cannot be compared.

Keywords: GNSS CORS, real time kinematic, real time network

คำนำ

ในปัจจุบันการรังวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งด้วยเทคนิคการรังวัดข้อมูลจากดาวเทียมแพร่หลายมากขึ้นในประเทศไทย ซึ่งรูปแบบการรังวัดและประมวลผลที่นิยมนำมาใช้เป็นการกำหนดตำแหน่งตำแหน่งในงานวิศวกรรมเป็นการกำหนดตำแหน่งแบบแบบสัมพัทธ์ ได้แก่ เทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic : RTK) โดยการรังวัดแบบ RTK นั้นมีข้อดีคือ ใช้เวลารังวัดค่อนข้างเร็วและการประมวลผลข้อมูลจะกระทำพร้อมกันในขณะทำการรังวัด ทำให้ได้ค่าพิกัดตำแหน่งในทันที แต่การรังวัดแบบ RTK ก็มีข้อจำกัดที่ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดจะลดลงเมื่อระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น (ธีรทัต และเฉลิมชนม์, 2552) โดยระยะห่างที่มากที่สุดระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งาน ไม่ควรเกิน 10–20 กิโลเมตร ซึ่งจะสัมพันธ์กับความน่าเชื่อและความเร็วของการแก้ค่าเลขปริศนา และข้อจำกัดนี้จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่ขึ้นกับระยะห่าง เช่น วงโคจร การหักเหของสัญญาณในชั้นบรรยากาศ Ionosphere และ Troposphere (นิติ และคณะ, 2018) เพื่อที่จะลดข้อจำกัดเรื่องระยะเส้นฐานนี้เทคนิค Network-based RTK (NRTK) ถูกเสนอขึ้น เทคนิค NRTK นี้ใช้สถานีอ้างอิงถาวรหลายๆสถานีที่อยู่ใกล้ๆกับสถานีผู้ใช้งานที่มีความสัมพันธ์กันในเชิงพื้นที่เพื่อสนับสนุนการปรับแก้ค่าชั้นบรรยากาศและวงโคจรดาวเทียม (Charoenkalunyuta et al., 2012) ทำให้ทำการรังวัดและประมวลผลได้ครอบคลุมพื้นที่เพิ่มมากขึ้น และเป็นทางเลือกให้กับผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นด้วย

สมมุติฐานและวัตถุประสงค์

วิธีการรังวัดและประมวลผลที่เป็นมาตรฐานสำหรับการกำหนดตำแหน่งพิกัดหมุดควบคุมที่มีความละเอียดในระดับที่จะสามารถใช้อ้างอิงในงานวิศวกรรมได้นั้น มีอยู่หลายวิธีการ ซึ่งในแต่ละวิธีการ มีเงื่อนไขหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องแตกต่างกันออกไป ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดวัตถุประสงค์ ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการรังวัดและประมวลผลเพื่อกำหนดตำแหน่งพิกัด ที่มีความถูกต้องสำหรับงานวิศวกรรมก่อสร้าง และรวบรวมเนื้อหาข้อพิจารณาหรือเงื่อนไขที่สำคัญจัดทำเป็นข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสำรวจรังวัดสัญญาณดาวเทียมและประมวลผลเพื่อกำหนดตำแหน่งพิกัด ได้อย่างมีความถูกต้องเหมาะสมกับความต้องการ และประเภทของงานทางวิศวกรรมก่อสร้างในแบบต่างๆ โดยอ้างอิงเกณฑ์ความถูกต้องจากเอกสาร NAVSTAR Global Positioning System Surveying ของ US Army Corps of Engineers (USACE)

อุปกรณ์และวิธีการ

กำหนดวิธีการศึกษาวิจัย โดยการกำหนดการรังวัดกรณีตัวอย่างการสร้างหมุดควบคุมค่าพิกัดเพื่องานก่อสร้าง ครอบคลุมพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ด้วยเครื่องรังวัด Trimble R8s, Antenna Model: TRMR8S None จำนวน 2 เครื่อง และเครื่องรังวัด Stonex S800A, Antenna Model:STXS8S060A จำนวน 2 เครื่อง โดยจำลองวิธีการสำรวจรังวัดและประมวลผลข้อมูลใน 3 รูปแบบ คือ (1) การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวรายละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) (2) การรังวัดและประมวลผลแบบ Real Time Kinematic (RTK) และ (3) การรังวัดและกำหนดตำแหน่งพิกัดจากระบบ Real-Time Network (RTN) จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบอัตโนมัติ (GNSS CORS) จากนั้นใช้ค่าพิกัดจากเทคนิค PPP ในการเปรียบเทียบความละเอียดถูกต้องระหว่างวิธีที่นิยมใช้ใน

ปัจจุบันสำหรับงานวิศวกรรมก่อสร้าง ระหว่าง RTK และ RTN โดยอ้างอิงจากเกณฑ์ USACE ตามลำดับการทำงานที่ปรากฏใน Fig. 1

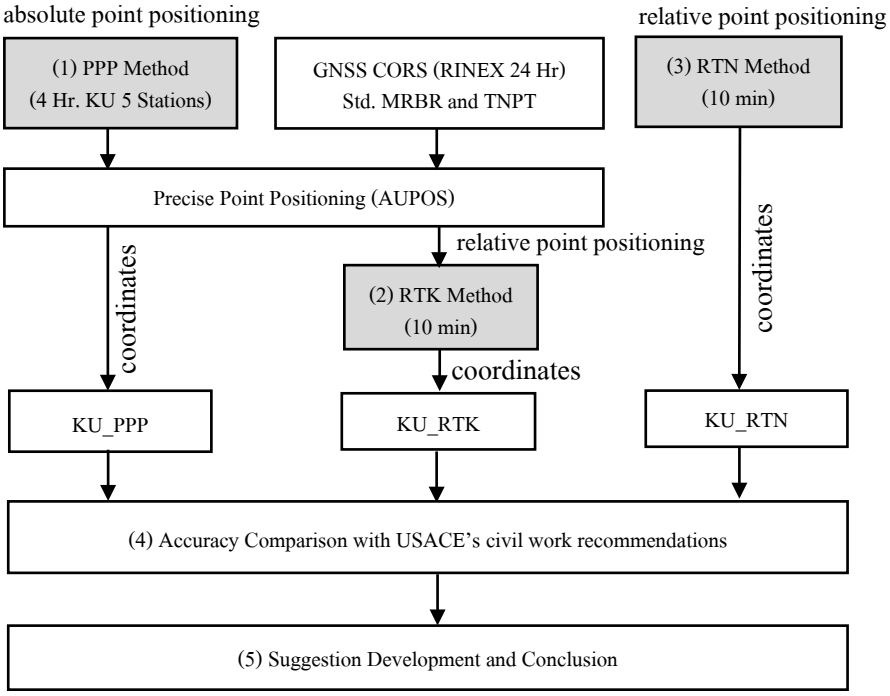


Fig. 1 Process Diagram

พื้นที่สำรวจครอบคลุมพื้นที่ 1.2 ตารางกิโลเมตร จำนวนหมุดควบคุม 5 หมุด ในพื้นที่เปิดโล่งมุมกันท้องฟ้าในการรับสัญญาณ 15 องศา กระจายตัวอยู่รอบพื้นที่ ดัง Fig. 2



Fig. 2 Benchmark Location Maps

การสำรวจรังวัดสัญญาณและประมวลผลด้วยเทคนิค PPP

ทำการรังวัดสัญญาณเป็นเวลา 24 ชม. สำหรับหมุด RTSD CORS จำนวน 2 หมุด TNPT และ MRBR (Fig. 3A) และรังวัดสัญญาณเป็นเวลา 4 ชม. สำหรับหมุด Ku201, Ku202, Ku203, Ku204 และ Ku205 ประมวลผลแบบ PPP ด้วยบริการ AUSPOS (Australia's Online GPS Processing System) อ้างอิงค่าพิกัดกับกรอบอ้างอิง ITRF2014

การสำรวจรังวัดสัญญาณและประมวลผลด้วยเทคนิค RTK

นำค่าพิกัดสถานี TNPT และ MRBR จากการประมวลผลในวิธีที่ 1 (PPP) มาประมวลผลแบบ Relative Point Positioning ไปที่หมุด Ku201 จากนั้นประมวลผลค่าพิกัด Ku201 เป็นหมุดฐาน (base) เพื่อกำหนดตำแหน่งพิกัดด้วยวิธี RTK ให้กับหมุด Ku202, Ku203, Ku204 และ Ku205 ด้วยช่วงเวลาในการบันทึกสัญญาณ 10 นาที (Fig. 3A)

การสำรวจรังวัดสัญญาณและประมวลผลด้วยเทคนิค RTN

สำรวจกำหนดตำแหน่งพิกัดหมุด Ku201, Ku202, Ku203, Ku204 และ Ku205 ด้วยวิธี RTN จากระบบของกรมแผนที่ทหาร (RTSD) และระบบของกรมที่ดิน (DOL) ด้วยการบันทึกข้อมูลเป็นระยะเวลา 10 นาที (Fig. 3B)

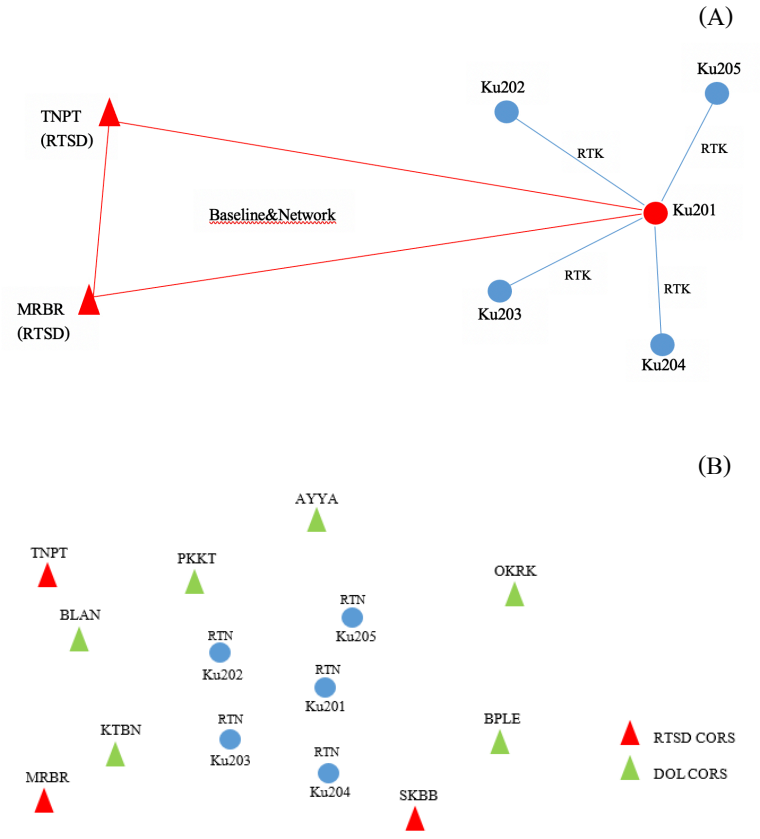


Fig. 3 (A) RTK surveying method (network relative point positioning from RTSD CORS stations are the red line) (B) RTN surveying between RTSD and DOL network

ผลการทดลอง

ผลจากการรังวัดและประมวลผลเป็นค่าพิกัดหมุดควบคุมของทั้ง 3 วิธี แสดงใน Table 1 บนระบบพิกัด UTM พื้นหลักฐาน WGS84

Table 1 Positioning each benchmark from RTK, RTN and PPP technique in UTM

No.	PPP_AUSPOS		RTK_AUSPOS		RTN_RTSD		RTN_DOL	
	E	N	E	N	E	N	E	N
KU201	669900.486	1531399.454	669900.484	1531399.432	669900.286	1531399.568	669900.162	1531399.561
KU202	669155.541	1531916.232	669155.533	1531916.204	669155.352	1531916.336	669155.223	1531916.374
KU203	669215.595	1531237.736	669215.642	1531237.705	669215.428	1531237.824	669215.315	1531237.843
KU204	669865.447	1530886.673	669865.449	1530886.661	669865.277	1530886.760	669865.138	1530886.796
KU205	669930.620	1531954.688	669930.568	1531954.657	669930.399	1531954.776	669930.256	1531954.828

*PPP_AUSPOS หมายถึง ประมวลผลด้วยเทคนิค PPP จากบริการ AUSPOS

*RTK_AUPOS หมายถึง ประมวลผลด้วยเทคนิค RTK จากการอ้างอิงค่าพิกัดหมุดฐาน (base station) ที่มาจากเทคนิค PPP ของบริการประมวลผล AUSPOS

*RTN_RTSD หมายถึง การประมวลผลด้วยเทคนิค RTN จากระบบของกรมแผนที่ทหาร (RTSD)

เปรียบเทียบค่าต่างระหว่างการประมวลผลด้วยเทคนิค RTK และ RTN กับค่าพิกัดที่ประมวลผลจากวิธี PPP (Table 2) พบว่าความคลาดเคลื่อน RMSEr จากเทคนิค RTK มีค่า 40.1 มม. ส่วนเมื่อเทียบกับวิธี RTN มีค่า RMSEr สูงถึง 214 มม. และ 333 มม. จากระบบ RTSD และ DOL ตามลำดับ ซึ่งในเรื่องนี้ไม่ได้เป็นเพราะ RTN มีความคลาดเคลื่อนของทั้งสองระบบมีค่ามากกว่า RTK ที่คำนวณหมุดอ้างอิงจากเทคนิค PPP แต่เนื่องจากเหตุผลทางด้านกรอบอ้างอิง ที่เป็นผลจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก ประเทศไทยเคลื่อนที่ไปทางตะวันออกเฉียงใต้ปีละประมาณ 3 ซม.ต่อปี (ธนพัทธ์ และชนะชล, 2561) ซึ่งการประมวลผลเปรียบเทียบการกำหนดตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (relative point positioning) กับแบบสัมบูรณ์ (absolute) จะแสดงผลของการเคลื่อนตัวสะสมไปในค่ารังวัดต่างกรอบเวลาด้วย (ตามหลัก Geodynamics) ซึ่งการประมวลผลด้วยเทคนิคแบบ PPP จากบริการ AUSPOS อ้างอิงบนกรอบอ้างอิง ITRF2014 epoch 2021 แต่ค่าพิกัดจากระบบ RTN ที่เป็นการประมวลผลแบบสัมพัทธ์ของ RTSD อ้างอิงอยู่บนกรอบอ้างอิง ITRF2008 epoch 2013 ทำให้ผลการขยับตัวของแผ่นเปลือกโลก Sundaland (พื้นที่ประเทศไทย) ในระยะเวลาดังกล่าว (2013–2021) มีผลกับความต่างของค่าพิกัดผลลัพธ์ที่ประมวลผลแบบ PPP จึงทำให้มีค่าสะสมไปถึงประมาณ 214 มม. จากระบบ RTN ของ RTSD และเช่นเดียวกันค่าพิกัดจากระบบ RTN ของ DOL ที่มีค่าการเคลื่อนตัวสะสม 333 มม. ตามลำดับ ดังที่ปรากฏใน Table 2

Table 2 Comparison positioning from PPP with RTK technique and RTN technique

No.	(RTK_AUPOS) – (PPP_AUSPOS)		(RTN_RTSD) – (PPP_AUSPOS)		(RTN_DOL) – (PPP_AUSPOS)	
	E (mm)	N (mm)	E (mm)	N (mm)	E (mm)	N (mm)
KU201	-2	-22	-200	114	-324	107
KU202	-8	-28	-189	104	-318	142
KU203	47	-32	167	88	-208	107
KU204	2	-12	-170	87	-309	123
KU205	-52	-31	-221	88	-364	140
	RMSEx	31.6	RMSEx	190.4	RMSEx	309.0
	RMSEy	26.1	RMSEy	96.8	RMSEy	124.7
	RMSEr	41.0	RMSEr	214.0	RMSEr	333.0
	CE95	70.9	CE95	369.8	CE95	576.7

จากเหตุผลเรื่องของกรอบเวลาพิกัดอ้างอิงดังที่กล่าวไปแล้ว ทำให้การเปรียบเทียบกับเกณฑ์งาน USACE ในงานวิศวกรรมก่อสร้างจึงต้องพิจารณา (ในกรณีนี้) เฉพาะค่าพิกัดจากการประมวลผลแบบสัมบูรณ์อ้างอิงกรอบพิกัด ITRF2014 epoch 2021 ที่ได้จากการรังวัดในงานวิจัยเป็นค่าเปรียบเทียบดัง Table 4 โดยยึดเกณฑ์งานวิศวกรรม 6 รูปแบบ (A)–(F) ที่ต้องการความถูกต้องทางราบในเกณฑ์ที่แตกต่างกัน

Table 4 Guidance for each project from NAVSTAR Global Positioning System Surveying (US Army Corps of Engineers, 2003)

Code	Project	Feature
(A)	General Construction Site Plans & Specs; Feature & Topographic Detail Plans	100 mm
(B)	Surface/subsurface Utility Detail Design Plans; Elec, Mech, Sewer, Strom, etc / Field construction layout	100 mm
(C)	Building or Structure Design Drawings; Field construction layout	25 mm
(D)	Grading and Excavation Plans; Roads, Drainage, Curb , Gutter etc. / Field construction layout	250 mm
(E)	Space Management Plans; Interior Design/Layout	50 mm
(F)	General Planning and Feasibility Studies, Reconnaissance Reports	1000 mm

การเปรียบเทียบเกณฑ์เงื่อนไขดัง Table 4 ใช้ความคลาดเคลื่อนทางราบ RMEr ตามมาตรฐาน ASPRS Accuracy Standards for Digital Geospatial Data โดยยึดแนวทางว่าถ้าค่า CE95 (CE95 = 1.7308 × RMSEr) ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ USACE กำหนดให้ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์ ดังนั้นจึงได้ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบเกณฑ์ USACE ในงานวิศวกรรมก่อสร้าง ดังปรากฏใน Table 5 คือ งาน (C) Building or Structure Design Drawings; Field construction layout และ (E) Space Management Plans; Interior Design/Layout ที่มีค่า RMSEr เท่ากับ 41.0 มม. และค่า CE95 เท่ากับ 70.9 มม.

Table 5 Checking Accuracy of RTK Surveying with NAVSTAR Guidance

Project			(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
Station	RMSEr	CE95	100 mm	100 mm	25 mm	250 mm	50 mm	1000 mm
Ku201-Ku205	41.0 mm	70.9 mm	/	/	x	/	x	/

Remark / : Pass and x : Not Pass

สรุปผลและเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการกำหนดตำแหน่งพิกัดด้วยเทคนิคการรังวัดสัญญาณดาวเทียมและประมวลผลค่าพิกัดแบบต่างๆ ในงานวิศวกรรม เช่น เทคนิค PPP, RTK และ RTN สามารถผ่านเกณฑ์ USACE ได้ในแบบงาน (A), (B), (D) และ (F) แต่จะไม่ผ่านเกณฑ์งาน (C) และ (E) งานวาง layout และงาน design ซึ่งโดยปกติ

แล้วในงานควบคุมการก่อสร้างจะใช้เครื่องมือเช่นกล้องสำรวจที่มีความละเอียดสูงในการวางพิกัดตำแหน่งในส่วนนี้แทน สำหรับเงื่อนไขการประยุกต์ใช้เทคนิคต่าง ๆ ที่สำคัญที่พบจากผลการทดลอง คือ

1. การกำหนดตำแหน่งด้วยระบบ RTN ระหว่าง RTSD และ DOL มีการอ้างอิงค่าพิกัดที่กรอบพิกัดอ้างอิง (reference frame) ต่างกันทำให้ค่าพิกัดที่คำนวณได้จากแต่ละระบบจะห่างกันอยู่ประมาณ 100 มม.
2. การกำหนดตำแหน่งด้วยวิธีการประมวลผลแบบสัมบูรณ์ (absolute point positioning) จะมีผลของการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกบริเวณประเทศไทย (Sundaland) ปะปนไปในผลค่าพิกัด ทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้กับค่าพิกัดหมุดอ้างอิงที่มีอยู่เดิม และจะมีขนาดมากขึ้นตามระยะเวลาที่มากขึ้นของการรังวัดและประมวลผล
3. ใช้เทคนิคการแปลงค่าพิกัดระหว่างกรอบพิกัดอ้างอิง เพื่อคำนวณผลค่าพิกัดให้เป็นเนื้อเดียวกันกับที่จะใช้อ้างอิง เช่น รังวัดและกำหนดตำแหน่งจากระบบ RTN ของ RTSD แต่ต้องการนำผลค่าพิกัดไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อ้างอิงอยู่กับกรอบอ้างอิงของ DOL หรือในทางกลับกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณ ผศ.พท.ดร. สรวิศ สุภเวชย์ ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย และขอขอบคุณ คุณบัญชา ไวเปีย สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมและช่วยดำเนินการสำรวจรังวัดข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

นิติ เธียรถาวร, ดรุณี พรมโชติ, ธนิดา เทียวพานิช, เฉลิมชนม์ สถิระพจน์. 2018. การทดสอบ ประสิทธิภาพของโครงข่ายสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่องบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล. ใน: การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ : GEOINFOTECH 2018 วันที่ 1–2 กุมภาพันธ์ 2561

ธีรทัต เจริญกาลัญญตา, เฉลิมชนม์ สถิระพจน์. 2552. การประเมินค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบแรกในประเทศไทย: ผลการทดสอบเบื้องต้น. วิศวกรรมสาร มก. 70: 45–56.

ธนพัทธ์ จงรักชอบ, ชนะชล ไพจิตรประภาภรณ์. 2561. การเปรียบเทียบโครงข่ายอ้างอิงในประเทศไทยระหว่างกรอบอ้างอิง ITRF 2008 และ ITRF 2014. วารสารแผนที่ 38: 52–62.

Charoenkalunyuta, T., Lee, H.K., Satirapod, C. 2012. Performance of Network-Base RTK GPS in Low-Latitude Region: A case study in Thailand. Eng. J. 16: 95–103. doi.org/10.4186/ej.2012.16.5.95

US Army Corps of Engineers. 2003. Engineering and Design NAVSTAR Glabal Positioning System Surveying. Planning Data Collection with GPS. 8: 1–7

การปรับปรุงแบบจำลองความสูงเชิงเลขเอสอาร์ทีเอ็มด้วยข้อมูลการสำรวจ

SRTM DEM accuracy improvement using field survey data

สุธีร์ โชว์ทะเล*, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์

Suthee Showtale*, Soravis Supavetch, Anuphao Aobpeat

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM ความละเอียดจุดภาพ 90 เมตร และ ASTER GDEM ความละเอียดจุดภาพ 30 เมตร กับข้อมูลระดับความสูงภูมิประเทศจากการสำรวจระดับด้วยเทคนิค GNSS จำนวน 9,467 จุด จากผลการเปรียบเทียบ แบบจำลอง SRTM DEM และ ASTER GDEM มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.848 เมตร และ -1.418 เมตร และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6.758 เมตร และ 9.098 เมตร ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของแบบจำลองด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้น พบว่า แบบจำลองความสูงเชิงเลขปรับปรุงมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยลดลงเหลือ -0.028 เมตร และเมื่อนำผลลัพธ์มาประเมินความถูกต้องกับข้อมูลค่าระดับสูงภูมิประเทศที่ได้จากหมุดควบคุมและทดสอบ จำนวน 412 จุด พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยดีขึ้นจากเดิม ผลงานวิจัยนี้ได้แสดงความเชื่อมั่นในทางสถิติว่า สามารถที่จะนำข้อมูลผลลัพธ์ไปประยุกต์ใช้แทนแบบจำลองความสูงเชิงเลขรหัสเปิดที่มีอยู่ ด้วยแบบจำลองความสูงเชิงเลขปรับปรุงที่มีความถูกต้องและเหมาะสมกับระดับความสูงของภูมิประเทศของประเทศไทยมากขึ้นได้

คำสำคัญ: การปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลข, การสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS, แบบจำลองความสูงเชิงเลข

Abstract

This study compares the results of the vertical accuracy of two open sources of Digital Elevation Models (DEMs), which use GNSS-Derived Orthometric Height Data at 9,467 stations, and aims to find the most suitable model to be improved by statistical method. The Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) DEM 90m. shows slightly bigger Mean Error (1.848 m.) but yields better Distribution (6.758 m. Standard Deviation) than Advanced Spaceborne Thermal Emission Radiometer-Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM 30m.) (-1.418 m. of Mean Error and 9.098 m. of Standard Deviation). The SRTM DEM improved by statistical method (Linear Regression Equation Adjustment using GNSS-derived Orthometric Height Data at 9,467 stations) results in lower Mean Error (-0.028 m.) Moreover, when the results are evaluated with data from 412 stations of first order leveling, the modified model shows lower Root Mean Square Error (RMSE). Therefore, the outcome of the study has statistical proven that the existing SRTM DEM 90 m. can be replace by the modified DEM which is more accurate and suitable for Thailand.

Keywords: DEM Accuracy Improvement, Digital Elevation Model, GNSS-Derived Orthometric Height

คำนำ

แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) เป็นข้อมูลภูมิสารสนเทศ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลหลักคือค่าพิกัด และค่าความสูงภูมิประเทศโดยจัดแสดงอยู่ในรูปแบบข้อมูลราสเตอร์ เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่มีความสำคัญในการบริหารจัดการทรัพยากร, โครงสร้างพื้นฐาน และบริหารจัดการเหตุการณ์พิบัติภัย โดยเทคนิคการสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลขนั้นมีหลายวิธี เช่น การสำรวจจากแผนที่ภูมิประเทศ, การสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศ หรือเทคนิค InSAR (สุริยะ และคณะ, 2553) ในปัจจุบันมีหลายหน่วยงานที่สร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลขซึ่งมีความละเอียดถูกต้องสูง ในขณะเดียวกันก็ยังมีแบบจำลองความสูงเชิงเลข ที่เปิดให้ใช้บริการโดยไม่มีค่าใช้จ่าย (Open sources DEMs) โดยแบบจำลองความสูงเชิงเลขรหัสเปิดที่เป็นที่นิยมใช้งานทั่วโลกได้แก่ ASTER GDEM, SRTM DEM ฯลฯ (Unemaa et al., 2020) ซึ่งแบบจำลอง 2 แหล่งที่กล่าวมานี้มีข้อมูลให้บริการครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศไทย งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลขรหัสเปิด โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS จำนวน 9,467 หมุด ซึ่งมีการทดสอบแล้วว่ามีความถูกต้องเทียบเท่ามาตรฐานงานระดับชั้นที่ 3 จากโครงการการพัฒนาแบบจำลองยีออยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย (กรมแผนที่ทหาร, 2560) เป็นข้อมูลในการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลขทั้ง 2 แหล่ง เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อน, วิเคราะห์สหสัมพันธ์ รวมถึงวิเคราะห์การถดถอย โดยพบว่า แบบจำลอง SRTM DEM และ ASTER GDEM มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.848 เมตร และ -1.418 เมตร ตามลำดับ และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6.758 เมตร และ 9.098 เมตร ตามลำดับ จึงพิจารณาว่าแบบจำลอง SRTM DEM มีความกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาปรับปรุงโดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้นมากกว่า เมื่อทำการปรับปรุงแล้ว แบบจำลองความสูงเชิงเลขปรับปรุงมีความคลาดเคลื่อนของความสูงลดลงเหลือ -0.028 เมตร และเมื่อนำผลลัพธ์มาประเมินความถูกต้องกับข้อมูลค่าระดับสูงภูมิประเทศที่ได้จากหมุดควบคุมและทดสอบ จำนวน 412 จุด พบว่ามีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ 4.887 เมตร จากเดิมที่ก่อนทำการปรับปรุงมีค่า 6.207 เมตร ซึ่งมีความถูกต้องใกล้เคียงค่าระดับภูมิประเทศขึ้นจากเดิม เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานมากขึ้น

สมมุติฐานและวัตถุประสงค์

สมมุติฐาน

ข้อมูลความสูงจากแบบจำลองความสูงเชิงเลข ซึ่งได้ข้อมูลมาจากการรับรู้ระยะไกล เป็นข้อมูลที่มีความละเอียดถูกต้องต่ำกว่าข้อมูลที่ได้จากการสำรวจซึ่งเป็นการรังวัดค่าโดยตรง ดังนั้นข้อมูลจากการสำรวจที่มีความถี่ในการกระจายตัว (spatial distribution) สูงจึงควรสามารถนำมาใช้เพิ่มความละเอียดถูกต้องให้กับข้อมูลที่ได้จากการรับรู้ระยะไกลได้

วัตถุประสงค์

ประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM 90 m. และ ASTER GDEM 30 m. และพัฒนาแบบจำลองสำหรับปรับปรุงแบบจำลองความสูงเชิงเลขด้วยกระบวนการทางสถิติ จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องสำหรับการนำไปใช้งาน

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลขจากเว็บบริการ SRTM DEM และ ASTER GDEM และข้อมูลค่าระดับหมุดสำรวจทำระดับชั้นที่ 3 ด้วยเทคนิคRTK GNSS และหมุดตรวจสอบหมุดระดับชั้นที่ 1 จากโครงข่ายระดับชั้นที่ 1 ของประเทศ โดยมีรายละเอียดดังตาราง

Table 1 Research data and details

ลำดับ	ข้อมูล	รายละเอียดข้อมูล
1	SRTM DEM	ความละเอียดจุดภาพ 90 ม. แหล่งข้อมูล http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/
2	ASTER GDEM	ความละเอียดจุดภาพ 30 ม. แหล่งข้อมูล http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp
3	ระดับชั้นที่ 3 ด้วยวิธี GNSS จำนวน 9,467 หมุด	สำรวจด้วยเทคนิคRTK GNSS จากการอ้างอิงค่าระดับจากหมุดระดับชั้นที่ 1 กรมแผนที่ทหาร ร่วมกับแบบจำลองยีออยด์ THAI12H เทียบเท่ากับเกณฑ์งานระดับชั้นที่ 3
4	ระดับชั้นที่ 1 (หมุดตรวจสอบ) จำนวน 412 หมุด	เป็นหมุดจากโครงข่ายระดับชั้นที่ 1 ของประเทศไทย

วิธีการ

วิธีการศึกษาเริ่มจากประเมินค่าต่างระดับระหว่างหมุดสำรวจระดับและจุดภาพข้อมูลค่าระดับและสถิติของค่าต่างระดับจากแบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM และ ASTER GDEM จากนั้นคัดเลือกแบบจำลองความสูงที่มีค่าดีที่สุด (ค่าต่างระดับมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ และมีค่าน้อย) มาทำการปรับปรุงด้วยวิธีทางสถิติ ให้เป็นแบบจำลองความสูงเชิงเลขที่มีความถูกต้องมากขึ้น จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องด้วย หมุดระดับชั้นที่ 1 โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดัง Fig. 1

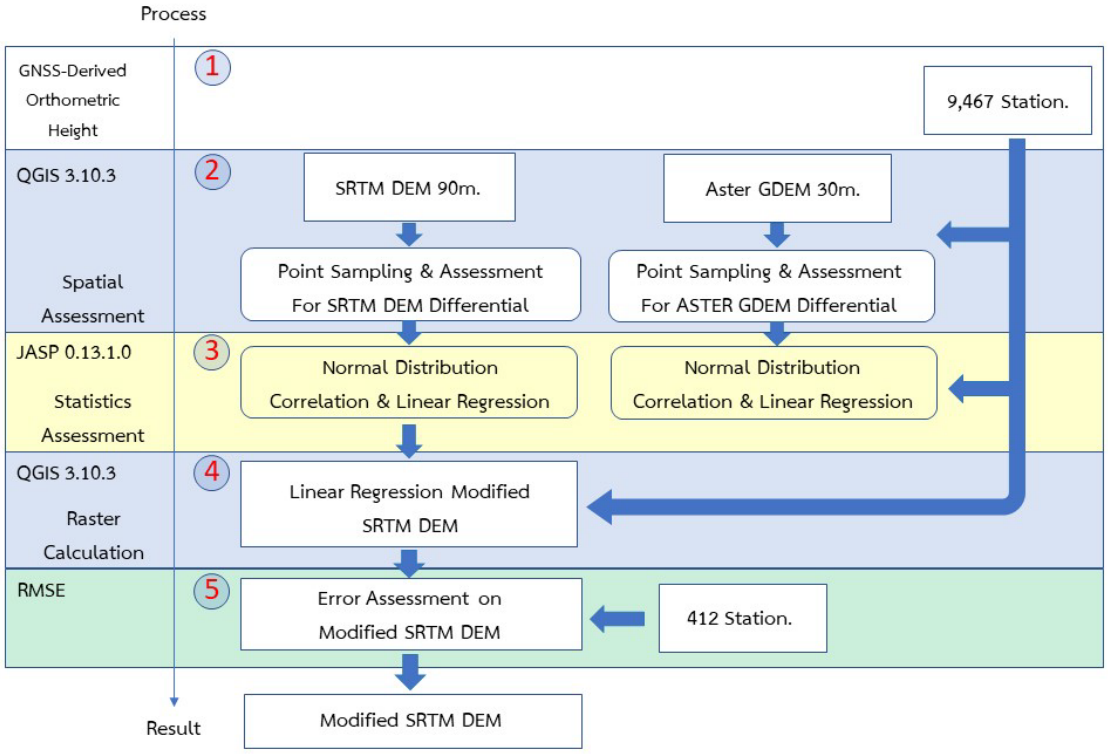


Fig. 1 Method and Process

1. รวบรวมข้อมูลความสูงภูมิประเทศที่ได้จากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS จำนวน 9,467 จุด ซึ่งมีความละเอียดถูกต้องเทียบเท่ามาตราฐานงานระดับชั้นที่ 3 เพื่อใช้ประเมินแบบจำลองความสูงเชิงเลข และใช้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการปรับปรุงแบบจำลองความสูงเชิงเลข

2. นำเข้าข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลขใช้ซอฟต์แวร์ QGIS 3.10.3 เพื่อประเมินค่าความสูงที่ได้จากแบบจำลองที่ตำแหน่งกริดที่ครอบคลุมค่าพิกัดเดียวกับหมุดค่าระดับที่ได้จากการสำรวจ โดยวิธีการ Sampling Point จุดที่มีค่าระดับลงบนแบบจำลองความสูงเชิงเลขและรวบรวมค่าความสูงที่ได้ในทุกจุดนั้น

3. นำข้อมูล ค่าพิกัด ค่าความสูงที่ได้จากแบบจำลองความสูงเชิงเลข ค่าระดับสูงภูมิประเทศที่ได้จากการสำรวจ และค่าความต่างระหว่างความสูงของแบบจำลองความสูงกับระดับความสูงจากการสำรวจ มาวิเคราะห์ในเชิงสถิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ JASP 0.13.1.0 นำมาเปรียบเทียบการประเมินระหว่างแบบจำลองความสูงเชิงเลขทั้ง 2 แหล่ง

4. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้น ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงจากแบบจำลองความสูงเชิงเลข และค่าระดับความสูงจากการสำรวจ และทำการปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลข

5. นำแบบจำลองผลลัพธ์ที่ได้ปรับปรุงแล้ว มาตรวจสอบความถูกต้อง กับข้อมูลค่าระดับสูงภูมิประเทศที่ได้จากหมุดควบคุมและทดสอบ (ระดับชั้นที่ 1) จำนวน 412 จุด ด้วยวิธีรากกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) และประเมินความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับแบบจำลองความสูงเชิงเลขที่ไม่ได้ปรับปรุง

ผลการศึกษางานวิจัย

การประเมินความถูกต้องเชิงพื้นที่

ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM เปรียบเทียบกับค่าระดับความสูงจากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM อยู่ที่ 1.848 เมตร มีความคลาดเคลื่อนทั้งปริมาณและความหนาแน่นมากอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดชัยภูมิ และขอนแก่น), ภาคใต้ (จังหวัดระนอง, พังงา, ชุมพร และนครศรีธรรมราช) และกระจายตัวบริเวณภาคเหนือบางพื้นที่ ดังแสดงใน Fig. 2.

แบบจำลองความสูงเชิงเลข ASTER GDEM เปรียบเทียบกับค่าระดับความสูงจากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแบบจำลองความสูงเชิงเลข ASTER GDEM อยู่ที่ -1.418 เมตร มีความคลาดเคลื่อนปริมาณและความหนาแน่นมากอยู่บริเวณใกล้เคียงกันกับแบบจำลอง SRTM DEM คือบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ที่จังหวัดขอนแก่นมากกว่าแบบจำลอง SRTM DEM), ภาคใต้ (ที่จังหวัดนครศรีธรรมราชมากกว่าแบบจำลอง SRTM DEM) แต่มีความคลาดเคลื่อนที่กระจายตัวบริเวณภาคเหนือน้อยกว่าแบบจำลอง SRTM DEM ดังแสดงใน Fig. 3

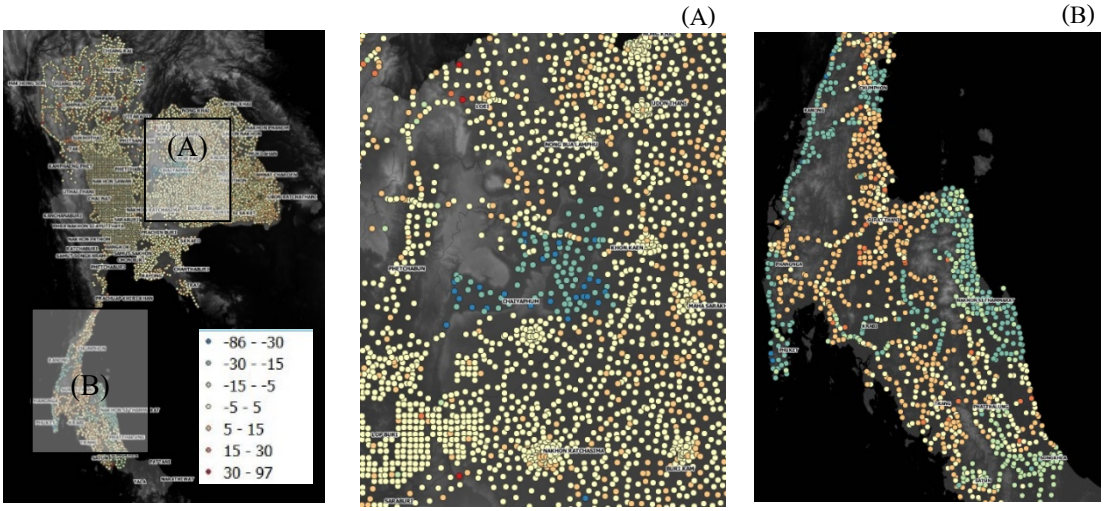


Fig. 2 SRTM DEM 90 m. spatial Assessment using GNSS-Derived Orthometric Height (9,467 Stations) showing massive error in (A) Northeast of Thailand and (B) South of Thailand

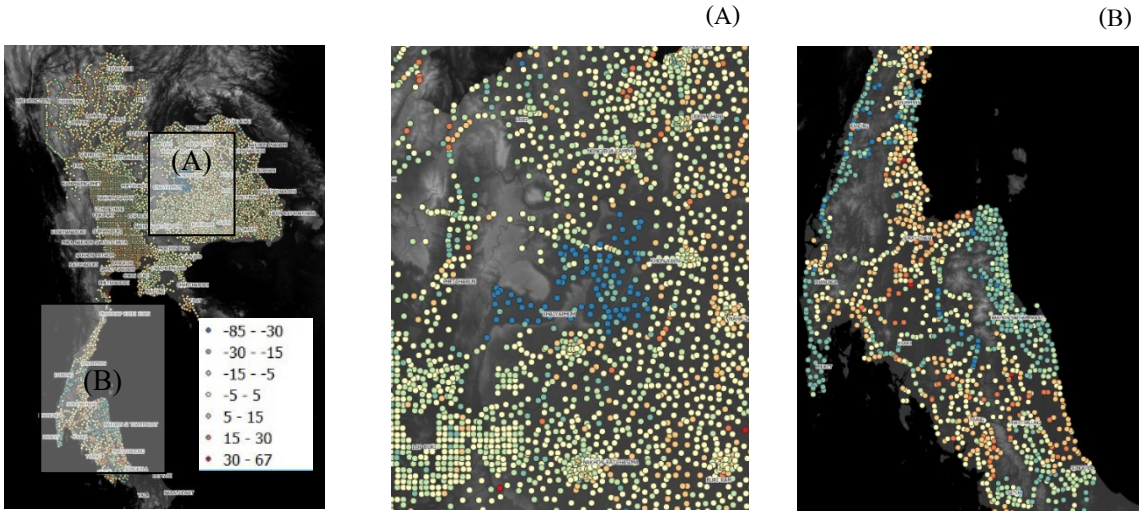


Fig. 3 ASTER GDEM 30 m. spatial Assessment using GNSS-Derived Orthometric Height (9,467 Station) showing massive error in (A) Northeast of Thailand and (B) South of Thailand

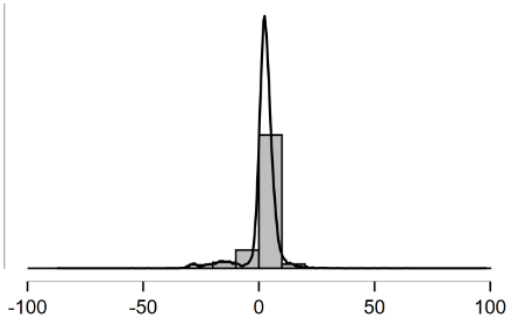
การประเมินความถูกต้องเชิงสถิติ

ผลการประเมินเชิงสถิติของแบบจำลองความสูงเชิงเลขทั้ง 2 แหล่งด้วยโปรแกรม JASP 0.13.1.0 พบว่า แบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM เปรียบเทียบกับค่าระดับความสูงจากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS มีค่ามัธยฐาน (Median) ของความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2.633 เมตร, ค่าฐานนิยม (Mode) คือ 1.264 เมตร, ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std. Deviation) เท่ากับ 6.758 เมตร, ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ (Skewness) เท่ากับ -1.724 เมตร และมีพิสัยกว้าง 183.41 เมตร ในขณะที่แบบจำลองความสูงเชิงเลข ASTER GDEM เปรียบเทียบกับค่าระดับความสูงจากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS พบว่า ค่ามัธยฐาน (Median) ของความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ -0.602 เมตร, ค่าฐานนิยม (Mode) คือ -0.024 เมตร, ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std. Deviation) เท่ากับ 9.098 เมตร, ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ (Skewness) เท่ากับ -0.844 เมตร และมีพิสัยกว้าง 152.083 เมตร ตามที่แสดงใน Fig. 4

(A)

SRTM DEM 90 m.

Valid	9467
Missing	0
Mean	1.848
Median	2.633
Mode	1.264
Std. Deviation	6.758
Skewness	−1.724
Std. Error of Skewness	0.025
Range	183.410
Minimum	−86.158
Maximum	97.252



(B)

ASTER GDEM 30m.

Valid	9467
Missing	0
Mean	−1.418
Median	−0.602
Mode	−0.024
Std. Deviation	9.098
Skewness	−0.844
Std. Error of Skewness	0.025
Range	152.083
Minimum	−85.158
Maximum	66.926

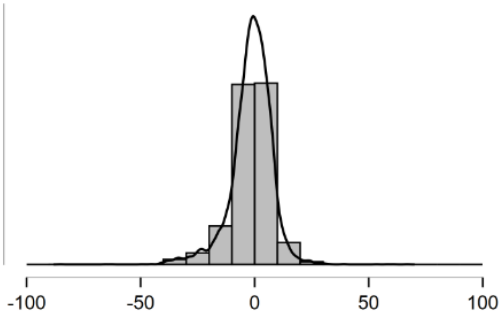


Fig 4. (A) Descriptive Statistics of SRTM DEM Compared with GNSS-Derived Orthometric Height and (B) ASTER GDEM Compared with GNSS-Derived Orthometric Height

จากแผนภาพการแจกแจงและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะเห็นได้ว่า แบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM มีความเบี่ยงเบนที่น้อยกว่า ASTER GDEM อย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ พบว่าแบบจำลองความสูงเชิงเลขทั้ง 2 แบบนั้น มีค่าความสูงที่มีความสัมพันธ์กับค่าระดับความสูงจากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS โดยแบบจำลอง SRTM และแบบจำลอง ASTER นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient, r) ที่ 0.999 และ 0.998 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลเชิงสถิติทั้งจากการแจกแจง และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ จึงมีความเหมาะสมที่จะเลือกแบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM มาทำการปรับปรุงด้วยสมการความถดถอยเชิงเส้น

การปรับปรุงคุณภาพด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้น

จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น พบว่าแบบจำลอง SRTM DEM มีความสัมพันธ์กับค่าระดับความสูงจากการสำรวจระดับด้วยเทคนิค GNSS ตามสมการ *Modified STRM = (0.997*SRTM) – 1.467* ซึ่งได้จากโปรแกรม JASP 0.13.1.0 ตาม Fig. 5

Model		Unstandardized	Standard Error	Standardized	t	p
H_0	(Intercept)	138.729	1.543		89.937	< .001
H_1	(Intercept)	−1.467	0.095		−15.453	< .001
	ThaiSRTM	0.997	4.612e −4	0.999	2162.446	< .001

Fig 5. Linear Regression Analysis for SRTM DEM 90m.

เมื่อนำสมการดังกล่าวมาปรับแก้แบบจำลองความสูงเชิงเลข โดยการใช้ฟังก์ชั่น Raster Calculator ของซอฟต์แวร์ QGIS 3.10.3 จะได้แบบจำลองความสูงเชิงเลขที่มีความใกล้เคียงกับค่าระดับความสูงภูมิประเทศมากขึ้น เปรียบเทียบกับแบบจำลองความสูงเชิงเลขที่ยังไม่ได้ปรับปรุง โดยแบบจำลองความสูงเชิงเลขหลังจากการปรับปรุง (Modified SRTM DEM) มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าระดับสูง ลดลงเหลือ -0.028 เมตร (จากเดิม มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.848 เมตร) แบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM ก่อนการปรับแก้และตำแหน่งของหมุดตรวจสอบ รวมถึงค่าต่างระหว่างแบบจำลองดั้งเดิมและแบบจำลองหลักจากปรับปรุง แสดงตาม Fig. 6

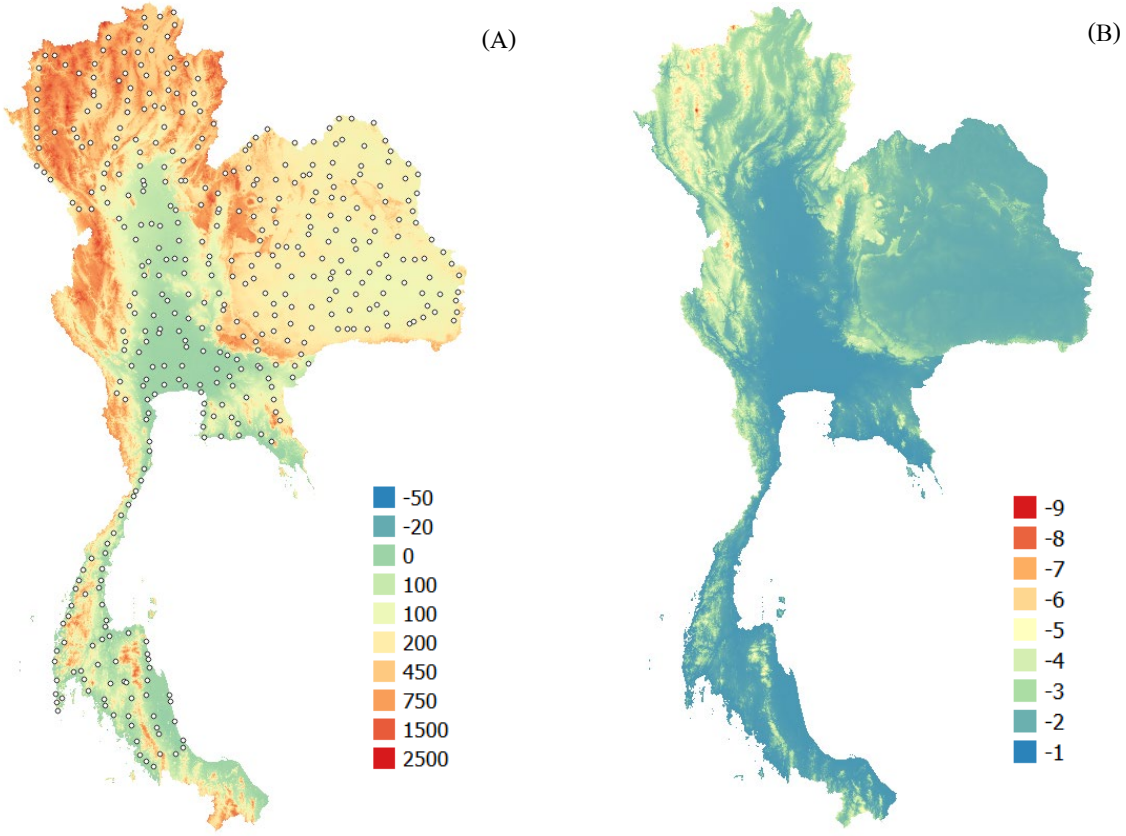


Fig 6. (A) Modified SRTM DEM, white dots show 412 stations of 1st order leveling and (B) Modified SRTM DEM Compared to SRTM DEM 90 m. where legend shows the amount of height adjusted

ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีรากกำลังสองเฉลี่ย

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ปรับปรุงด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้น โดยใช้ค่าระดับระดับสูงภูมิประเทศที่ได้จากหมุดควบคุมและทดสอบ จำนวน 412 จุด ด้วยวิธีรากกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) ตาม Equation 1

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Prediction - Actual)^2}{N}} \quad (1)$$

โดยที่ ค่า Prediction = ค่าความสูงที่ได้จากแบบจำลองที่ปรับปรุงโดยสมการการถดถอยเชิงเส้น

Actual = ค่าระดับสูงภูมิประเทศที่ได้จากหมุดควบคุมและทดสอบ

N = จำนวนจุดตรวจสอบ 412 จุด

จะได้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (RMSE) = 4.887 เมตร ซึ่งดีกว่าแบบจำลองฯทั้งสองแบบที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง ซึ่งแบบจำลองความสูงเชิงเลข SRTM DEM และ ASTER GDEM มีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากหมุดควบคุมและทดสอบอยู่ที่ 6.207 เมตร และ 7.214 เมตร ตามลำดับ

สรุป

การใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระดับด้วยเทคนิคGNSS มาประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความสูงเชิงเลขเพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสม และใช้สมการการถดถอยเชิงเส้นมาปรับปรุงคุณภาพของแบบจำลองความสูงเชิงเลข สามารถลดความคลาดเคลื่อนโดยรวม ทำให้ได้แบบจำลองที่มีความสูงใกล้เคียงกับภูมิประเทศจริงมากขึ้น มีความถูกต้องมากขึ้น (4.88 เมตร จาก 6.21 เมตร และ 7.21 เมตร) โดยเฉพาะการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ (แบบจำลองปรับปรุงเชิงเส้น) หรือมีการพัฒนาสมการปรับปรุงที่ซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เพื่อสามารถปรับปรุงแยกตามคุณสมบัติของพื้นที่แต่ละภูมิภาคได้ ก็จะได้แบบจำลองที่ใกล้ภูมิประเทศมากขึ้นในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย ที่กรุณาเอื้อเฟื้อข้อมูล รวมถึงคำแนะนำในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมแผนที่ทหาร. 2560. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการการพัฒนาแบบจำลองยีออยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย.

สุริยะ ผลพูน, ชาติชาย ไวยสุระสิงห์, ชรัตน์ มงคลสวัสดิ์. 2553. การประเมินความถูกต้องทางดิ่งของแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข ความละเอียดทางราบ 90 เมตร จากโครงการสำรวจภูมิประเทศด้วยเรดาร์บนกระสวยอวกาศ. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย. 11: 15–25

Uuemaa, E., Ahi, A., Montibeller, B., Muru, M., Kmoch, A. 2020. Vertical Accuracy of Freely. Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3482, 23 October 2020.

การศึกษาการรับแรงอัดของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต

Experiment study of concrete filled pvc tube subjected to compression loading

ปิยะภัทร สีลายงค์*, กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ

Piyapat Silayong*, Kitjapat Phuvoravan

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: piyapat.sil@ku.th, fengkpp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาทดสอบการรับแรงอัดของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต (CFPT) จากคุณสมบัติการโอบรัดของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ประกอบด้วยแรงตรงศูนย์ โดยจะพิจารณาที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11.4 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.8 เซนติเมตร ซึ่งใช้ท่อความยาว 30 เซนติเมตร จากการศึกษาทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต (CFPT) มีกำลังมากกว่าคอนกรีตทรงกระบอก 95 % สำหรับแรงอัดตรงศูนย์

คำสำคัญ: การทดสอบในห้องปฏิบัติการ, การโอบรัด, ท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต, แรงตรงศูนย์

Abstract

In this paper, the confinement behavior of Polyvinyl chloride tube was studied through the intensive experimental tests. The compressive forces were applied both axially and concentrically to various specimens of the Concrete-filled Polyvinyl chloride tubes (CFPT). The outer diameter and the length of the tubes are 11.4 centimeters and 30 centimeters, respectively. The test results of the CFPT were compared to ones of the pure concrete specimens, which has the diameter of 10.8 centimeters. It was found that the axial strengths of the CFPTs were increased from the controlled pure concrete specimens by 95 percent for concentric loading.

Keywords: concrete-filled polyvinyl chloride tube, concentric loading, confinement, experimental test

คำนำ

ปัจจุบัน มีโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โครงสร้างคอนกรีตโอบรัดด้วยท่อเหล็กรูปพรรณเป็นทางเลือกสำหรับงานออกแบบก่อสร้างอาคาร ซึ่งยังคงมีข้อเสียในเรื่องของการรักษาความคงทนของวัสดุ เนื่องจากคอนกรีตจะถูกกัดกร่อนเมื่ออยู่ในสภาวะแปรปรวนตามชายฝั่ง หรืออยู่ในพื้นที่ที่น้ำขึ้นน้ำลง ส่วนเหล็กรูปพรรณและคอนกรีตที่โอบรัดด้วยท่อเหล็กรูปพรรณนั้น อาจโดนกัดกร่อนทำให้เกิดสนิมได้ รวมทั้งมีการนำความร้อน ส่งผลทำให้สูญเสียความสามารถในการรับแรง ดังนั้น โครงสร้างข้างต้นที่มีกำลังสูงจะสูญเสียกำลังไป ถ้าหากเจอสภาวะแวดล้อมแปรปรวน

โพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต จึงเป็นอีกทางเลือกในการคิดค้นโครงสร้างแบบใหม่ในอนาคต ซึ่ง Wang and Yang (2010) ได้มีการทดสอบกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์จากท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ประเภทเทอร์โมพลาสติกเติมด้วยด้วยคอนกรีต ด้วยเหตุจากการศึกษาคุณสมบัติของโพลีไวนิลคลอไรด์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีการนำไปทำเป็นตอม่อสะพานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากพื้นที่ชายฝั่งที่มีน้ำขึ้นน้ำลง ทำให้ตอม่อสะพานมีความคงทนมากขึ้น จากความหนาของท่อที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากคอนกรีตเสริมเหล็กได้นอกจากนี้ยังมีเรื่องการนำความร้อน มีเพียงร้อยละ 0.6 ของเหล็กรูปพรรณ และการโอบรัดของท่อกับตอม่อสะพานสามารถเพิ่มความเหนียวและป้องกันการแตกลายงาของคอนกรีต โดยโพลีไวนิลคลอไรด์ใช้ติดตั้งกับตอม่อสะพาน ดังนั้น ความคงทนในพื้นที่น้ำขึ้นน้ำลง และความต้านทานการนำไฟฟ้าต่ำจึงเป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต

ผู้วิจัยมีความคิดนำท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยท่อประปาประเภท Unplasticized polyvinyl chloride ตามมาตรฐาน มอก.17/2532 มาเติมด้วยคอนกรีต มาทดสอบแรงอัดตรงศูนย์ เพื่อศึกษากำลังการรับแรงอัดของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีตและพฤติกรรมที่เกิดขึ้นหลังจากการรับแรงอัด โดยจะศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดตรงศูนย์ของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ CLASS 13.5 เติมด้วยคอนกรีตและเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการรับแรงอัดตรงศูนย์ของคอนกรีตที่มีขนาดเท่ากัน โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย คือได้รับข้อมูลสมบัติทางกลของโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีตจากการรับแรงอัดตรงศูนย์ที่จะทำให้เพิ่มความคงทนของวัสดุ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Han et al. (2014) ศึกษาพฤติกรรมของท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีตเพื่อรองรับแรงอัด พบว่าวัสดุแต่ละส่วนจะช่วยต้านทานการวิบัติกันและกัน ท่อเหล็กรูปพรรณป้องกันการประลัยให้กับคอนกรีตด้วยการโอบรัดของคอนกรีตจากท่อเหล็กรูปพรรณ แกนคอนกรีตป้องกันการโก่งดัดของท่อเหล็กรูปพรรณจากการรองรับของแกนคอนกรีตกับท่อ จาก Fig. 1 (Han et al., 2014) ซึ่งเห็นได้ว่าท่อเหล็กรูปพรรณมีการโก่งดัดทั้งด้านในและด้านนอกของผิวท่อ คอนกรีตมีการประลัยรูปแบบการเฉือน หากเป็นท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีต ท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีตมีการวิบัติรูปแบบโก่งดัดในแนวท่อยากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีตต้านการโก่งดัดของท่อ และการประลัยของคอนกรีตยากขึ้นเพราะการโอบรัดของท่อ ทำให้เพิ่มความเหนียวของท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีต

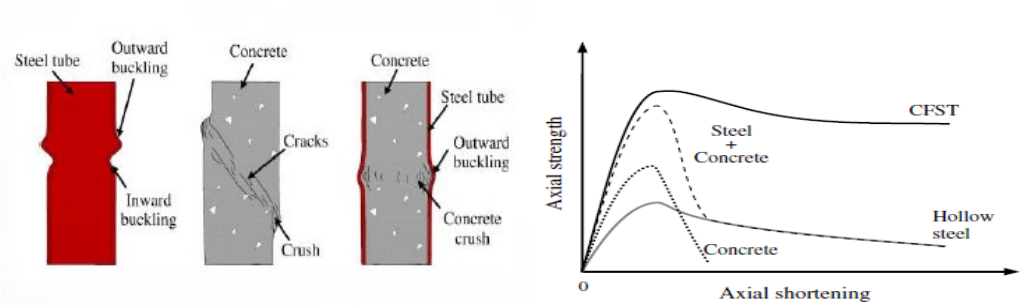


Fig. 1 Behavior of concrete filled tube and Axial compressive behavior of CFST stub column

Lin-Hai Han ศึกษาความเหนียวของท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีตจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับการเปลี่ยนรูปของท่อเหล็กกลวง ดัง Fig. 1 (Han et al., 2014) ของคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีต และท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีต พบว่า หลังจากที่วัสดุรับแรงอัดตรงศูนย์จนถึงจุดที่รับกำลังสูงสุด กำลังรับแรงตรงศูนย์ของคอนกรีตกับคอนกรีตกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็วและพังทลายก่อนท่อเหล็กรูปพรรณกลวงและท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีต กำลังของท่อเหล็กรูปพรรณกลวงที่มีค่าสูงสุดน้อยกว่าโครงสร้างประเภทอื่นจะลดลงช้ากว่าคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับกำลังของท่อเหล็กรูปพรรณเติมด้วยคอนกรีต (CFST) จะลดลงช้าๆ จนได้กำลังที่มีค่าคงที่

Neelam and Kalaga (2002) ศึกษาแนวโน้มของพฤติกรรมรับแรงดึงของพลาสติกประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์เป็นรูป Coupon โดยมีพฤติกรรมประเภท Non-Linear Behavior จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบยืดหยุ่นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดซึ่งเป็นจุดคราก้วย หลังจากที่ผ่านจุดครากไป วัสดุเกิดการคอดค่อนข้างนานก่อนจะเกิดการวิบัติ แสดงให้เห็นถึงความเหนียวของพลาสติก จากการทดสอบดังกล่าวตามภาพ Fig. 2 (อัตราส่วนแกน Strain 1 cm : 20 % และ อัตราส่วนแกน Stress 1 cm : 2000 psi) (Neelam and Kalaga, 2002) แสดงให้เห็นว่าโพลีไวนิลคลอไรด์มีคุณสมบัติความเหนียวอยู่พอสมควร

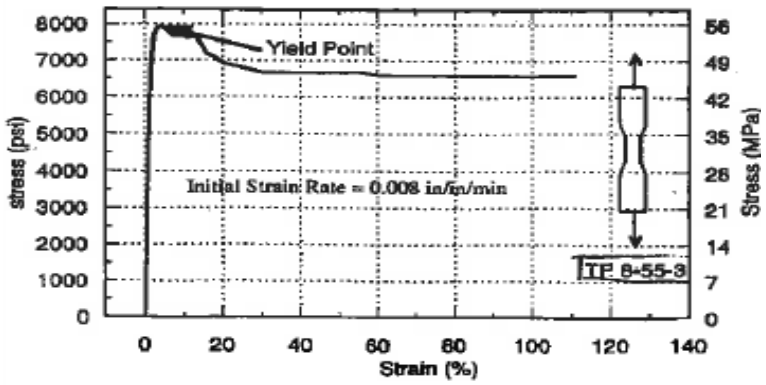


Fig. 2 Typical tensile stress-strain relationship (Size of picture: 5.5 × 10 cm)

Oyawa (2015) ทดสอบคอนกรีตที่โอบรัดด้วยท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ ประเภท Unplasticized Poly-Vinyl Chloride ในการรับแรงอัดในแนวแกน ด้วยการนำคอนกรีตที่ที่มีส่วนผสมจากมวลรวมที่มาจากทรายแม่น้ำที่ผ่านการคละขนาด กับหิน และมีปูนซีเมนต์ประเภทปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมกับน้ำทำการทดสอบแรงตรงศูนย์ด้วยเครื่องมือทดสอบรับแรงอัด เมื่อทำการทดลอง พบว่าเกิด Micro Cracking ในช่วงกลางของการทดสอบและท่อพลาสติกเมื่อถึงจุดสิ้นสุดของกระบวนการทดสอบ

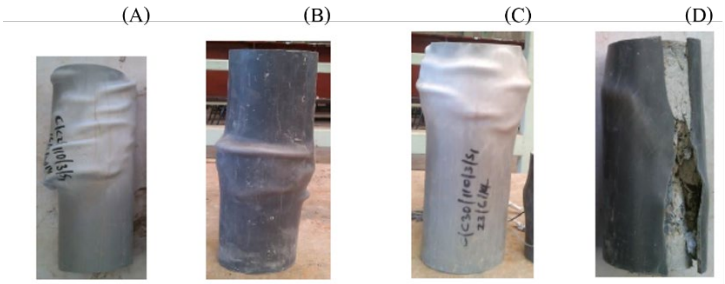


Fig. 3 Typical composite and empty UPVC tube specimens after test – failure mode. (A) Shearing; (B) Mid-height bulging; (C) Top bulging; (D) Bursting

การวิบัติที่เกิดขึ้นจากการทดสอบมีทั้งหมด 4 รูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการโอบรัดของท่อจากอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกกับความหนา (D/t) ในการทดสอบครั้งนี้ สำหรับการวิบัติในการทดสอบดัง Fig. 3 (Oyawa et al, 2015) ได้แก่

1. การวิบัติจากแรงเฉือน (Shear Type) วิบัติจากความเค้นเฉือนทางเดียวของคอนกรีต ดัง Fig. 3A
2. การปูด (Bulging) เป็นการขยายของโครงสร้าง เกิดที่ตรงกลางหรือด้านบนของตัวอย่างดัง Figs. 3B–3C
3. การระเบิดของท่อ UPVC (Bursting) หลังจากท่อ UPVC รับการบีบอัดไม่ไหว รายละเอียดตาม Fig. 3D

ผู้วิจัยดำเนินการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นแล้ว เนื่องจากโพลีไวนิลคลอไรด์เป็นวัสดุที่มีความเหนียว ความยืดหยุ่น มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมแปรปรวนและทนทานสารเคมี มีการป้องกันไม่ให้เกิดการแตกลายงาและการพังทลายแบบทันทีทันใด ผู้วิจัยตัดสินใจนำท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ ทดสอบการรับแรงอัดประเภทแรงตรงศูนย์ โดยท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ประเภทท่อประปา Class 13.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11.4 เซนติเมตร เติมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยต่ำ เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีกำลังและขนาดใกล้เคียงกัน ผู้วิจัยคิดค้นวิธีการดังต่อไปนี้

อุปกรณ์และวิธีการ

ผู้วิจัยใช้ท่อประปาประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ CLASS 13.5 ความหนา 8.1 มิลลิเมตรมอก.17/2532 ขนาด 4 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11.4 เซนติเมตร กรอกท่อด้วยคอนกรีตจำนวน 3 ตัวอย่าง และจัดทำคอนกรีตที่มีขนาดใกล้เคียงกันจำนวน 3 ตัวอย่าง ติดตั้งบนชุดติดตั้งตัวอย่างทดสอบแรงอัดตาม Fig.4

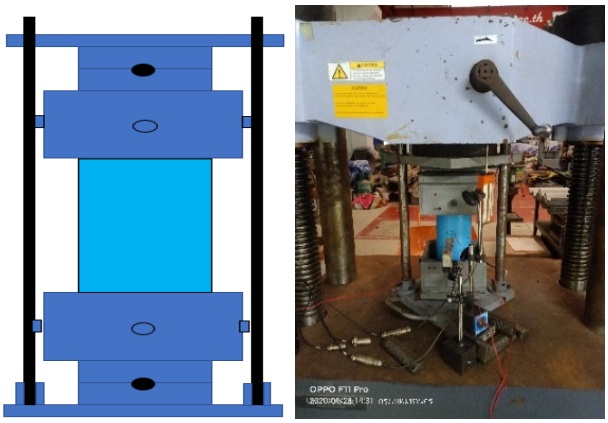


Fig. 4 Compression specimen installation set

วิธีการทดสอบแรงตรงศูนย์

1. ทดสอบแรงดึงของโพลีไวนิลคลอไรด์ CLASS 13.5 ตามมาตรฐาน ASTM D638

2. ทำตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันเท่ากับ 169 ksc เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.8 เซนติเมตรโดยมีค่าความยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง หลังจากตัวอย่างแห้ง จึงบ่มด้วยน้ำ เมื่ออายุไม่น้อยกว่า 28 วัน จึงทำการเตรียมทดสอบ

3. ทำตัวอย่างโพลีไวนิลคลอไรด์ CLASS 13.5 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11.4 เซนติเมตร เติมด้วยคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันเท่ากับ 178.5 ksc ความยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ หลังจากตัวอย่างแห้ง จึงบ่มด้วยน้ำเมื่ออายุไม่น้อยกว่า 28 วัน จึงทำการเตรียมทดสอบ

4. ในการทดสอบแรงอัด จะดำเนินการติดตั้งติดตั้งตัวอย่างในชุดตัวอย่างทดสอบแรงอัด และนำไปทดสอบแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ประสิทธิภาพ 80 ตัน ใช้ความเร็วระหว่าง 0.1 – 0.2 มม./นาที สำหรับคอนกรีตทรงกระบอก และความเร็วระหว่าง 0.5–1 มม./นาที สำหรับท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีต

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบแรงดึงของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์จากตัวอย่างทดสอบประเภท Drum Bell ประเภท type3-ขนาดตามมาตรฐาน ASTM-D-638 จำนวน 5 ตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine กำลังรับแรงสูงสุด 80 ตัน ความเร็ว 1 มิลลิเมตร/นาที (ข้อแนะนำมาจากจากมาตรฐาน ASTM D-638 ให้ดึงด้วยความเร็ว 0.2–2 มิลลิเมตร/นาที) ได้กำลังรับแรงดึงที่จุดครากเฉลี่ย 205 ksc ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย 91,527 ksc ค่าความเครียดเฉลี่ยจุดครากเท่ากับ 0.0026

จากการทดสอบท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ class 13.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11.4 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง กำลังแรงอัดตรงศูนย์เฉลี่ยเท่ากับ 26.6 Mpa มีผลการทดลอง ดัง Table 1

Table 1 Concrete filled PVC tube Experimental results: Ultimate Force

No.	Specimen	Tube thickness (mm)	Outside diameter (mm)	Ultimate compression force (ton)	Ultimate Compression Strength (Mpa)
1	CPFTA-30-1	8.1	114.3	28.1	27.4
2	CPFTA--30-2	8.1	114.7	27.2	26.3
3	CPFTA-30--3	8.1	114.2	26.7	26.1

จากการทดสอบคอนกรีตชนิดผสมเทรูปร่างทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.8 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง กำลังแรงอัดตรงศูนย์เทียบเท่าพื้นที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.48 ตัน มีผลการทดลองดัง Table 2

Table 2 Concrete Experimental results : Ultimate Force

No.	Specimen	Outside Diameter (mm)	Ultimate compression force	Ultimate Compression Strength (Mpa)
1	CA-30-1	109	10.7	11.46
2	CA-30-2	108.3	13.00	14.09
3	CA-30-3	108.9	13.8	14.89

จากการทดสอบ จะพบว่า กำลังของท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีตที่จุดประลัย มีประสิทธิภาพการโอบรัดที่ 1.95 หรือ 95 % นั่นคือมีกำลังเพิ่มขึ้น 95 %

ส่วนพฤติกรรมที่เกิดขึ้น จากการติดตั้ง Strain gage บริเวณตรงกลางวัสดุ ในแนวเดียวกับแกนหลัก 2 จุด และแกนรอง 1 จุด รวมทั้งเครื่องวัดระยะยืดแนวราบ 1 จุดในแนวราบตรงกลาง และในแนวดิ่ง 1 จุด จึงขอนำเสนอพฤติกรรมของตัวอย่างหมายเลข CFPTA-30-2 และตัวอย่าง CA-30-3 พบว่ามีพฤติกรรมดังนี้

พฤติกรรมของตัวอย่าง CFPTA-30-2 วัดจากการวัดค่าความเครียดจาก Strain gage บริเวณตรงกลางวัสดุ ในแนวเดียวกับแกนหลัก 2 จุด (ตามจุดที่ 2 (ch2) และ 3 (ch3)) และแกนรอง 1 จุด (จุดที่ 4 (ch4)) โดยจะเกิดการหดตัวของวัสดุทุกจุดจากการเกิดความเครียดติดลบและจะไม่วิบัติทันทีทันใด โดยเกิดการโก่งตัวรูปแบบ Top Buldging

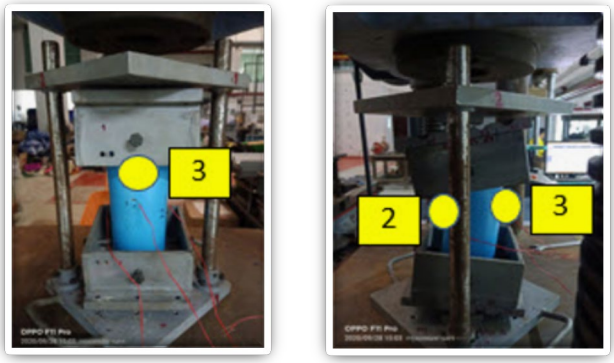


Fig. 5 Failure of CFPTA-30-2 after finished test

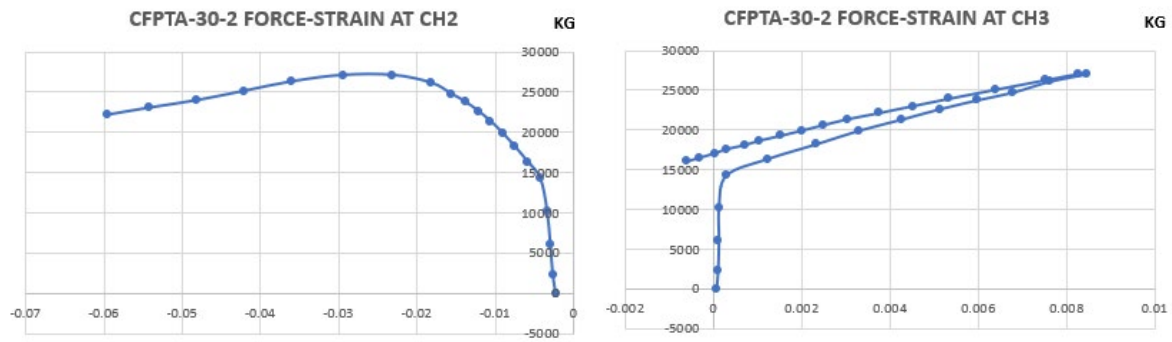


Fig. 6 Force-Strain at ch2, 3 results of CFPTA-30-2

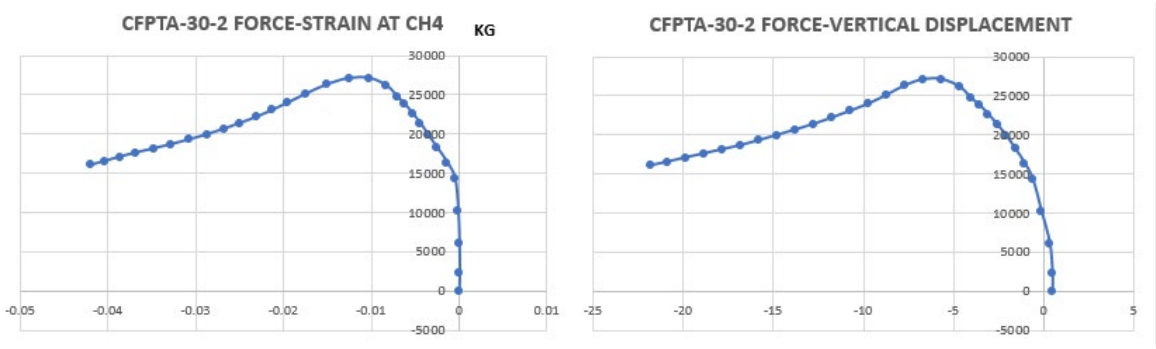


Fig. 7 Force-Strain at ch4 and Force-Vertical Displacement results of CFPTA-30-2

จาก Figs. 6–7 จะเห็นการเพิ่มขึ้นของแรงอัดในแนวดิ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมกับความเครียดในแนวราบ รวมทั้งกราฟแรงอัดกับการหดตัวแนวดิ่ง โดยจุด CH 2 ซึ่งอยู่ตรงกลางวัสดุแกนหลักของแรงอัด จะมีความเครียดติดลบเนื่องจากวัสดุกำลังเกิดการโอบรัดจนกระทั่งถึงจุดที่มีค่ากำลังสูงสุด 26.1 ตัน เริ่มมีการบีบอัดมากขึ้นเนื่องจากมีการปูดบริเวณด้านบนหรือ Top Buldging ของวัสดุทั้งสองด้านทำให้เกิดการบีบอัดจุด CH3 ด้วย ส่วนจุด CH4 ที่อยู่แนวแกนรองของวัสดุมีพฤติกรรมเหมือนจุด CH2 เช่นกัน หลังกำลังสูงสุด แรงจะลดลงค่อยเป็นค่อยไป

พฤติกรรมของตัวอย่าง CA-30-3 พิจารณาได้จากการวัดค่าความเครียดจาก Strain gage บริเวณตรงกลางวัสดุ ในแนวเดียวกับแกนหลัก 2 จุด (ตามหมายเลข CH 2 และหมายเลข CH 3) และแกนรอง 1 จุด (หมายเลข CH 4) ซึ่งจะเกิดความเครียดในจุดต่างโดยมีแนวโน้มจะเกิดการหดตัวของวัสดุทุกจุด และวิบัติทันทีทันใด รวมทั้งการวัดค่าการหดตัวของวัสดุในแนวดิ่ง จะพบว่าหลังจากผ่านจุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัด กำลังจะตกลงทันทีทันใด

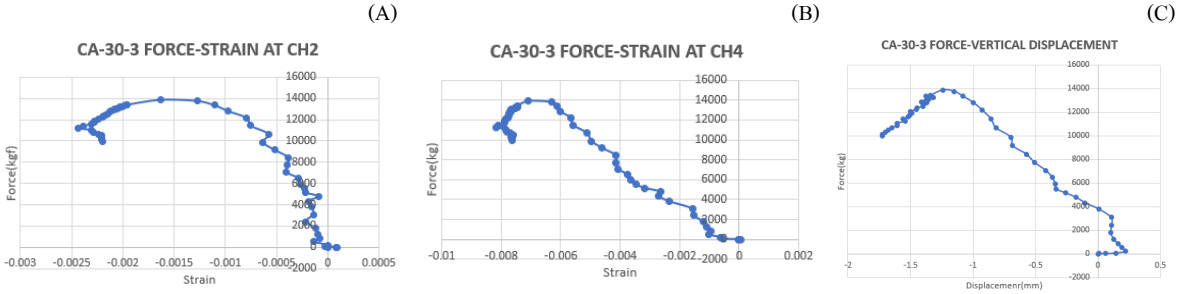


Fig. 8 Force-Strain CH2 (A), CH4 (B), vertical displacement results (C) of CA-30-3

สรุป

จากการทดสอบข้างต้น จะเห็นได้ว่า ท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ class 13.5 เติมด้วยคอนกรีตมีแนวโน้มจะรับแรงเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน จากการทดลองพบว่าเมื่อนำมาเทียบเท่ากันพบว่ามีกำลังมากกว่าถึง 95 % และมีพฤติกรรมที่มีการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป กำลังจะค่อยๆลดลง เนื่องจากประสิทธิภาพการยึดของโพลีไวนิลคลอไรด์และการโอบรัดไม่ให้วัสดุประลัยทันที ทำให้วัสดุโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีตมีความเหนียวมากกว่าคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีความคงทนมากขึ้น หากท่อโพลีไวนิลคลอไรด์มีคุณสมบัติในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ทำให้ท่อโพลีไวนิลคลอไรด์เติมด้วยคอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังคอยช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่อง รวมถึงปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย

นอกจากนี้ ขอขอบคุณโครงการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, ท่อพีวีซีแข็งสำหรับใช้เป็นท่อน้ำดื่ม มอก.17/2532

Han, L.-H., Li, W., Bjorhovde, R. 2014. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. J. Constr. Steel Res. 211–228. doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.016

Neelam, M.K., Kalaga, S. 2002. Elastic properties of PVC pipe. J. Struct. Eng. 29: 91–96

Oyawa, W.O., Gathimba, N. Mang 'uriu, G.N. 2015. Innovative composite concrete filled plastic tubes in compression. In: Conference: The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM 15), 25th – 29th August 2015, Incheon, Korea

Wang, J-Y., Yang, Q.-B. 2012. Investigation on compressive behaviors of thermoplastic pipe confined. Constr. Build. Mater. 35: 578–585. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.017

การประมาณค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อยในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว จังหวัดสุพรรณบุรี โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล

Water requirement estimation of Sugarcane in Kraseaw's irrigation project, Suphan Buri Province by using remote sensing technology

กีรติยา นวลจันทร์, วีระเกษตร สวนผกา*

Keeratiya Nualjan, Weerakaset Suanpaga*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: keeratiya.nu@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าปริมาณความต้องการในการใช้น้ำของอ้อยจากค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงกับค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย ในเขตพื้นที่ชลประทานโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว จังหวัดสุพรรณบุรี สำหรับเป็นข้อมูลการวางแผนจัดสรรน้ำให้อ้อยในภาพรวมตามอายุของอ้อยที่ปลูกในเขตพื้นที่ชลประทานทั้งหมดประมาณ 45.50 ตารางกิโลเมตร ในหนึ่งฤดูหีบอ้อย เพื่อให้มีความเหมาะสมของปริมาณการส่งน้ำต่อความต้องการในการใช้น้ำของอ้อยที่แท้จริง โดยนำเทคโนโลยีสำรวจระยะไกลมาประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณการใช้น้ำของอ้อย ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยที่แปรผันตามสภาวะหรืออายุของอ้อย จากการพิจารณาค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI จากดาวเทียม Sentinal-2 ในการเทียบเคียง และร่วมกับใช้ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยาจากข้อมูลออนไลน์ของคลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ เพื่อคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงด้วยสมการ Penman-Monteith และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อย ในเขตพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว ทำให้ทราบค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อยที่ละเอียดและมีความถูกต้องมากขึ้น

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ดัชนีพืชพรรณ NDVI, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, Sentinel-2

Abstract

This research objective is to estimate water requirement of sugarcane using Evapotranspiration (ET) in Kraseaw's irrigation project, Suphan Buri Province. The result can be used for managing water resource in project area that will reach the requirement in of crop the project area at 45.50 km^2. The technique that use is adapt remote sensing technology to determine water requirement with Penman-Monteith and satellite image data from Sentinel-2. Which is 10x10 m2 resolution of normalized difference vegetable index (NDVI) and meteorology data. This research focused on Sugarcane that crop coefficient (Kc) vary on crop condition and age of crop along with NDVI compared. Moreover, meteorology data is used to calculate reference crop water usage by Penman-Monteith equation. As a result, the actual Sugarcane water requirement can be calculated with more accuracy.

Keywords: crop factor, normalized difference vegetable index, reference crop evapotranspiration, sentinel-2

คำนำ

กรมชลประทานเป็นหน่วยงานหลักในการบริหารจัดการน้ำ มีภารกิจจัดสรรน้ำให้แก่ผู้ใช้น้ำอย่างทั่วถึงและเป็นธรรม ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ปริมาณน้ำต้นทุนในเขื่อนต่างๆ ไม่เพียงพอต่อการบริหารจัดการน้ำ เกิดปัญหาภัยแล้งในหลายพื้นที่ จึงจำเป็นต้องมีการจัดสรรน้ำให้เพียงพอต่อความต้องการในพื้นที่ ทั้งนี้ การบริหารจัดการน้ำจำเป็นต้องทราบค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ส่งให้แต่ละพื้นที่ งานวิจัยนี้ศึกษาการปลูกอ้อยในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว จังหวัดสุพรรณบุรี เนื่องจากมีการทำการเกษตรอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณน้ำต้นทุนที่จำกัด ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกอ้อยเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากในพื้นที่โครงการมีการปลูกอ้อยเป็นจำนวนมาก อีกทั้งอ้อยยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่ใช้น้ำน้อย มีตลาดรองรับผลผลิตค่อนข้างแน่นอน มีราคาตอบแทนต่อไร่สูง และมีการประกันราคาจากรัฐบาล แต่เนื่องจากอ้อยมักจะมีปัญหาเรื่องปริมาณผลผลิตที่ได้แต่ละปีไม่แน่นอน ซึ่งมีปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้อง คือ ปริมาณน้ำที่ได้รับไม่เพียงพอต่อความต้องการน้ำของอ้อยในช่วงการเจริญเติบโต ส่งผลให้อ้อยขาดแคลนน้ำในบางช่วงของการเจริญเติบโต และหลายพื้นที่ที่อยู่ในเขตพื้นที่ชลประทานมีการปลูกอ้อยต่อเนื่องตลอดทั้งปี ไม่สามารถระบุช่วงเวลาเริ่มต้นการปลูกได้อย่างชัดเจน ทำให้การคำนวณความต้องการการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยโดยใช้ค่า K_c ที่อ้างอิงจากกรมชลประทานทำได้ยาก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำการสำรวจระยะไกลด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม (satellite remote sensing) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของอ้อยในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว จังหวัดสุพรรณบุรี เพื่อนำผลการศึกษาครั้งนี้ไปใช้เป็นแนวทางในพัฒนาการติดตามปริมาณการใช้น้ำของพืชสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพในระดับสูงขึ้นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน (1) ภาพถ่ายดาวเทียม (2) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (3) โปรแกรม Quantum GIS และ (4) โปรแกรม Microsoft Excel

วิธีการดำเนินงาน

1. หาค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ด้วยวิธี Penman-Monteith ตามคู่มือ FAO-56

วิธีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาตามแนวทางของ Penman เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้มากกว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิหรือโดยใช้ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ถึงแม้ว่าการหาโดยใช้อุณหภูมิและรังสีแสงอาทิตย์จะต้องการข้อมูลและมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่า แต่เนื่องจากวิธีของ Penman ได้รวบรวมองค์ประกอบทุกอย่างที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืชมาอยู่ในสมการ จึงให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ (วิบูลย์, 2526)

วิธี FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) เป็นวิธีการคำนวณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงตามคู่มือ FAO Irrigation and Drainage Paper no 56 หรือเรียกโดยย่อ FAO-56 เป็นวิธีการคำนวณที่พัฒนามาจากพื้นฐานของ

สมการของ Penman-Monteith โดยปัจจุบัน FAO ได้แนะนำให้ใช้สมการนี้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Smith et al., 1992)

การประมวลผลหาค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงตามสมการ Penman-Monteith นั้น ข้อมูลที่ใช้คำนวณจะประกอบได้ด้วยตัวแปร Rn = พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์สุทธิที่พื้นผิว (MJ $m^{-2}day^{-1}$) ตัวแปร G = พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน (MJ $m^{-2}day^{-1}$) ตัวแปร T = อุณหภูมิอากาศ (°C) ตัวแปร u_2 = ความเร็วลมที่ระดับความสูง 2 เมตรจากผิวดิน (m s^{-1}) ตัวแปร $e_s - e_a$ = ผลต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัว (e_s) กับความดันไอน้ำจริงในอากาศ (e_a) (kPa) ตัวแปร Δ = ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัวหรือโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไอน้ำ (kPa $°C^{-1}$) ตัวแปร γ = ค่าคงที่ของเทอมความชื้น (psychrometric constant) (kPa $°C^{-1}$) ดัง Equation 1

$$ETo = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงด้วยสมการ FAO Penman-Monteith ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ (1) การหาค่าพารามิเตอร์ของภูมิอากาศ (2) การคำนวณค่าความดันไอน้ำในอากาศที่ขาด (e_s - e_a) (3) การหาพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิที่พื้นผิว (R_n) และ (4) การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของภูมิอากาศ โดยมีข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณ ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดประจำวัน (T_{max}) อุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน (T_{min}) ระดับความสูง (z) และ ความเร็วลม (u_2) โดยใช้ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยาจากข้อมูลออนไลน์ของคลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ สามารถคำนวณได้ตาม Equation 2

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (2)$$

เมื่อ ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure, P) เป็นความดันที่เกิดจากน้ำหนักบรรยากาศโลกที่กดทับเหนือพื้นผิว มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล (kP_a) ในการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ได้เลือกใช้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 20°C เป็นมาตรฐาน โดยให้ปรับแก้ค่าตามระดับความสูง z สามารถคำนวณได้ตาม Equation 3

$$P = 101.3\left(\frac{293 - 0.0065z}{293}\right)^{5.26} \quad (3)$$

ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว (slope of vapor pressure curve) หรือโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอน้ำอิ่มตัว เขียนด้วยสัญลักษณ์ Δ มีหน่วยเป็น $kPa°C^{-1}$ สามารถคำนวณได้ตาม Equation 4

$$\Delta = \frac{2503\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)}{(T+237.3)^2} \quad (4)$$

1.2 การคำนวณค่าความดันไอน้ำในอากาศที่ขาด (e_s-e_a)

กรณีที่มีเพียงข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RH_{mean}) อย่างเดียว สามารถคำนวณได้ตาม Equation 5

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100}\frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (5)$$

ในกรณีมีข้อมูลอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดประจำวัน ความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถหาได้จากความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ย สามารถคำนวณได้ตาม Equation 6

$$e_s = \frac{e^o(T_{max})+e^o(T_{min})}{2} \quad (6)$$

ความดันไอน้ำอิ่มตัว สามารถคำนวณได้ตาม Equation 7

$$e^o(T) = 0.6108exp(\frac{17.27T}{T+237.3}) \quad (7)$$

1.3 การหาพลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิว (R_n) สามารถคำนวณได้ตาม Equation 8

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นสุทธิ (R_{ns}) สามารถคำนวณได้ตาม Equation 9

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (9)$$

โดย α = อัลเบโด (albedo) เป็นโดยค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวโลกใช้เท่ากับ 0.23 สำหรับพืชอ้างอิง, ค่า albedo เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของพื้นผิวและมุมที่รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบ เช่น พื้นผิวที่เป็นหิมะมีค่าประมาณ 0.95 พื้นผิวดินชื้นมีค่าประมาณ 0.05 พื้นผิวที่ปกคลุมด้วยพืชพรรณมีค่าประมาณ 0.2–0.25 เป็นต้น, R_s = รังสีแสงอาทิตย์ช่วงคลื่นสั้น (MJ m^{-2} day^{-1})

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้น (R_s) สามารถคำนวณได้ตาม Equation 10

$$R_s = (a_s + b_s\frac{n}{N})R_a \quad (10)$$

โดย n = จำนวนชั่วโมงแสงแดดที่แท้จริงที่ตรวจวัดได้ในรอบวัน, N = จำนวนชั่วโมงแสงแดดที่เป็นไปได้สูงสุดในรอบวัน, R_a = พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก (MJ ^{2} day^{-1}), ค่า a_s และ b_s เป็นค่าคงที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสำหรับปรับเทียบค่า a_s และ b_s คู่มือ FAO-56 แนะนำให้ใช้ a_s = 0.25 และ b_s = 0.50

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นในกรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง (clear-sky solar radiation, R_{so}) เป็นค่าพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวในกรณีที่ท้องฟ้าไม่มีเมฆปกคลุม (n = N) เป็นค่าที่ใช้ในสมการคำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ (R_{nl}) สามารถคำนวณได้ตาม Equation 11

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad (11)$$

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสำหรับปรับเทียบค่า a_s และ b_s คู่มือ FAO-56 แนะนำให้ใช้ a_s = 0.25 และ b_s = 0.50 หรือ (a_s +b_s) = 0.75 และปรับค่าตามระดับความสูง (z) ดังนั้น พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นในกรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง (R_{so}) สามารถคำนวณได้ตาม Equation 12

$$R_{so} = (0.75+ 2\times10^{-5} z)R_a \quad (12)$$

โดย z = ระดับความสูงจากน้ำทะเลปานกลาง (m)

พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกบรรยากาศโลก (R_a) สามารถคำนวณได้ตาม Equation 13

$$R_a = (\frac{G_{sc}+d_r}{\pi})(\omega_s \sin(\emptyset)\sin(\delta) + \cos(\emptyset)\cos(\delta)\sin(\omega_s)) \quad (13)$$

โดย G_{sc} = ค่าคงตัวพลังงานจากดวงอาทิตย์ (solar constant) เท่ากับ 118.11 MJ m^{-2} day^{-1}, d_r = ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์สัมพัทธ์, ω_s = มุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle) หน่วยเป็น radian, $\emptyset$ = ละติจูด หน่วยเป็น radian, δ = มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล (solar declination) หน่วยเป็น radian

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ (R_{nl}) สามารถคำนวณได้ตาม Equation 14

$$R_{nl} = \sigma(\frac{T^4_{max,K}+T^4_{min,K}}{2})(0.34 - 0.14\sqrt{e_a})(1.35\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad (14)$$

โดยที่ σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่า 4.903×10^{-9} (MJ $K^{-4}m^{-2}day^{-1}$), $T_{max,K}$ = อุณหภูมิสูงสุดประจำวัน หน่วยเป็นเคลวิน (K), $T_{min,K}$ = อุณหภูมิต่ำสุดประจำวันวัน หน่วยเป็นเคลวิน (K), e_a = ความดันไอน้ำจริงในอากาศ (kP_a), R_s = พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้น (MJ $m^{-2}day^{-1}$), R_{so} = พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นกรณีฟ้าปลอดโปร่ง (MJ $m^{-2}day^{-1}$)

พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน (soil heat flux, G) ถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในรอบ 1 วัน จึงกำหนดให้ $G \approx 0$ ในกรณีคำนวณการใช้น้ำเป็นรายวัน ส่วนกรณีคำนวณเป็นรายเดือน สามารถคำนวณได้ตาม Equation 15

$$Gmonth, i = 0.07(Tmonth, _{i+1} - Tmonth, _{i-1}) \quad (15)$$

โดยที่ $Tmonth, _{i-1}$ เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนก่อนหน้านี้ (°C), $Tmonth,_{i+1}$ เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนต่อไป (°C)

1.4 การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงคำนวณจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่หาจากขั้นตอนก่อนหน้านี้

2. กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย (K_c)

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยที่เป็นตัวเลขค่าสัมประสิทธิ์ เป็นผลงานที่ได้จากการศึกษา ทดลอง และวิจัยฯ โดยนักวิจัยสาขาต่างๆ ของส่วนการใช้น้ำชลประทาน สามารถหาข้อมูลได้จากศูนย์ประมวลผลวิเคราะห์สถานการณ์น้ำ กรมชลประทาน แต่เนื่องจากค่า K_c จะแบ่งตามอายุของพืช เพราะแต่ละอายุของพืชจะมีการใช้น้ำแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้ค่า NDVI มาใช้ในการประมาณอายุของอ้อยในพื้นที่โครงการตามวิธีการดังต่อไปนี้

2.1 การประมวลผลข้อมูล NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

ประมวลผลข้อมูล NDVI จากข้อมูล Sentinel-2 ได้จากความแตกต่างระหว่างการสะท้อนคลื่นอินฟาเรดใกล้ (Near-infrared) และคลื่นสีแดง (Red) สามารถคำนวณ NDVI จากข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 (Equation 16):

$$NDVI = \frac{B8-B4}{B8+B4} \quad (16)$$

2.2 กำหนดอายุอ้อยจากข้อมูล NDVI

ค่า K_c จะแบ่งตามอายุอ้อยเป็นรายเดือน แต่เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจเรื่องอายุของอ้อย งานวิจัยนี้จึงแบ่งอายุอ้อยออกเป็น 4 ช่วงอายุ คือ ระยะตั้งต้น (เดือนที่ 1–2) ระยะแตกกอ (เดือนที่ 3–5) ระยะยืดปล้อง (เดือนที่ 6–8) และระยะสุกแก่ (เดือนที่ 9–10) ดังนั้น การกำหนดอายุอ้อยด้วยค่า NDVI จึงใช้การแบ่งชั้นระหว่างของค่า NDVI คือ ระหว่าง 0.30–0.62 จะได้แปลงปลูกอ้อย 4 ช่วงอายุ คือ ระยะตั้งต้น NDVI ระหว่าง 0.30–0.31 ระยะแตกกอ NDVI ระหว่าง 0.31–0.46 ระยะยืดปล้อง NDVI ระหว่าง 0.46–0.54 และระยะสุกแก่ NDVI ระหว่าง 0.54–0.62

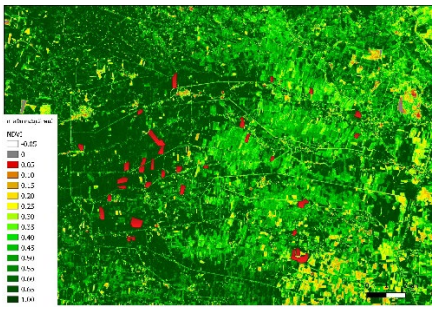


Fig. 1 Samples of sugar cane fields, Kraseaw's irrigation project, Suphan Buri Province as of November 26, 2019

2.3 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย (K_c)

นำค่า Kc ที่กำหนดอายุอ้อยเป็น 10 เดือน ไปแบ่งชั้นค่า NDVI โดยสังเกตค่า NDVI ในช่วงที่อ้อยเริ่มเจริญเติบโต ค่า NDVI ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นจนถึงช่วงการเก็บเกี่ยว ค่า NDVI ที่ได้จะมีค่าลดลง ทั้งนี้กำหนดให้ค่า NDVI สูงสุดเป็นช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว จากนั้นนำค่า NDVI ที่ได้อื่นมาแบ่งชั้นตามค่า Kc จึงได้ค่า NDVI ออกเป็น 10 ช่วง ดังแสดงใน Table 1 จะได้เกณฑ์การกำหนดอายุอ้อยรายเดือนจากค่าดัชนี NDVI สำหรับสร้างเป็นข้อมูลต่อไป

Table 1 Result of K_c determination according to sugarcane aging range and NDVI index value

Month	Penman - Monteith Crop coefficient (Kc)	Growth phase	NDVI
Feb-62	0.65	Germination & Establishment Phase	0.3039
Mar-62	0.86	Germination & Establishment Phase	0.3102
Apr-62	1.13	Tillering Phase	0.3208
May-62	1.35	Tillering Phase	0.4473
Jun-62	1.56	Tillering Phase	0.4609
Jul-62	1.29	Grand Growth Period	-
Aug-62	1.20	Grand Growth Period	-
Sep-62	0.93	Grand Growth Period	0.5481
Oct-62	0.63	Ripening Phase	0.6138
Nov-62	0.52	Ripening Phase	0.6260

3. การคำนวณค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อย (ET_c)

การคำนวณค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อย (ET_c) ของแต่ละจุดภาพในแต่ละเดือน คือ การนำค่า ET_o และ K_c (Equation 17)

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (17)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o)

ผลการคำนวณค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงด้วยสมการ Penman-Monteith ตามสมการที่ 1 ได้ผลลัพธ์เป็นค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Reference water consumption value between February to November 2019

Month	Reference Crop Evapotranspiration (ET_o) mm./d
Feb-62	3.93
Mar-62	5.67
Apr-62	5.75
May-62	6.06
Jun-62	6.28
Jul-62	-
Aug-62	-
Sep-62	3.57
Oct-62	4.33
Nov-62	4.58

ค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อย (ET_c)

ผลการคำนวณค่าปริมาณการใช้น้ำของอ้อยตามสมการที่ 17 ของปริมาณการใช้น้ำในรายจุดภาพหรือหนึ่งค่าต่อหน่วยพื้นที่ 10 × 10 ตารางเมตร เมื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณกับพื้นที่ปลูกอ้อยทั้งหมดในเขตพื้นที่ชลประทานประมาณ 45.50 ตารางกิโลเมตร จะได้ปริมาณการใช้น้ำในพื้นที่ปลูกอ้อยทั้งหมดในโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว จังหวัดสุพรรณบุรี (ลูกบาศก์เมตร/วัน) ผลลัพธ์ดังแสดงใน Table 3

Table 3 The results of calculating water consumption of sugar cane

Month	Penman - Monteith Crop coefficient (Kc)	Reference Crop Evapotranspiration (ET_o) mm./d	Crop Evapotranspiration of sugarcane (ET) mm./d	The volume of Crop Evapotranspiration of sugar cane cultivation area (m^3./d)
Feb-62	0.65	3.93	2.55	116,142.48
Mar-62	0.86	5.67	4.87	221,685.27
Apr-62	1.13	5.75	6.49	295,451.09
May-62	1.35	6.06	8.18	372,234.65
Jun-62	1.56	6.28	9.80	445,872.83
Jul-62	1.29	-	-	-
Aug-62	1.20	-	-	-
Sep-62	0.93	3.57	3.32	151,160.60
Oct-62	0.63	4.33	2.73	124,176.25
Nov-62	0.52	4.58	2.38	108,268.75

ทั้งนี้ ค่าในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม 2562 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม sentinel-2 มีเมฆปกคลุมตลอดทั้งเดือนเนื่องจากอยู่ในช่วงฤดูฝน ทำให้ไม่สามารถนำภาพถ่ายดาวเทียมมาใช้ในการศึกษาได้

สรุป

ผลการศึกษาปริมาณการใช้น้ำของอ้อยในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว จังหวัดสุพรรณบุรี พบว่า ปริมาตรการใช้น้ำในพื้นที่ปลูกอ้อยมากที่สุดในช่วงเดือนมิถุนายน 445,872.83 ลบ.ม./วัน และน้อยที่สุดในช่วงเดือนพฤศจิกายน 108,268.75 ลบ.ม./วัน ซึ่งการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยามาคำนวณประมาณการใช้น้ำของอ้อยเชิงพื้นที่อย่างละเอียด และได้แสดงให้เห็นความสามารถในการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากดาวเทียมรายละเอียดสูง Sentinel-2 ในการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้พัฒนาเป็นระบบติดตามการใช้น้ำ เพื่อสร้างระบบต่อยอดที่สามารถบริหารจัดการน้ำในเขตพื้นที่ชลประทานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ รศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั้งการทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ดีบุญ เมธากุลชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยชี้แนะแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่มีคุณค่ายิ่ง ขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ และกรมชลประทานที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่ใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

เอกสารอ้างอิง

ธกรกฤต จันไชยยศ, สรวิศ สุภเวชย์, กาญจน์เขจร ชูชีพ. 2561. การพัฒนาอัลกอริทึมประมาณการใช้น้ำในนาข้าว ณ เวลาจริงด้วยข้อมูลเซนเซอร์จากดาวเทียม Suomi NPP VIIRS. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย. หน้า 132–145.

พลัฏฐ์ ปาจิตร, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์. 2562. การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชเกษตรในเขตพื้นที่ชลประทานฝ่ายส่งน้ำและบำรุงรักษาที่ 1 (เขื่อนวังร่มเกล้า) โครงการชลประทานอุทัยธานี โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล. ใน: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, หน้า 2617–2623.

ส่วนการใช้น้ำชลประทาน. 2555. ค่าสัมประสิทธิ์พืชโดยวิธี Penman – Monteith Crop coefficient (Kc) of Penman – Monteith., สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา, กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ.

เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย. 2552. การใช้น้ำของพืช: ทฤษฎีและการประยุกต์. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

Martijn van Dijk. A.I.J.M, Schellekens, J., Yebra, M., Beck, H. 2018. Global 5 km resolution estimates of secondary evaporation including irrigation through satellite data assimilation. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22: 4959–4980. doi.org/10.5194/hess-22-4959-2018

การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหิ้งสะท้อนแสงโค้งต่อปริมาณแสงธรรมชาติในร้านขายยา

The Study of the Effect of Curved Light Shelf on Daylighting in Drug Store

ภัควันต์ อัจฉริยนนท์*, นวลวรรณ ทวยเจริญ

Pakawan Achariyanont*, Nuanwan Tuaycharoen

ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: pai_arc@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหิ้งสะท้อนแสงโค้งต่อปริมาณแสงธรรมชาติในร้านขายยา โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหิ้งสะท้อนแสงทั้งหมด 8 รูปแบบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสง โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DIALux 4.13 และกำหนดร้านขายยาที่ใช้เป็นกรณีศึกษาขนาด 4×8 เมตร สูง 3.5 เมตร ช่องเปิดเป็นระบบโครงสร้างผนังกระจกเปิดโล่งหันไปทางด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตกของอาคาร ในสภาพท้องฟ้าแบบโปร่ง และมีการใช้งานในห้องตั้งแต่ช่วงเวลา 8.00–18.00 น. โดยทดสอบตัวแปรต้นคือ รูปแบบหิ้งสะท้อนแสงแบบโค้ง 8 รูปแบบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าค่าของการส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีจากรูปแบบเกือบทุกรูปแบบที่ทำการทดสอบมีค่าสูงกว่า 500 ลักซ์ เป็นค่าจากการศึกษาเทียบเคียงห้องจ่ายยาในโรงพยาบาล โดยทิศเหนือ ทิศใต้ และทิศตะวันออก รูปแบบหิ้งแสงโค้งที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้กับร้านขายยาคือหิ้งแสงโค้งภายนอกมุมขึ้น 30^{o} ภายในมุม 0^{o} (รูปแบบที่ 4) โดยทิศตะวันตกรูปแบบหิ้งแสงโค้งที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้กับร้านขายยาคือโค้งภายนอกมุม 0^{o} ภายในมุมขึ้น 30^{o} (รูปแบบที่ 3)

คำสำคัญ: ร้านขายยา, แสงธรรมชาติ, หิ้งสะท้อนแสงโค้ง

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of characteristic of curve light shelf on amount of daylighting in a drug store. There were 8 types of curve light shelf investigated in terms of illuminance levels and uniformity simulated by using DIALux 4.13. The simulation was carried out when it was a clear sky condition and opening hour is from 8.00 a.m. – 6.00 p.m. only. The case study in this study was a drug store room with 4m. wide × 8m. long × 3.5m. high. The study explored 4 orientations of the room, which are when the room have a wall glazing facing the north, the south, the east and the west. Eight options of curve light shelf in a drug store were investigated. The results of yielded the conclusion that most of the types of investigated curved light shelf gave illuminance values higher than 500 Lux (Study values CIE). The best types of curve light shelf using in for the north, the south and the east of the drug store room were option 4 (curve light shelf with 0 ^{o} inside cantilever and 30 ^{o} upward outside cantilever). And, the best option for West of the drug store room is option 3 (curve light shelf with 30 ^{o} upward inside cantilever and 0 ^{o} outside cantilever)

Keywords: curve light shelf, daylight, drug store

คำนำ

ร้านขายยาเป็นตัวแทนร้านขายผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และปัจจุบันธุรกิจประเภทนี้ได้มีรูปแบบการจัดจำหน่ายเพื่อเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายในชุมชนและจังหวัดกระจายอยู่ตามที่ต่างๆ เพื่อให้ผู้คนได้เข้าถึงได้ง่ายจากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า การใช้แสงสว่างในร้านขายยาไม่ว่าจะเป็นการใช้แสงประดิษฐ์และแสงธรรมชาติยังไม่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่ไม่ได้มีการป้องกันแสงแดดเข้ามาในร้านขายยา ซึ่งจะยังส่งผลทำให้เกิดปัญหาทางด้านการมองเห็น แสงบาดตา ความร้อน และรังสี UV และ IR ที่เข้ามาในร้านดังกล่าวจะก่อให้เกิดการทำลายต่อเวชภัณฑ์ต่างๆ ในร้านได้โดยจากการสำรวจพบว่า มีแสงแดดส่องเข้าในร้านโดยตรงส่องผลิตภัณฑ์บางส่วนโดยเฉพาะบริเวณหน้าร้านและค่าความส่องสว่างของร้านขายยาได้เทียบเคียงกับห้องจ่ายยาคือ 500 ลักซ์ (CIE, 2011)

หิ้งสะท้อนแสงเป็นเทคนิคการใช้แสงธรรมชาติที่มีการศึกษาในอดีต โดยหิ้งสะท้อนแสง (Light Shelf) สามารถดึงแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ภายในอาคาร และยังสามารถป้องกันแสงแดดโดยสะท้อนแสงแดดขึ้นไปยังฝ้าเพดานก่อนสะท้อนลงมาในห้อง ดังนั้น การสะท้อนแสงดังกล่าวจะช่วยในการลดปริมาณความร้อน รังสี UV และรังสี IR ซึ่งทำให้บรรจุภัณฑ์และฉลากยาต่างๆ ไม่ซีดจาง และไม่เกิดการเสื่อมสภาพของยาได้ นอกจากนี้ยังช่วยทำให้เกิดความสว่างของฝ้าเพดานที่มากขึ้นและกระจายแสงให้สม่ำเสมอในพื้นที่ที่เพิ่มขึ้น เพื่อใช้งานในหน้าที่ต่างๆ ที่ค่อนข้างยากในร้านขายยา อาทิ การอ่านฉลากยา และการตรวจอาการเบื้องต้น รวมไปถึงทำให้เกิดภาวะสบายตาที่เพิ่มขึ้นได้ (สุธิวัตร, 2559) นอกจากนี้ในแง่การถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารร้านขายยา การติดตั้งหิ้งสะท้อนแสงจะทำหน้าที่กันแสงแดดจึงช่วยลดภาระการทำความเย็นได้อีกทางหนึ่ง ถึงแม้การติดตั้งหิ้งสะท้อนแสงในร้านขายยาจะมีอย่างมากมาย อย่างไรก็ตามจากการรวบรวมเอกสารพบว่า มีการศึกษารูปแบบหิ้งแสงโค้งต่อปริมาณแสงธรรมชาติในอาคารต่างๆ ในประเทศไทย (ราตรี, 2559; สุธิวัตร, 2559; Sok, 2019) แต่ยังไม่มีการศึกษารูปแบบหิ้งสะท้อนแสงโค้งที่เหมาะสมกับร้านขายยาทั้งในการศึกษาในต่างประเทศและในประเทศไทย

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของหิ้งสะท้อนแสงโค้งต่อปริมาณแสงธรรมชาติในร้านขายยา โดยศึกษาเฉพาะร้านขายยาประเภทห้องแถว โดยหวังว่าผลการศึกษาจะสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงรูปแบบการใช้แสงธรรมชาติในร้านยา และเป็นแนวทางในการพัฒนารูปแบบแสงธรรมชาติในอาคารธุรกิจที่มีความคล้ายคลึงกันต่อไปได้

อุปกรณ์และวิธีการ

รูปแบบของร้านขายยาในการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาร้านขายยาแผนปัจจุบัน ประเภท ข.ย.1 ในเขตกรุงเทพมหานคร เนื่องจากเป็นรูปแบบร้านขายยาส่วนใหญ่ในประเทศไทยโดยมีขนาด 1 ห้องแถว หน้ากว้าง 4 เมตร ลึก 8 เมตร ความสูง 3.5 เมตร โดยมีเคาน์เตอร์คิดเงินและโต๊ะให้คำปรึกษาโดยมีรายละเอียดดังภาพด้านล่าง (Fig. 1)

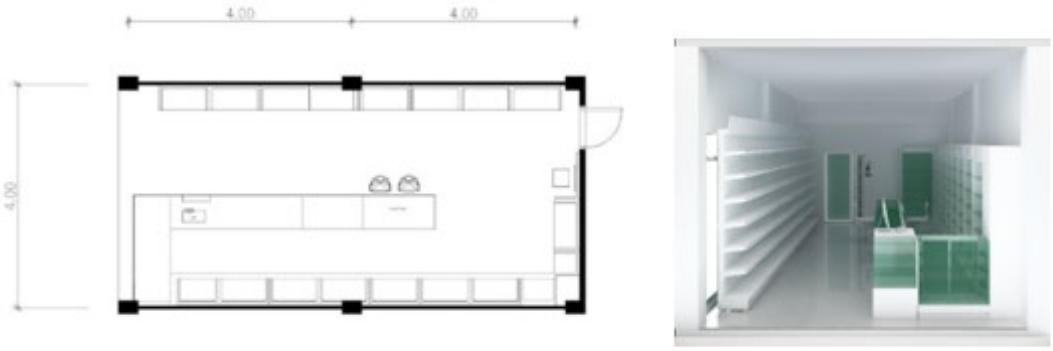


Fig. 1 Plan and perspective of drug store in this study

วิธีการในการศึกษา

ในการศึกษาจะทำการเก็บข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ในอาคารพาณิชย์ โดยมีการสำรวจและการบันทึกค่าต่างๆ โดยในส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจมีดังนี้ ตลับเมตร เข็มทิศ เครื่องคอมพิวเตอร์ ในส่วนการการศึกษารูปแบบของหิ้งสะท้อนแสงโค้งที่เหมาะสมที่สุดต่ออาคารร้านขายยา จะใช้โปรแกรม DIALux 4.13 ที่ใช้ในการจำลองและคำนวณค่าแสง เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวมีความถูกต้องแม่นยำในการจำลองแสงสว่างและใช้ในหลายการศึกษาในอดีต อีกทั้งยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย (อวิรุทธ์, 2554; กรธิชา และสุทัศน์, 2556; บริรักษ์, 2557) โดยทำการจำลองร้านขายยา (รูปแบบมาตรฐาน) ที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร โดยการกำหนดเวลาการทดลอง 8.00–16.00 น. ทุกๆ 2 ชั่วโมง ณ วันที่ 21 ของเดือนมีนาคม (equinox), มิถุนายน (summer solstice) และเดือนธันวาคม (winter solstice) ในสภาพท้องฟ้าแบบโปร่ง โดยศึกษารูปแบบร้านขายยาที่มีการหันช่องเปิดไปทางทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก โดยศึกษาผลการศึกษาค่าความส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสงของการติดตั้งรูปแบบหิ้งสะท้อนแสงโค้ง และสรุปรูปแบบที่ดีที่สุดโดยการหาเปรียบเทียบค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปี และหากค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีเกินค่ามาตรฐานในการวิจัยนี้คือ 500 ลักซ์ โดยเทียบเคียงจากห้องจ่ายยา (CIE, 2011) หลายรูปแบบจะทำการเปรียบเทียบค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีโดยมีเกณฑ์อยู่ที่ 0.6 (CIE, 2011) เพื่อสรุปหารูปแบบที่ดีที่สุดในแต่ละทิศต่อไป

ตัวแปรในการศึกษา

ตัวแปรต้นในการศึกษาครั้งนี้มี 1 ปัจจัย ได้แก่ รูปแบบของหิ้งแสงโค้ง โดยประกอบด้วย 8 รูปแบบ โดยมีระยะยื่นภายในและภายนอก 1 เมตร ทั้งหมด แต่มีมุมองศาการโค้งขึ้นและลงที่แตกต่างกัน โดยการโค้งของหิ้งสะท้อนแสงจะเป็นความโค้งที่รัศมี 1.33 เมตร จากขอบด้านบนของช่องเปิดด้านบน และมุมโค้งขึ้น 30° หมายถึง มุมยก 30° จากแนวระนาบ และมุมโค้งลง 30° หมายถึง มุมลง 30° จากแนวระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 2 (Fig. 2)

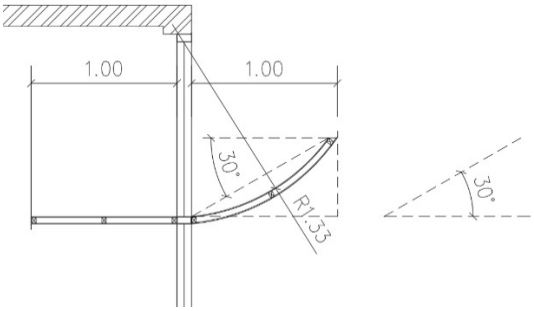


Fig. 2 Method to determined degree of light shelf

โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Table 1 Independent variables to be investigated in the study

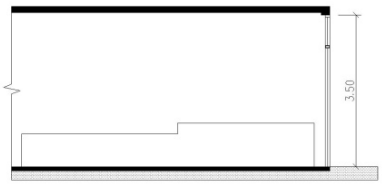
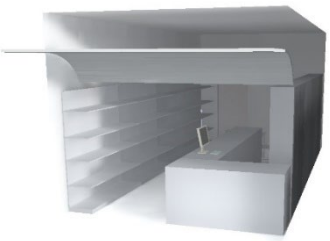
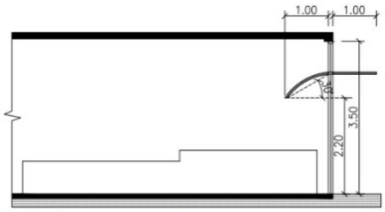
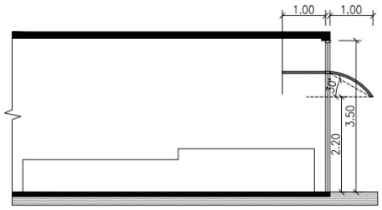
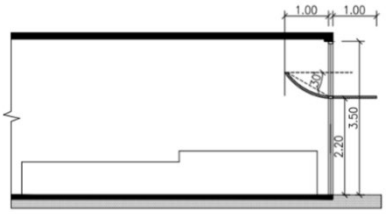
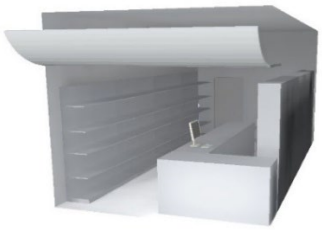
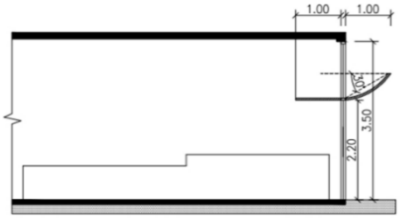
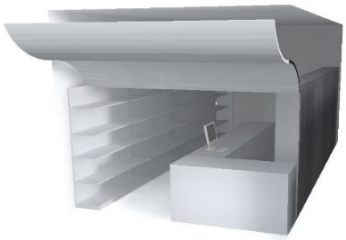
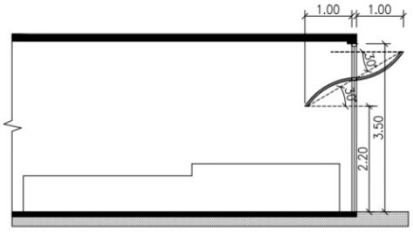
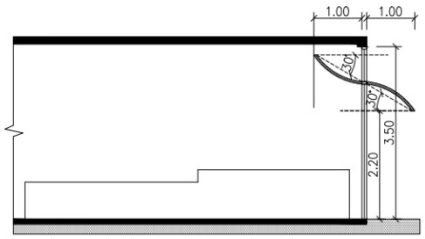
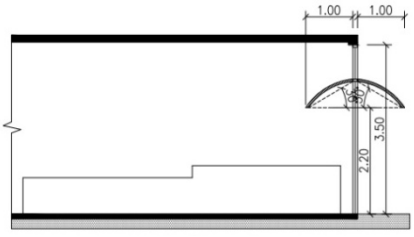
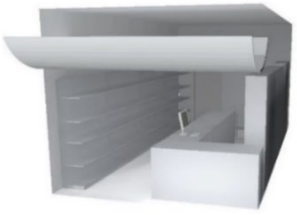
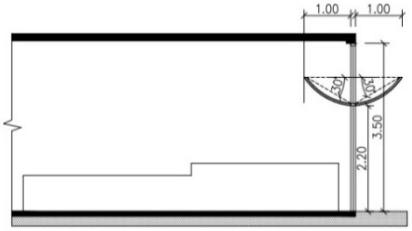
Description	Perspective	Section drawing
Standard type Full glazing with 80 % transmission tempered glass		
Option 1 Curve light shelf with 30 ^{o} downward inside cantilever and 0 ^{o} outside cantilever		
Option 2 Curve light shelf with 0 ^{o} inside cantilever and 30 ^{o} downward outside cantilever		

Table 1 (continued).

Description	Perspective	Section drawing
Option 3 Curve light shelf with 30 ^{o} upward inside cantilever and 0 ^{o} outside cantilever		
Option 4 Curve light shelf with 0 ^{o} inside cantilever and 30 ^{o} upward outside cantilever		
Option 5 Curve light shelf with 30 ^{o} downward inside cantilever and 30 ^{o} upward outside cantilever		
Option 6 Curve light shelf with 30 ^{o} upward inside cantilever and 30 ^{o} downward outside cantilever		
Option 7 Curve light shelf with 30 ^{o} downward inside cantilever and 30 ^{o} downward outside cantilever		
Option 8 Curve light shelf with 30 ^{o} upward inside cantilever and 30 ^{o} upward outside cantilever.		

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศใต้

รูปที่ 3 (Fig. 3) และรูปที่ 4 (Fig. 4) แสดงผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศใต้ โดยค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีของรูปแบบที่ทดสอบส่วนใหญ่เกินมาตรฐาน 500 ลักซ์ ยกเว้นรูปแบบที่ 6 โดยรูปแบบที่ก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุดคือรูปแบบที่ 4 (1116.83 ลักซ์) และต่ำที่สุดคือรูปแบบที่ 6 (434.62 ลักซ์) เมื่อพิจารณาค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสำหรับทิศใต้พบว่า รูปแบบที่ดีที่สุดเป็นรูปแบบที่ 4 โดยมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด (0.362)

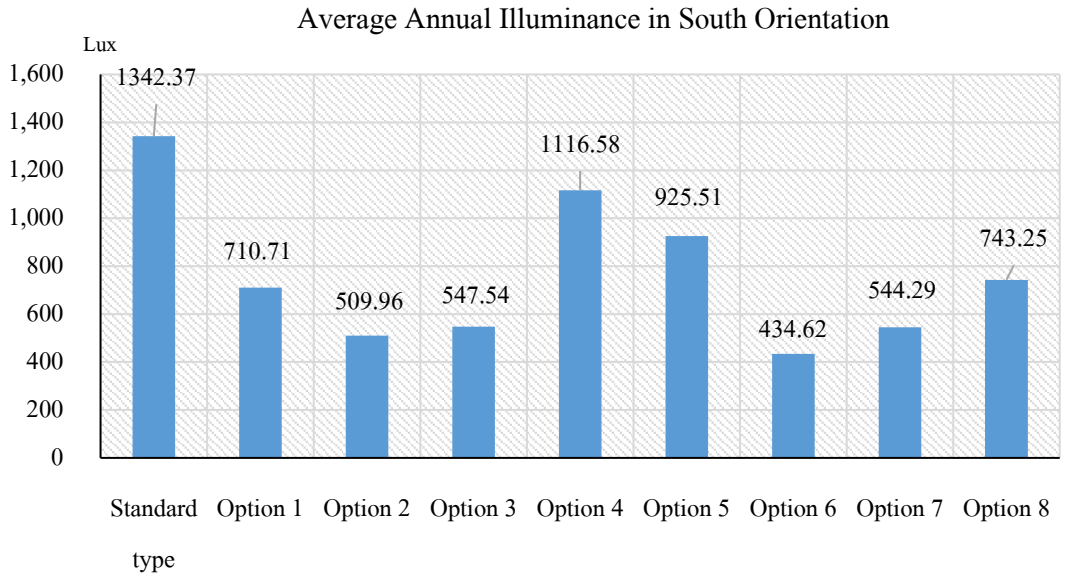


Fig. 3 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in south orientation

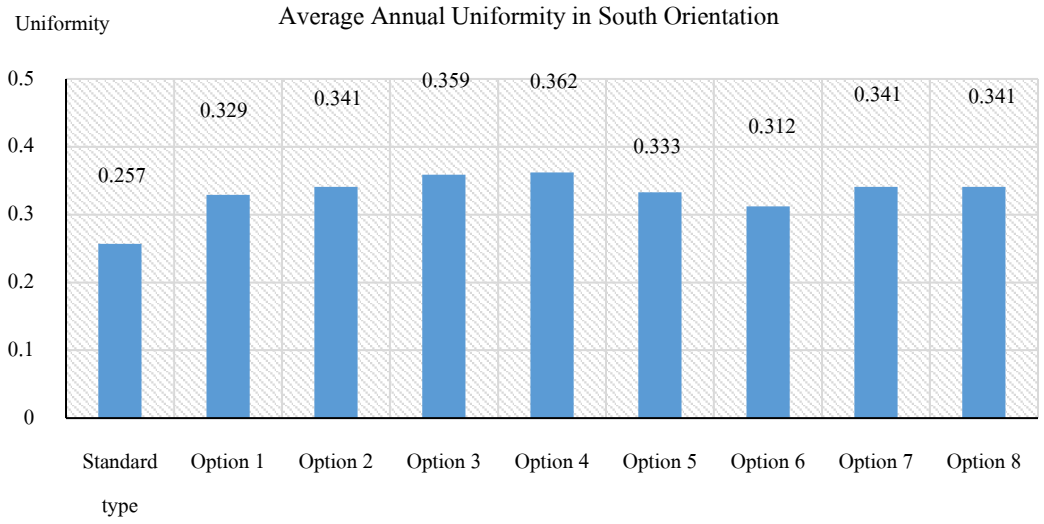


Fig. 4 Average annual uniformity of curved light shelves options in south orientation

ผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศเหนือ

รูปที่ 5 (Fig. 4) และรูปที่ 6 (Fig. 6) แสดงผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศเหนือ ผลการศึกษาพบว่า ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีของรูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่ 5 เกินมาตรฐาน 500 ลักซ์ โดยรูปแบบที่ก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุดคือรูปแบบที่ 5 (534.04 ลักซ์) และต่ำที่สุดคือรูปแบบที่ 6 (264.46 ลักซ์) เมื่อพิจารณาค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสำหรับทิศเหนือพบว่ารูปแบบที่ดีที่สุดเป็นรูปแบบที่ 4 โดยมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด (0.394)

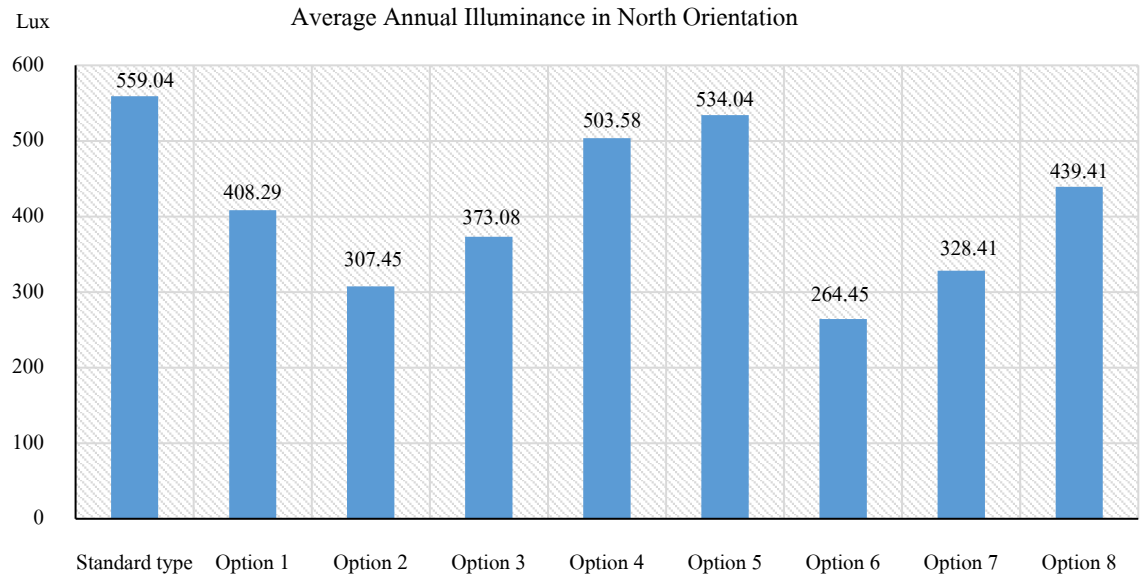


Fig. 5 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in north orientation

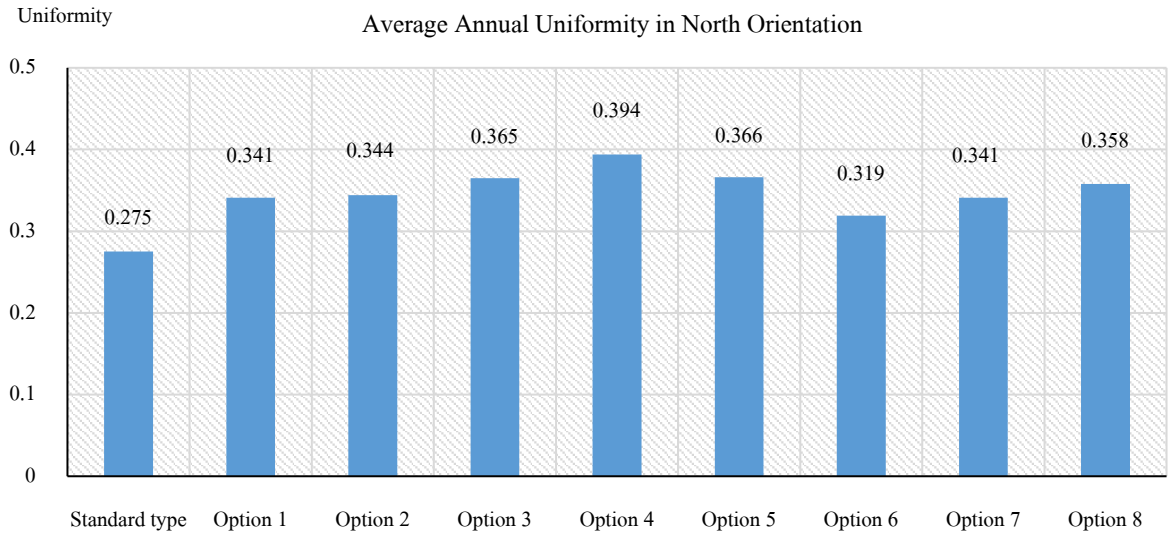


Fig. 6 Average annual uniformity of curved light shelves options in north orientation

ผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศตะวันออก

รูปที่ 7 (Fig. 7) และรูปที่ 8 (Fig. 8) แสดงผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศตะวันออก ผลการศึกษาพบว่า ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีของทุกรูปแบบที่ทดสอบเกินมาตรฐาน 500 ลักซ์โดยรูปแบบที่ก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุดคือรูปแบบที่ 5 (1,540.08 ลักซ์) และต่ำที่สุดคือรูปแบบที่ 6 (683.66 ลักซ์) เมื่อพิจารณาค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสำหรับทิศตะวันออก พบว่ารูปแบบที่ดีที่สุดเป็นรูปแบบที่ 4 โดยมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด (0.347)

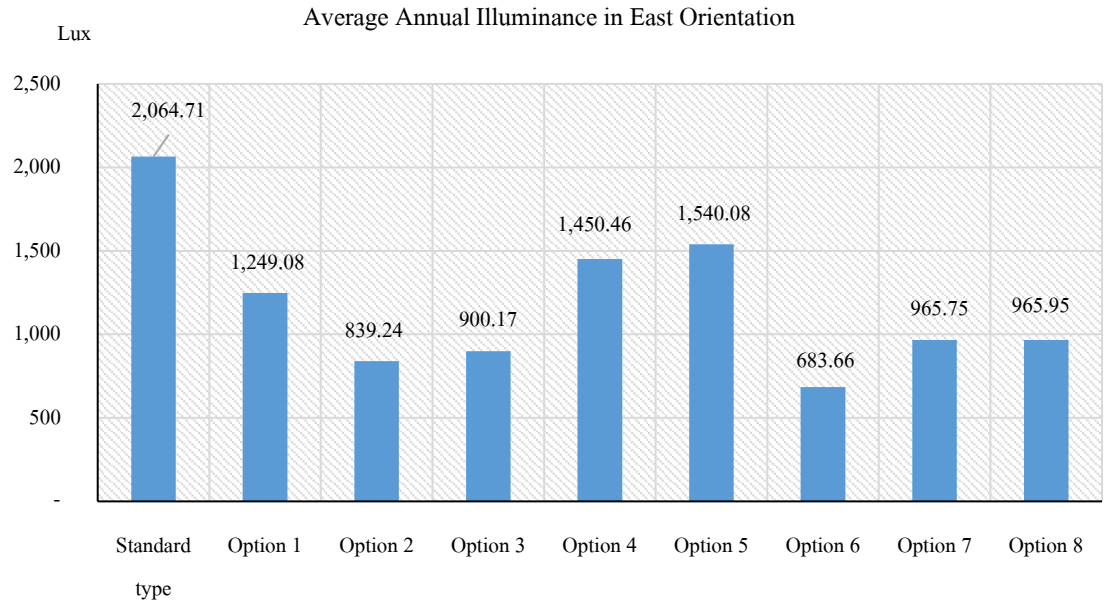


Fig. 7 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in east orientation

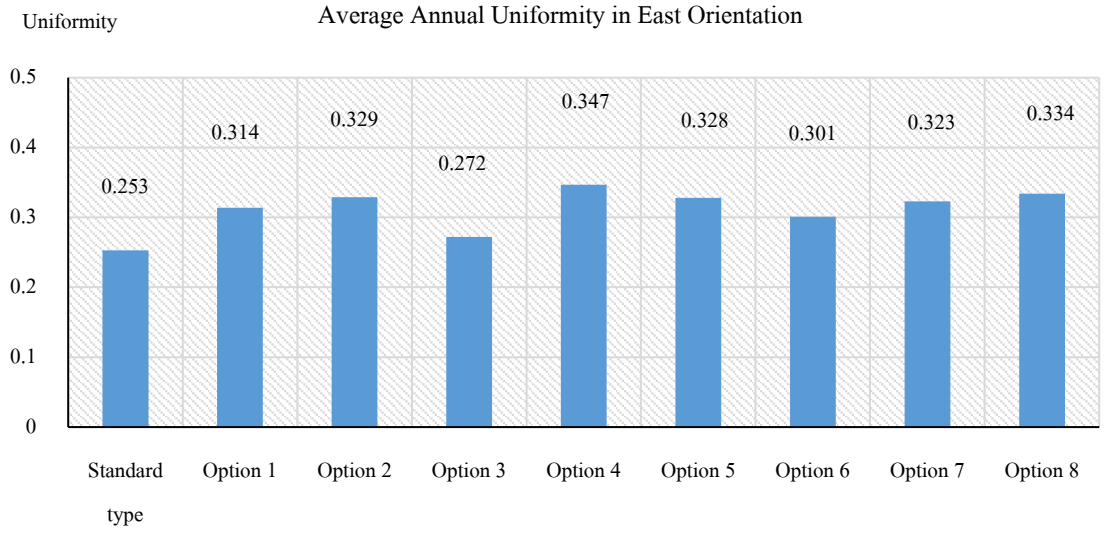


Fig. 8 Average annual uniformity of curved light shelves options in east orientation

ผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศตะวันตก

รูปที่ 9 (Fig. 9) และรูปที่ 10 (Fig. 10) แสดงผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีและค่าความสม่ำเสมอของแสงทั้งปีสำหรับทิศตะวันตก ผลการศึกษาพบว่า ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีของทุกรูปแบบที่ทดสอบเกินมาตรฐาน 500 ลักซ์โดยรูปแบบที่ก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุดคือรูปแบบที่ 5 (1,444.67 ลักซ์) และต่ำที่สุดคือรูปแบบที่ 6 (601.39 ลักซ์) เมื่อพิจารณาค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสำหรับทิศตะวันตกพบว่ารูปแบบที่ดีที่สุดเป็นรูปแบบที่ 3 โดยมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด (0.349)

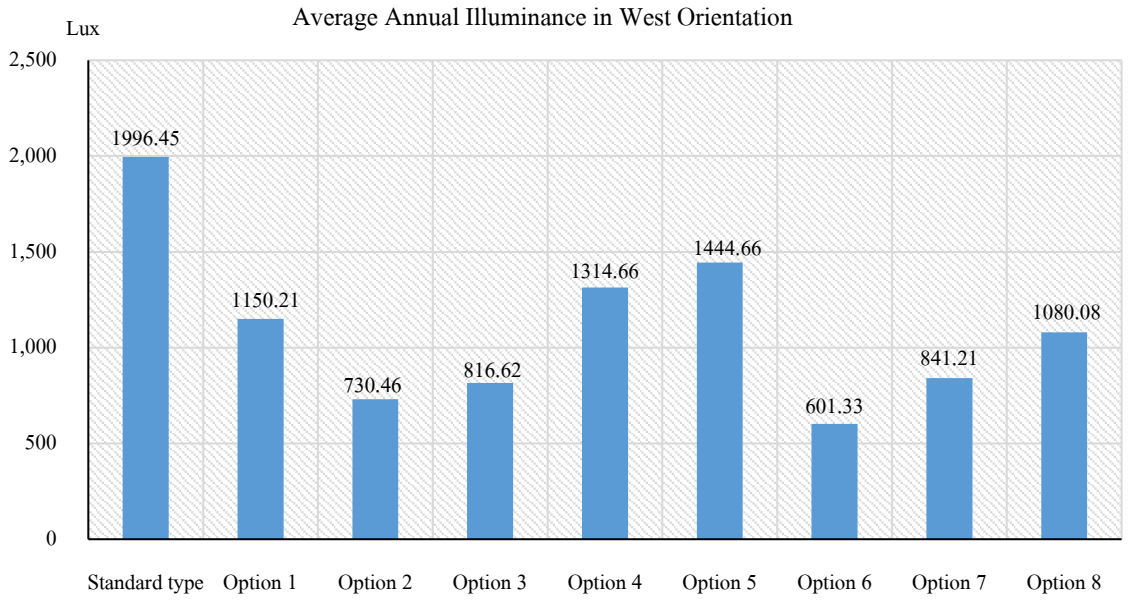


Fig. 9 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in west orientation

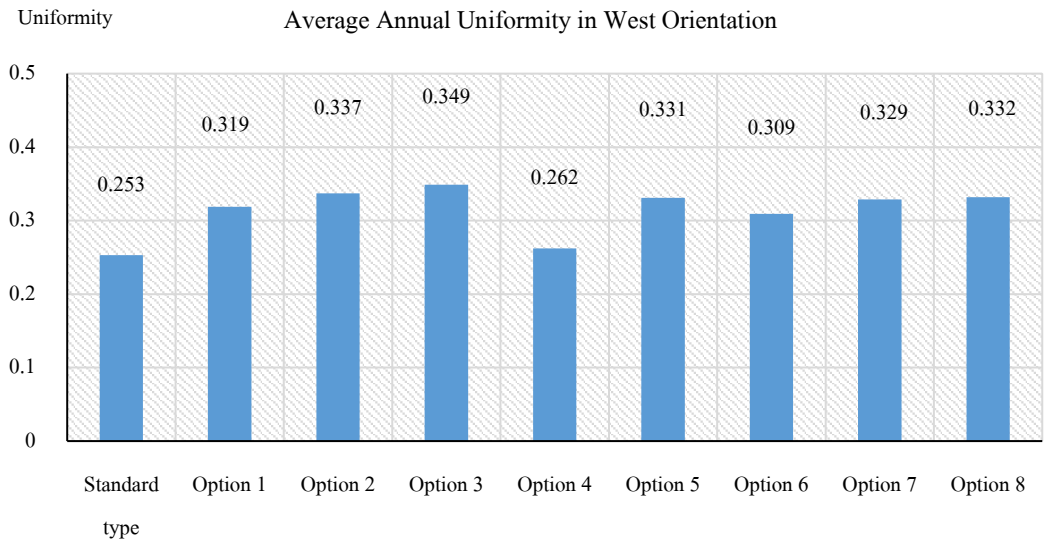


Fig. 10 Average annual uniformity of curved light shelves options in west orientation

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหิ้งสะท้อนแสงโค้งต่อปริมาณแสงธรรมชาติในร้านขายยา ในส่วนรูปแบบมาตรฐานนั้น (ไม่มีการติดตั้งหิ้งสะท้อนแสง) ค่าความส่องสว่างมีค่าเกินค่ามาตฐานวิจัยที่ 500 ลักซ์ทั้งหมด แต่ส่วนค่าความสม่ำเสมอภาพรวมยังไม่ดีเท่าการมีหิ้งแสง และเมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหิ้งสะท้อนแสงทั้งหมด 8 รูปแบบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าค่าของการส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีจากรูปแบบเกือบทุกรูปแบบที่ทำการทดสอบมีค่าสูงกว่า 500 ลักซ์ โดยทิศเหนือ ทิศใต้ และทิศตะวันออก รูปแบบหิ้งแสงโค้งที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้กับร้านขายยาคือหิ้งแสงโค้งภายนอกมุมขึ้น 30^{o} ภายในมุม 0^{o} (รูปแบบที่ 4) โดยทิศตะวันตกรูปแบบหิ้งแสงโค้งที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้กับร้านขายยาคือโค้งภายนอกมุม 0^{o} ภายในมุมขึ้น 30^{o} (รูปแบบที่ 3)

อย่างไรก็ตามการวิจัยในครั้งนี้ที่ยังมีข้อจำกัดด้านเวลา เนื่องจากได้มีการเก็บข้อมูลเฉพาะเวลาในช่วง 08.00–16.00น. ในสภาพท้องฟ้าโปร่ง เท่านั้น โดยการศึกษาในครั้งถัดไปควรมีการเก็บในสภาพท้องฟ้าในรูปแบบอื่นๆ ด้วย เช่น ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน หรือท้องฟ้าแบบมีเมฆมาก เพื่อให้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้รูปแบบหิ้งแสงโค้งสามารถมีได้อีกมากมายหลายรูปแบบ โดยอาจมีการเพิ่มเติมแบบชิ้นโค้งหลายชิ้น แบบต่อเนื่องหรือโค้งซ้อนกันในแนวตั้ง เพื่อให้ได้รูปแบบที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาและคณาจารย์ MBIT ทุกท่าน ผู้ที่ให้คำปรึกษาและส่งมอบความรู้ประสบการณ์ต่างๆ ตั้งแต่เริ่มโครงการ

ขอบคุณบริษัทรีเทลบิซิเนสซ์โซลูชั่นส์ จำกัด ที่มอบทุนการศึกษาต่อในครั้งนี้ 50% และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ๆ และ ครอบครัวอัจฉริยนนท์ ทุกคนรวมถึงผู้เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรธิชา อุ่นไพร และสุทัศน์ เยี่ยมวัฒนา. 2556. การประหยัดพลังงานในอาคาร โดยการสร้างสภาวะน่าสบายด้วยวิธีปรับเย็นแบบธรรมชาติ. วารสารวิชาการ ศิลปะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 3: 1–18.

บริรักษ์ อินทรกุลไชย. 2557. การปรับปรุงคุณภาพแสงธรรมชาติของห้องปฏิบัติการสถาปัตยกรรมภายในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ผังเมือง และนฤมิตศิลป์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง 10: 45–65.

ราตรี แก่นจันทร์. 2559. การพัฒนารูปแบบหิ้งแสงโค้งเพื่อการใช้แสงธรรมชาติสำหรับห้องเรียนในโรงเรียนอนุบาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุธิวัตร ประกอบธรรม. 2559. การพัฒนาเทคนิคการใช้แสงธรรมชาติเพื่อการมองเห็นที่เหมาะสมสำหรับห้องพักผู้ป่วยผู้สูงอายุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ. 2554. การจำลองแสงธรรมชาติในการออกแบบสถาปัตยกรรมโดยใช้ DIALux. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

CIE. 2011.EN 12464-1:2011: Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places, CIE.

Sok, T. 2019. The Effect of multiple curved light shelves on daylighting in university classrooms. In: Proceeding of The 57th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok, Thailand, pp. 497–506.

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสีของแสงและสีของพื้นผิวห้องต่อการตอบสนองทางอารมณ์: กรณีศึกษาห้องประเสริฐ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The study of the effect of colour temperature and surface colour of classroom on emotional response: a case study of prasert room, faculty of Architecture, Kasetsart University

เมย์สิฏา ใจเที่ยง*, นวลวรรณ ทวยเจริญ

Maysita Jaithieng*, Nuanwan Tuaycharoen

ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: maysita.ja@ku.th

บทคัดย่อ

สีมีอิทธิพลต่อความคิด ทัศนคติ ความรู้สึกและอารมณ์ของผู้เรียน ซึ่งจะส่งผลให้มีศักยภาพในการเรียนที่ดีขึ้นได้ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสีของแสงและสีของพื้นผิวห้องต่อการตอบสนองทางอารมณ์ในห้องเรียน โดยกรณีศึกษา คือ ห้องประเสริฐ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การศึกษาได้ทำการทดลองในห้องทดลองมืด ณ ชั้น 6 ของคณะดังกล่าว โดยมีการฉายโปรเจคเตอร์ภาพของห้องเรียนในรูปแบบต่างๆ และให้นิสิตระดับปริญญาตรีจำนวน 30 คนทำการประเมินการตอบสนองทางอารมณ์จากภาพโดยใช้แบบประเมิน PAD Emotion ผลการศึกษาพบว่า โดยภาพรวมสีของพื้นผิวห้องนั้นมีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางอารมณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสีของพื้นผิวห้องที่ก่อให้เกิดการตอบสนองทางอารมณ์สูงที่สุด คือ สีโทนเย็น อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิสีของแสงไม่มีผลต่อการตอบสนองทางอารมณ์ของผู้เรียน และไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสีของพื้นผิวห้องและอุณหภูมิสีของแสง

คำสำคัญ: การตอบสนองทางอารมณ์, สีของพื้นผิวห้อง, ห้องเรียน, อุณหภูมิสีของแสง

Abstract

Colour has an influence on thoughts and attitudes, feelings and emotions in the classroom, which could influence better learning performance. This study aimed to explore the effect of the color temperature of light and surface color in a classroom on the emotional response of students. Prasert room at Faculty of Architecture, Kasetsart University, has used as a case study. The study was carried out in a completely dark laboratory room on the 6th floor of the Faculty. Different classroom images were projected by a projector and thirty bachelor students evaluated their emotional responses using the PAD Emotion method. The results suggested that, overall, the surface color of the classroom has a significant influence on student's emotional responses. The cooled color surface of the classroom can make the highest emotional response of students. The study suggested that color temperature does not affect student emotional response. And, there was no interaction effect between surface classroom color and color temperature of light.

Keywords: classroom, colour temperature, emotional response, room surface color

คำนำ

สีมีอิทธิพลต่อความความคิด ทัศนคติ ทั้งในห้วงจิตสำนึกและจิตใต้สำนึกการใช้สื่ออย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องเข้าใจถึงผลกระทบทางจิตวิทยาที่ว่า สีสามารถเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตเราในด้านจิตใจ การตัดสินใจ ไม่ว่าเราจะเลือกเครื่องแต่งกาย เครื่องประดับและจัดสภาพแวดล้อม หากเราเข้าใจถึงเรื่องนี้จะสามารถใช้สีมาช่วยให้ดำเนินชีวิตเป็นไปอย่างมีความสุข การศึกษาเพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเรียน เช่น การส่องสว่างที่ดีเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้เรียน จะทำให้ศักยภาพในการมองเห็นของผู้เรียนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาแนวทางในการออกแบบแสงสว่างเพื่อให้ได้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเรียน ซึ่งในปัจจุบันก็ได้มีองค์การต่าง ๆ และหลายงานวิจัย ได้กำหนดเกณฑ์คุณภาพการส่องสว่างและปัจจัยสำคัญ ได้แก่ ค่าความส่องสว่าง สีของแสง และสีของสภาพแวดล้อม (Huchendorf, 2007; Kurt and Osueke, 2014) ปริมาณแสงที่เหมาะสมจะเป็นการช่วยลดการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้เรียน แต่หากไม่เหมาะสมจะทำให้ความสามารถในการมองเสื่อมลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการเรียนลดลงได้ (Boyce, 2003) นอกจากนี้การเลือกใช้สีควรไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อการรบกวนสายตาและช่วยให้เกิดความผ่อนคลายต่อผู้เรียนเช่นกัน (Huchendorf, 2007; Kurt and Osueke, 2014) หลายการศึกษาชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความใส่ใจในการเรียนและการตอบสนองทางอารมณ์ โดยแสดงให้เห็นว่าอารมณ์เชิงบวกอารมณ์เชิงบวกทำให้ตั้งใจเรียนและคิดแก้ปัญหาได้ดี ในขณะที่บุคคลที่มีอารมณ์ทางลบมักไม่มีสมาธิในการนำเข้าข้อมูล จึงเรียนไม่เข้าใจและไม่สามารถข้อมูลระยะยาวออกมาใช้ได้ (Prinz, 2012) จากการรวบรวมเอกสารพบว่า จากการศึกษาที่ผ่ามาพบว่าแสงและสีเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางอารมณ์โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในต่างประเทศและในสภาพแวดล้อมอื่นๆ อาทิ ร้านค้า (พิรัญญา, 2562) ยังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของแสงและสีของห้องเรียนต่อการตอบสนองอารมณ์ในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเพื่อศึกษาอิทธิพลของแสงและสีของห้องเรียนต่อการตอบสนองทางอารมณ์โดยใช้กรณีศึกษาห้องเรียนประเสริฐ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยผลการศึกษาจะเป็นแนวทางให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบห้องเรียนให้มีความเหมาะสมต่อการตอบสนองทางอารมณ์ของผู้เรียนมากขึ้นและก่อให้เกิดความใส่ใจในการเรียนที่มากขึ้นเช่นกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

สภาพแวดล้อมในการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสีของแสงและสีของพื้นผิวห้องต่อการตอบสนองทางอารมณ์ การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาในห้องทดลองมืด โดยจำลองบรรยากาศเสมือนบรรยากาศจริงในห้องเรียน จึงได้เลือกทำการศึกษาห้องตัวอย่างที่ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อยู่บริเวณชั้น 6 หันหน้าไปทางทิศตะวันตก ลักษณะภายในห้องมีหน้าต่างจำนวน 3 บานซึ่งปิดทึบไว้ไม่ให้แสงธรรมชาติจากภายนอกเข้ามาภายในห้อง โดยมีการสร้างชุดทดลองขนาด 1.45 เมตร × 0.60 เมตร สูง 2.40 เมตร โดยประกอบด้วยโต๊ะ ไม่สะท้อนแสง มีความสูง 0.75 เมตรและเก้าอี้นั่งทำงานสำหรับผู้ทดสอบ มีความสูง 0.55 เมตร และผู้เข้าร่วมการทดลองนั่งห่างจากจอ 2.00 เมตร (วีรวรรณ, 2556) โดยติดตั้งโปรเจคเตอร์ด้านหลังของโต๊ะทดลองเพื่อใช้ในการฉายภาพที่ทดสอบบนจอบนผนังด้านหนึ่งของห้อง (Fig. 1)



Fig. 1 Experimental setting

ตัวแปรในการศึกษา

ตัวแปรต้นที่ 1 คือ อุณหภูมิสีของแสง (Correlated Color Temperature, CCT) ซึ่งประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ สีโทนอบอุ่น (2800 K) สีโทนขาว (4200 K) และสีโทนเย็น (6500 K) โดยสาเหตุในการเลือกระดับอุณหภูมิสีของแสงทั้งสามมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากเป็นอุณหภูมิสีของแสงที่ใช้ในการศึกษานั้นพบระดับความเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อการทำงาน (ณัฐรินทร์, 2556)

ตัวแปรต้นที่ 2 คือ สีของพื้นผิวห้อง (Room Colour) ได้เลือกทำการศึกษา 3 โทนสีซึ่งได้แก่ สีโทนอบอุ่น (สีส้มเข้ม โดยมีรหัสในระบบ RGB = 191, 98, 90) สีโทนเย็น (สีเขียวเข้ม โดยมีรหัสในระบบ RGB = 0, 51, 0) และสีโทนกลาง (เทาเข้ม โดยมีรหัสในระบบ RGB = 90, 91, 96) โดยสาเหตุในการเลือกกลุ่มสีโทนอบอุ่นและกลุ่มสีโทนเย็น พบว่าจากการศึกษางานวิจัยของต่างประเทศพบว่าสีส้ม (โทนอบอุ่น) ทำให้มีความรู้สึกกระตือรือร้น สีเขียวเข้ม (โทนเย็น) ให้ความรู้สึกผ่อนคลาย ช่วยลดความเมื่อยล้าทางสายตา และสีเทาเข้ม (สีโทนกลาง) เป็นสีที่เข้าได้กับทุกสี แต่ทำให้รู้สึกไม่สดชื่น (Kurt and Osueke, 2014) ดังนั้น ภาพที่ใช้ในการทดสอบจึงประกอบด้วยภาพดังต่อไปนี้ (Fig. 2)

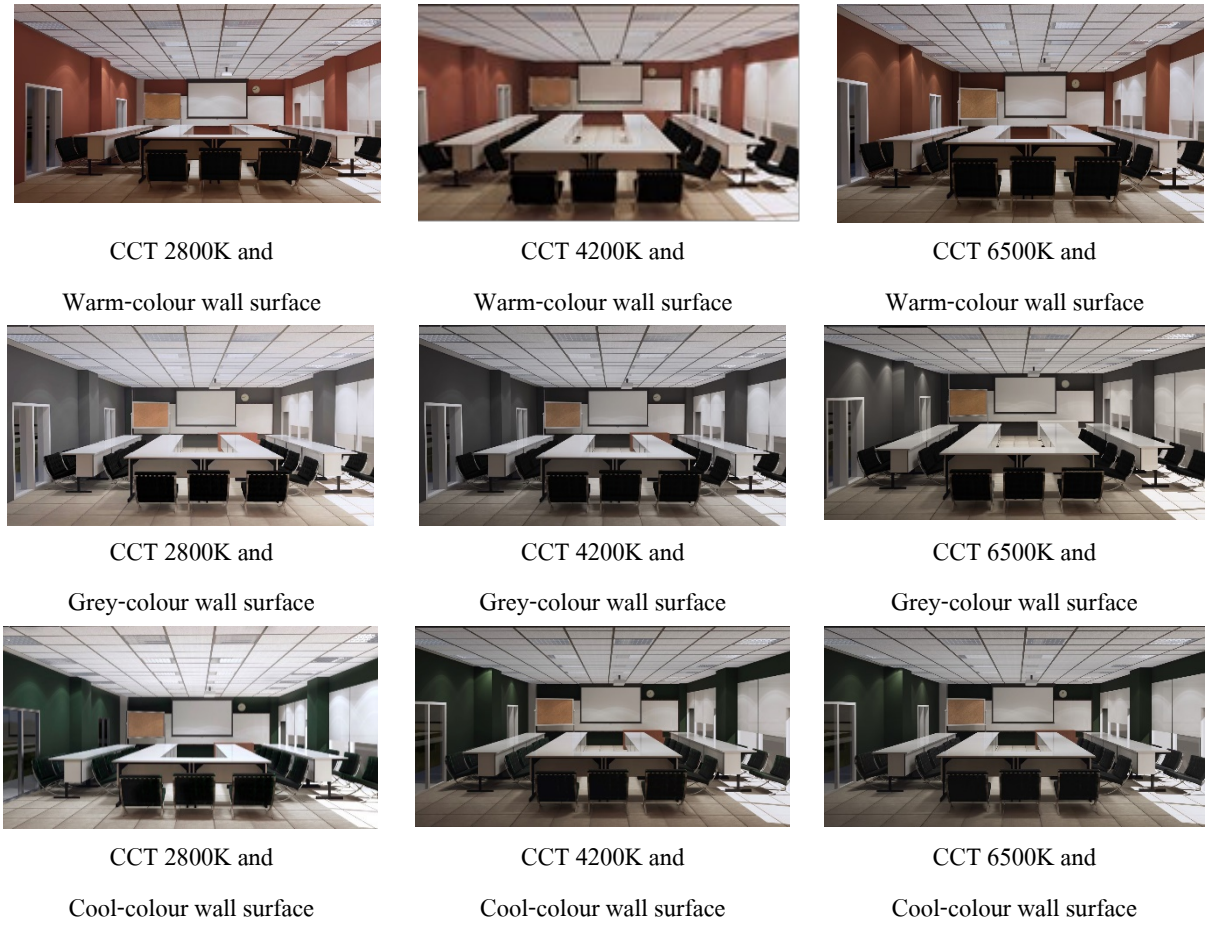


Fig. 2 Images used in this study

ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามในการศึกษานี้คือการตอบสนองอารมณ์ โดยอ้างอิงรูปแบบการตอบสนองทางอารมณ์ Pleasure Arousal Dominance (PAD Model) (Mehrabian and Russell, 1974) ซึ่งประกอบด้วยสภาพอารมณ์ 3 มิติ ได้แก่ มิติความพึงพอใจ (Pleasure) มิติความตื่นตัว (Arousal) และมิติความโดดเด่น (Dominance) โดยใช้วิธีการวัดระดับการตอบสนองอารมณ์จะใช้ตารางวัดระดับเจตคติของ Snider and Osgood (1969) ด้วยการ ใช้คำที่แตกต่างทางความหมาย (Semantic Differential) และเป็นคู่คำความหมายตรงข้าม (Bipolar Words) ในแบบสอบถาม จำนวน 6 คู่คำในแต่ละมิติ และเป็นการวัดโดยการให้คะแนน 7 ระดับ (-3 ถึง 3) เรียงจากน้อยไปมาก คือ 1 ถึง 3 และ -1 ถึง -3 ส่วน 0 คือ ไม่รู้สึกแตกต่าง แบบสอบถามที่ใช้มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้ (Fig. 3)

Table 1 PAD emotion scale

		1 2 3 4 5 6 7	
Pleasure	(P1) Dislike		Like
	(P2) Uninteresting		interesting
	(P3) Ugly		Beautiful
Arousal	(A1) stale		Alert
	(A2) Uncomfortable		Comfortable
	(A3) Dim		Light
Dominance	(D1) Old fashioned		Fashionable
	(D2) Common		Unique
	(D3) cheap		Expensive

ขั้นตอนในการทดลอง

การศึกษาได้ทดลองในกลุ่มตัวอย่างเป็นนิสิตในระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาที่มีอายุ 20–60ปี จำนวน 30 คน โดยจำนวนดังกล่าวได้ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับแสงสว่างในอดีต (Yamagishi, 2010)โดยแบ่งเป็นเพศชาย 15 คนและเพศหญิง 15 คน โดยเมื่อผู้เข้าร่วมการทดลองเข้ามาในห้องทดลองจะต้องปรับตาประมาณ 10 นาที ผู้วิจัยได้อธิบายขั้นตอนการทดลองพร้อมกับให้ผู้เข้าร่วมทดลองตอบแบบสอบถามในเรื่องของข้อมูลพื้นฐานเพื่อเป็นการทำให้ผู้เข้าร่วมการทดลองคุ้นเคยกับสภาพในการทดลอง หลังจากนั้นภาพต่างๆ จะถูกฉายภาพละ 3 วินาที และผู้เข้าร่วมทดลองต้องประเมิน PAD Emotion ดังกล่าวข้างต้น โดยลำดับภาพในการประเมินจะถูกสุ่มเพื่อเป็นการกำจัดอิทธิพลของการเรียนรู้และความเหนื่อยจากการทดลอง เมื่อผู้เข้าร่วมทดลองได้ประเมินจนครบทุกภาพแล้วนั้นจะมีการพักสายตา 2 นาที และผู้เข้าร่วมการทดลองคนถัดไปจึงเข้ามาทำการทดลองต่อในวิธีการเดียวกัน โดยวิธีการดังกล่าวได้ใช้ในการทดลองแสงและการส่องสว่างในอดีตในหลายๆ การศึกษา (Tuaycharoen and Tregenza, 2005) หลังจากได้ข้อมูลจะมีการวิเคราะห์โดยใช้สถิติ Repeated-measure Two-way ANOVA

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

Table 1 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของการตอบสนองทางอารมณ์ภาพรวมที่มีสีของพื้นผิวห้องและอุณหภูมิสีของแสงที่แตกต่างกันในห้องเรียน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสีของพื้นผิวห้องโทนเย็น (สีเขียวเข้ม) ก่อให้เกิดค่าการตอบสนองทางอารมณ์สูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย = 4.988 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.402 รองลงมาคือ สีของพื้นผิวห้องโทนอบอุ่น โดยมีค่าเฉลี่ย = 4.777 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.478 และสีของพื้นผิวห้องโทนกลาง (สีเทาเข้ม) โดยมีค่าเฉลี่ย = 4.658 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.461 นอกจากนี้ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าสีของแสงโทนโทนเย็น (6500 K) ก่อให้เกิดการตอบสนองทางอารมณ์ในห้องเรียนสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย = 4.846 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.450 รองลงมาคือสีของแสงโทนอบอุ่น (สีส้มเข้ม) โดยมีค่าเฉลี่ย = 4.843 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.405 และสีของแสงโทนกลาง โดยมีค่าเฉลี่ย = 4.733 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.501

Table 2 Mean and standard deviation of emotional response for different surface colours and light colours in the classroom

Surface colour	Light colour (CCT)	Mean	Standard deviation
Warm	Warm (2800 K)	4.793	1.493
	White (4000 K)	4.719	1.504
	Cool (6500 K)	4.819	1.437
	Total	4.777	1.478
Grey	Warm (2800 K)	4.789	1.418
	White (4000 K)	4.456	1.470
	Cool (6500 K)	4.730	1.478
	Total	4.658	1.461
Cool	Warm (2800 K)	4.948	1.296
	White (4000 K)	5.026	1.480
	Cool (6500 K)	4.989	1.429
	Total	4.988	1.402
Total	Warm (2800 K)	4.843	1.405
	White (4000 K)	4.733	1.501
	Cool (6500 K)	4.846	1.450
	Total	4.807	1.453

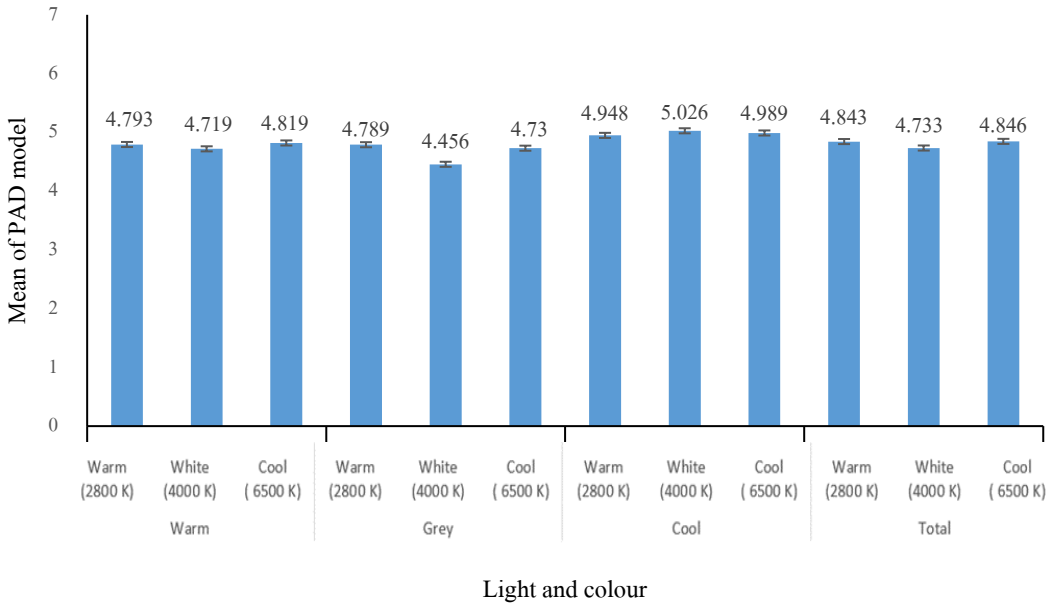


Fig. 4 Mean of emotional response for different surface colours and light colours in the classroom

Table 3 แสดงผลกระทบของสีของพื้นผิวห้องและสีของแสงของห้องเรียนต่อการตอบสนองทางอารมณ์ โดย Two-way ANOVA ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าโดยภาพรวมสีของพื้นผิวห้องนั้นมีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางอารมณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสีของพื้นผิวห้องที่ก่อให้เกิดการตอบสนองทางอารมณ์สูงที่สุด คือ สีโทนเย็น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสีของแสงไม่มีผลต่อการตอบสนองทางอารมณ์ของผู้เรียน และไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสีของพื้นผิวห้องและอุณหภูมิสีของแสง

Table 3 Effects of surface colour and light colour of classroom on the emotional response by Two-way ANOVA

Factor	F	*p*-value
Surface colour	7.124	0.048*
Light colour (CCT)	1.052	0.459
Surface colour* Light colour (CCT)	1.516	0.195

* Significant at 0.05; ** Highly significant at 0.01

สรุป

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสีของแสงและสีของพื้นผิวห้องต่อการตอบสนองทางอารมณ์ในห้องเรียน โดยกรณีศึกษา คือ ห้องประเสริฐ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า โดยภาพรวมสีของพื้นผิวห้องเรียนมีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางอารมณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสีของพื้นผิวห้องที่ก่อให้เกิดการตอบสนองทางอารมณ์สูงที่สุด คือ สีโทนเย็น (สีเขียวเข้ม) อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิสีของแสงไม่มีผลต่อการตอบสนองทางอารมณ์ของผู้เรียนอย่างมีนัยสำคัญสถิติ และสีของพื้นผิวห้องและอุณหภูมิสีของแสงไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการตอบสนองทางอารมณ์มีความสัมพันธ์ต่อความสนใจ (Prinz, 2012) ผนังห้องเรียนสีโทนเย็นหรือสีเขียวเข้มในการศึกษาครั้งนี้ก่อให้เกิดการตอบสนองทางอารมณ์ที่สูง ซึ่งน่าจะมีผลต่อความสนใจที่เพิ่มขึ้นของนักเรียนเช่นกัน ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Duyan and Unver (2016) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของสีของผนังห้องเรียนต่อความสนใจ สีของพื้นผิวห้องที่ช่วยกระตุ้นค่าความสนใจที่มีคะแนนสูงคือสีเขียว ในขณะสีเหลือง และสีแดงก่อให้เกิดค่าความสมใจของนักเรียนที่น้อยกว่า

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาในกลุ่มผู้ใช้ในห้องเรียนเฉพาะกลุ่ม ซึ่งเป็นนิสิตในระดับปริญญาตรีซึ่งกำลังศึกษาทางด้านสถาปัตยกรรม ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการศึกษาในนักเรียนในกลุ่มอื่นหรือช่วงอายุอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น และเนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ศึกษาสีของพื้นผิวห้องและสีของแสงเฉพาะบางระดับ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมระดับอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลที่ครอบคลุมมากขึ้นเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาและคณาจารย์ MBIT ทุกท่าน ผู้ที่ให้คำปรึกษาและความรู้ประสบการณ์ต่างๆ ตั้งแต่เริ่มโครงการ และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และ ครอบครัวทุกคนรวมถึงผู้เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

ณัฐรินทร์ วิรัชสยางค์กุล. 2556. ผลกระทบของระดับความส่องสว่างและอุณหภูมิสีของแสงต่อประสิทธิภาพการเขียนและการพิมพ์ในสำนักงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.

พิรัญญา อิทธิสุริยะ. 2562. การตอบสนองทางอารมณ์ต่อสีภายในร้านค้าเสื้อผ้ากีฬา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรวรรณ สระสร้อยทอง. 2556. การศึกษาสภาพแวดล้อมภายในอาคารพักอาศัยเพื่อความพึงพอใจในการมองเห็นของผู้สูงอายุชาวญี่ปุ่นที่อาศัยอยู่ในประเทศไทย, การศึกษาค้นคว้าอิสระ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Duyan, F., Ünver, R. 2016. A research on the effect of classroom wall colours on student's attention. A|Z ITU J. Fac. Archit. 13: 73–78.

Huchendorf, L. 2007. The effects of color on memory. UW-L Journal of Undergraduate Research X. 1–4.

Kurt, S., Osueke, K.K. 2014. The effects of color on the moods of college students. SAGE Open 4: 1–12. doi: 10.13140/RG.2.1.4816.8082

Mehrabian, A., Russell, J.A. 1974. An approach to environmental psychology. The MIT Press, Cambridge, MA.

Prinz, J. 2012. The conscious brain. Oxford University Press, New York.

Snider, J.G., Osgood, C.E. 1969. Semantic Differential Technique: A Sourcebook. Aldine, Chicago.

Tuaycharoen, N., Tregenza, P.R. 2005. Discomfort glare from interesting images. Light. Res. Technol. 37: 329–338. doi.org/10.1191/1365782805li147oa

Yamagishi, M. 2008. Effects of LED lighting characteristics on visual performance of elderly people. Gerontechnology 7: 243.

The comparison of anidolic daylighting system characteristic between two transmission glazing of office building

Linza Ma*, Nuanwan Tuaycharoen
Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: linza.m@ku.th

Abstract

Anidolic Daylighting System (ADS) is well known as a technology to be used for transferring daylight entering deeper interior spaces at the same time improving daylight uniformity. This paper study seeks to determine models further and developed include six different design of the collector shape of the ADS and do the comparison of two glazing transmission (30% and 70%) under clear sky conditions, working hours, and south orientation, installed on 6mx5m, 4m height of an office room. The results suggested that all collectors distributed higher illuminance over the requirement (500lux) while the uniformity is not merely different therefore, the low cost of system installing will be the criteria to determine the best option. The results showed that option 4 with 10^0 inclined half-opened curved light shelf collectors and 30% glazing transmission is the best in terms of daylight performance in the office building in Thailand. The present article is significant for guiding to determine the best performance of the collector of ADS to help the designers and architects make a better decision.
Keywords: Anidolic Daylight System, ADS, Daylight, Natural Light, Office Building.

Introduction

Daylight in the office building is found to be a very important source to provides a good lighting atmosphere. It has a contribution to increasing workers' performance, encourages proper attendance, reduced absenteeism, and offers a high possibility in the reduction of electrical lighting energy. In an office building, the electricity demand is consuming approximately 40% toward artificial lighting, so preparing available daylight not only a critical step towards energy efficiency which offers a high possibility in the reduction of electrical lighting energy but also to enhance the occupants' performance and well-being (Roshan et al, 2013, 2014) and (Linhart et al., 2010). Hence, using daylight in a building is essentials and seems to be an excellent strategy to encourage sustainable living environments (Roshan, 2014). Furthermore, in the earliest of building design, lighting is one condition taken into consideration to create the quality of life because of visual perception and lifestyle of people that influenced by daylight which in turn affects their behavior, working pattern, emotion, and so on. Due to daylight that reached into the interior through windows gives much higher illuminance to the eye than artificial lighting. Therefore, working long-term in electric lighting is believed to be very harmful to health, working by daylight is result in less stress and less discomfort. ADS is one of the daylight methods that were developed from non-image optics which were invented in the United State in the 1930s by a lighting company (Roshan & Barau, 2016). There are two required tasks for the daylight system, the system must collect the sunlight and distribute it through the spaces. However, there is little study of ADS in Thailand. In 2018, Munsub has conducted on the angle of the collector and ceiling diffusor in an office room. After that, Bormey (2019), have been investigated the ceiling duct as well as the effect of the glazing transmission. According to both studies, there is no study of multiple collector design shapes for daylight performance yet. Thus this research paper will investigate further from Bormey's work by taking his best result to do a further simulation. The goal was to explore more about the type of collector characteristics of ADS components and do the comparison between two transmission glazing (30% and 70%) of office rooms in Thailand.

Materials and Methods

Characteristic of office room and ADS system

The model will be taking from Bormey's work (2019) best model option then do further work by developing six more different types of collectors with an additional variable area of light reflecting coating and installation at the South to meet up the standard requirement for the office room. According to, CIBSE and IESNA standard, the light recommendation for an office room is 500 lux. The office room characteristics are represented as a typical office room in Thailand. According to Ossen et al. (2005), the maximum window area was assumed as 50% of the external area between the floor and ceiling height. Following Neufert and Neufert (2012), for office window would be designed in the shape of horizontal, lower for getting a view, and the upper window for bringing the light deep into the room. The room parameters and ADS parameters are set as shown in Table 1.

Table 1 Configuration and material of room and ADS system in this study

Room geometry	Width Length Height	5m 6m 4m
Window geometry	Length Height	5.6m 2m
Room reflectivity	Wall Floor Celling	60% 30% 80%
ADS collector geometry	Width Length Height	1m 6m 1m
Reflective coating geometry	Length Height	6m 0.8m

Independent variable

There are two variables involved in this research study. The first is the collector characteristic of ADS (six options) and the second is glazing transmission of the office room (30% and 70%). The reason for choosing 30% glazing transmission due to it is the lowest transmission of the tinted glass used in the office building. And 70% was the normal transmission of the tinted glass used in the office building. In total, there are twelve combinations of options to study, excluding the existing model. All the model consists of 4 diffuse panels with light duct 15º, the panel of the reflection coating installed inside the upper window and installed the collector outside the upper window (Kontadakis et al., 2017). The differences are the shape and angle of the collector.

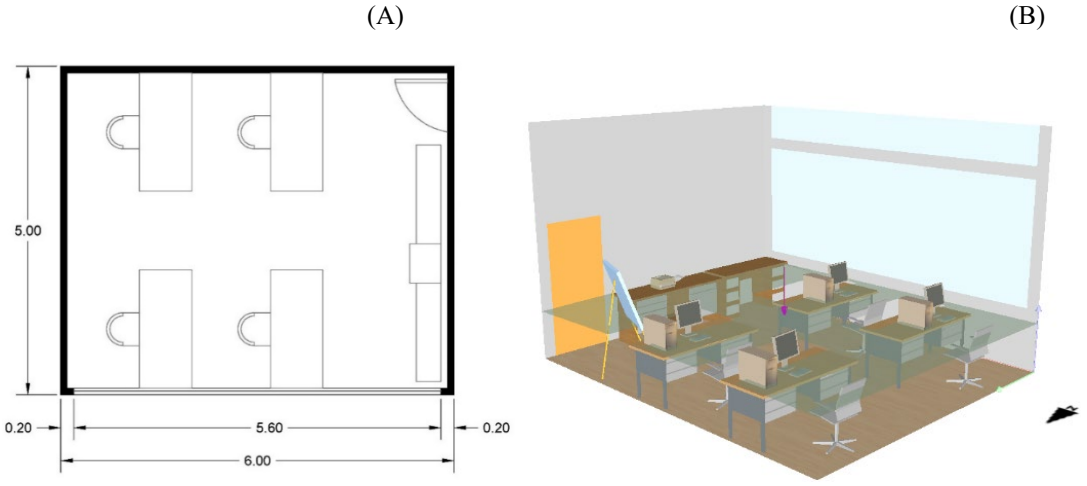


Fig. 1 Layout plan of the investigated office room (A) and the office room in DIAlux 4.13 (B)

Table 2 Model options to be investigated

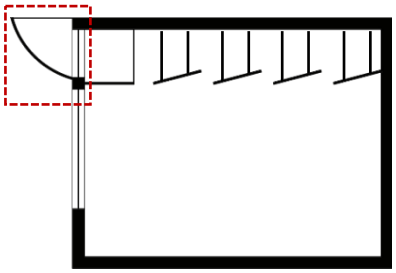
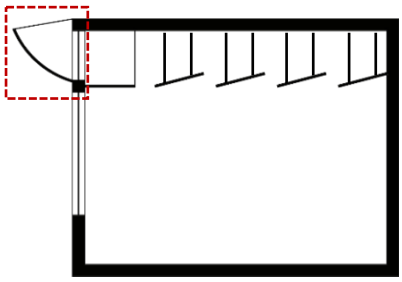
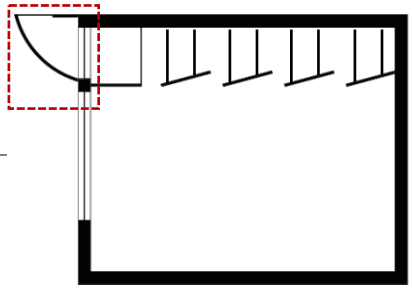
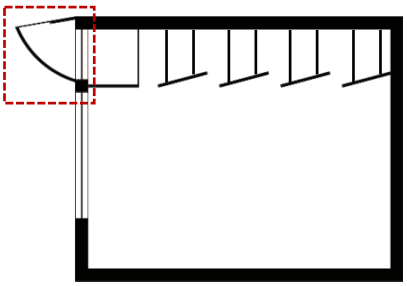
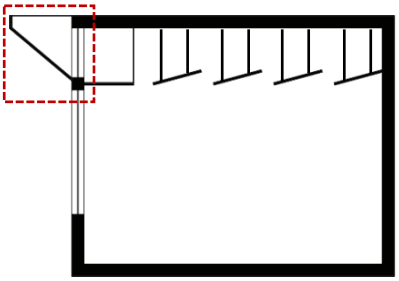
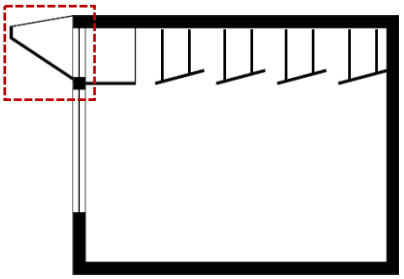
Options	Glazing transmission	Section drawing
Existing office room	30% glazing transmission 70% glazing transmission	
1st Model: The curve light shape of the collector outside the upper window with 0º.	30% glazing transmission 70% glazing transmission	
2nd Model: The curve light shape of the collector 10º inclined.	30% glazing transmission 70% glazing transmission	
3rd Model: Half-open collector of the curve light shape.	30% glazing transmission 70% glazing transmission	
4th Model: 10º inclined of the half-open of curve light shape of the collector.	30% glazing transmission 70% glazing transmission	

Table 2 (continued).

Options	Glazing transmission	Section drawing
5th Model: A rectangle light shape of the collector.	30% glazing transmission	
	70% glazing transmission	
6th Model: 10° inclined of rectangle light shape of the collector.	30% glazing transmission	
	70% glazing transmission	

Dependent variable

There are two dependent variables for this study. The first one is the illuminance level and the second is the uniformity level. This study was carried out using the computer simulation technique called DIALux 4.13 since this software has been widely used around the world and helpful with the design of the lighting plan. Besides, the study was conducted during the working hour from 8:00 till 16:00. These times were selected according to the common public working hours in Thailand. Clear sky conditions were explored because this study focused on the performance of ADS to protect against direct sunlight. And, in this clear sky condition, the sun is visible and direct sunlight performance can be calculated inside the building (Kensek and Suk, 2011). The reason to choose the South orientation because, in the tropical region, the sun path would be mostly oriented on the south for several months throughout the year (Mangkuto et al., 2016). The simulation will be taking place on 3 different periods, equinox time (March 21st or Sep 21st), summer solstice (June 21st), and winter solstice (December 21st).

Results and Discussion

Result of average annual illuminance of 30% and 70% glazing transmission

The charts have conducted that among twelve options of ADS curved light shelf including the existing model demonstrated clearly that all the options have passed the illuminance standard requirement (500 lux). As Fig. 3 shows, ADS option 5 (70% transmission) is the highest illuminance value among all twelve options (2,063 lux). Along with Fig. 2, the ADS option 4 (30% transmission) is the lowest illuminance value among all twelve options (678 lux). According to the average annual illuminance, all the options can get

the average annual illuminance values above the standard level. Thus, the highest average annual uniformity will be the criteria to define the best model performance.

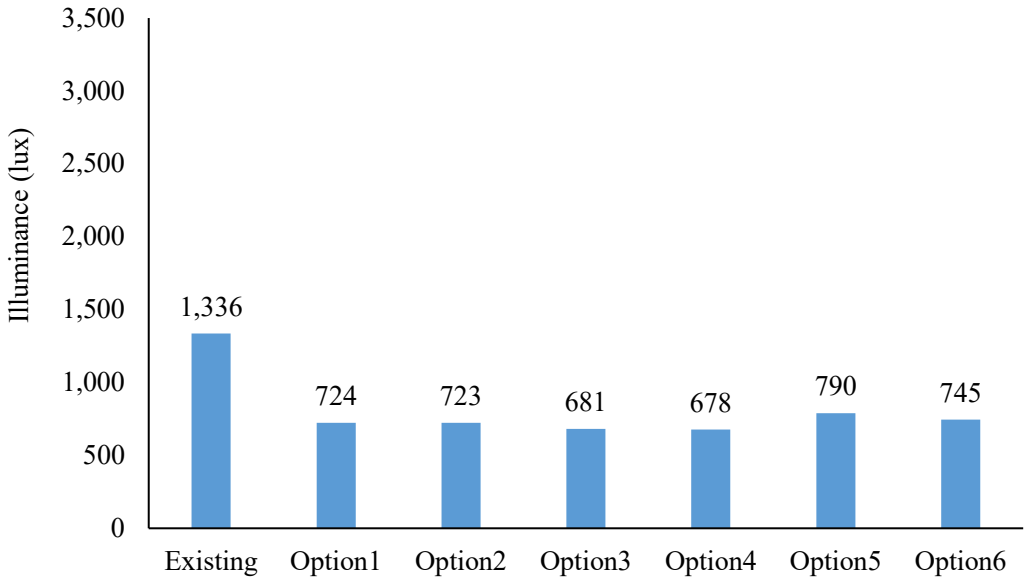


Fig. 2 Average annual illuminance (lux) of 30% glazing transmission

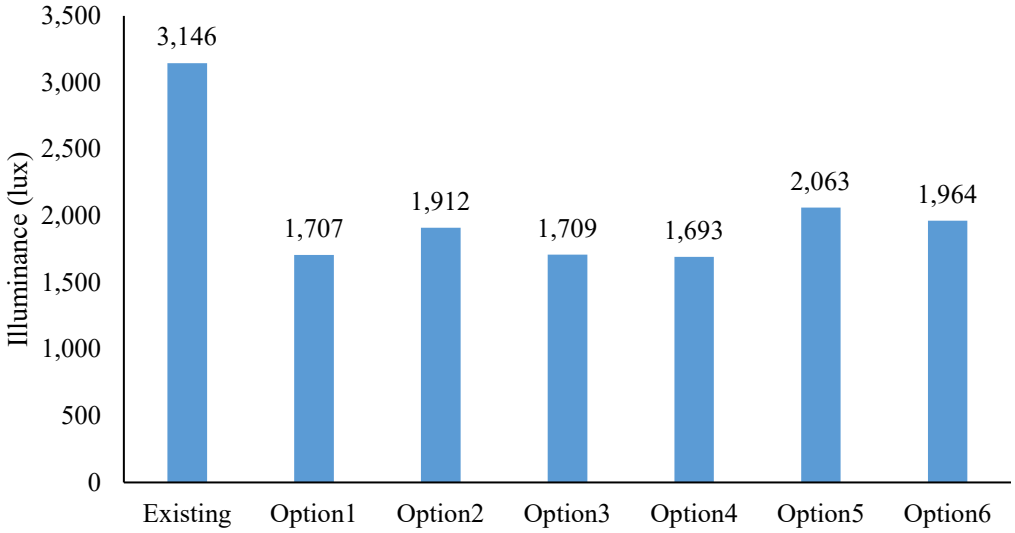


Fig. 3 Average annual illuminance (lux) of 70% glazing transmission

Result of average annual uniformity of 30% and 70% glazing transmission

The results have indicated that uniformity results of each model are quite equal if the results are shown in two number decimal, therefore, four number of decimal was using for these results to see whether which model option is the highest one. In Fig. 4 and Fig. 5, the chart showed that ADS option 4 (U=0.3399 for 30% glazing transmission) is the highest uniformity among the twelve options.

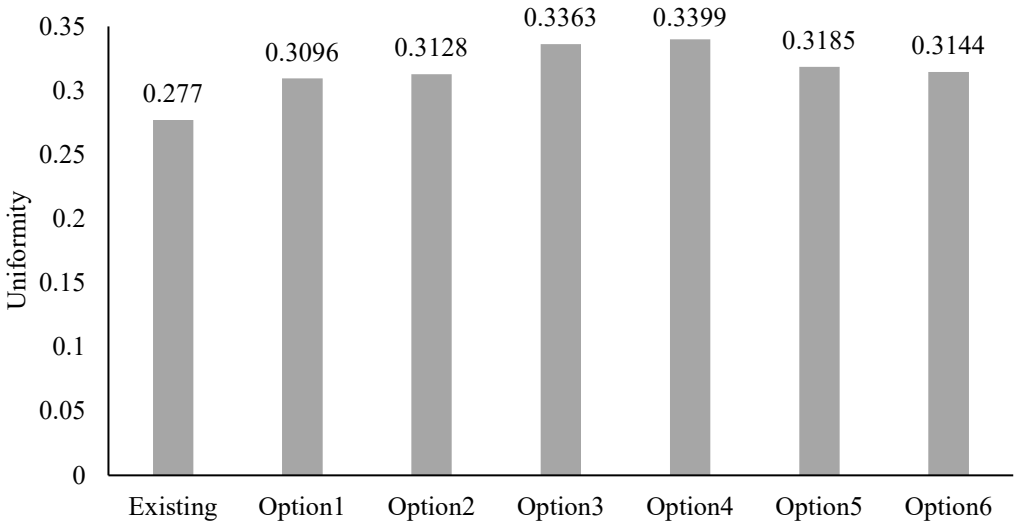


Fig. 4 Average annual uniformity of 30% glazing transmission

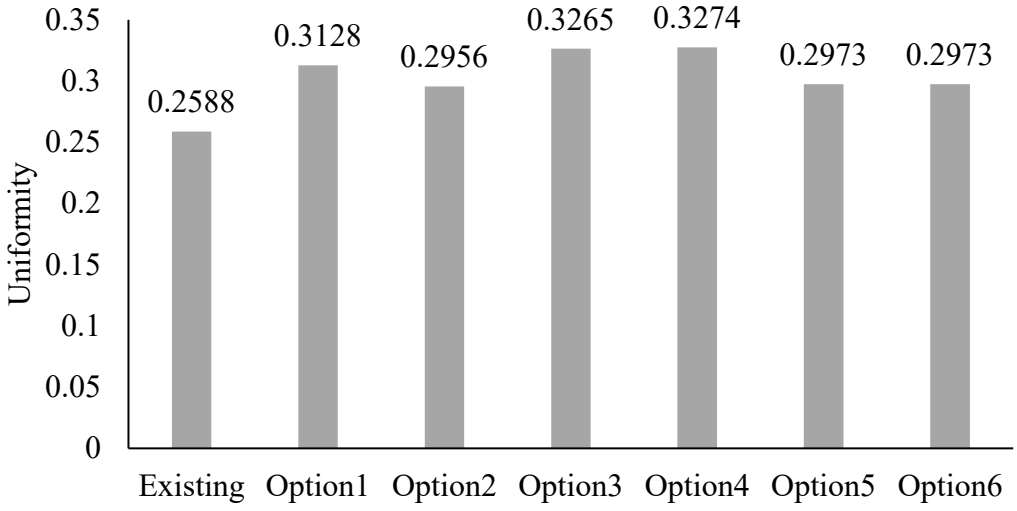


Fig. 5 Average annual uniformity of 70% glazing transmission

Since the results of uniformity are not merely different, the cost of system installing was used to select the best option. The ADS was constructed by the aluminum panel and temper glass for the collector, and smartboard for ceiling duct inside.

Table 3 Price of materials (OneStockHome)

Options	Materials	Area (sq.m)	ADS price (THB)	Glazing transmission Price (THB)	Total (THB)
ADS_Option1	30% glazing transmission				15,049
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.8	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12		775	
	70% glazing transmission				15,949
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.8	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12		850	
ADS_Option2	30% glazing transmission				14,960
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.2	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12.1		775	
	70% glazing transmission				16,034
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.2	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12.1		850	
ADS_Option3	30% glazing transmission				13,854
	Aluminum 1100-H14 2mm	10.2	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	9.6		775	
	70% glazing transmission				14,573
	Aluminum 1100-H14 2mm	10.2	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	9.6		850	
ADS_Option4	30% glazing transmission				13,676
	Aluminum 1100-H14 2mm	9	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	9.8		775	
	70% glazing transmission				14,411
	Aluminum 1100-H14 2mm	9	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	9.8		850	
ADS_Option5	30% glazing transmission				15,049
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.8	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12		775	

Table 3 (continued).

Options	Materials	Area (sq.m)	ADS price (THB)	Glazing transmission Price (THB)	Total (THB)
ADS_Option6	70% glazing transmission				15,949
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.8	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12		850	
	30% glazing transmission				15,204
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.8	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12.2		775	
	70% glazing transmission				16,119
	Aluminum 1100-H14 2mm	7.8	277		
	Smartboard 12mm	23	156		
	Tinted Glass CL 5mm	12.2		850	

According to the price of materials in Table 3 show that option 4 of 30% glazing transmission (13,676 THB) has the lowest price of installation compare to the other options.

This paper presents the daylight simulation models various of the collector shape of ADS and compared two glazing transmissions (30% and 70%) in terms of daylighting performance in the office room, Bangkok, Thailand. The results indicated that all the collector shape of ADS for both 30% and 70% glazing transmission of investigated office room can create average annual illuminance values above the standard requirement (500 lux). The results showed that option 4 with 10^0 inclined half-opened curved light shelf collectors of ADS with 30% glazing transmission is the best. This is because this option has the lowest installation cost. And due to the time limitation of this study, further work should be investigated in other orientations, other room geometries, and other sky conditions to obtain more comprehensive results.

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors are grateful thank for this opportunity and sponsorship received from the Faculty of Architecture, Kasetsart University.

References

Bormey, L. 2019. Effects of ceiling characteristic of anidolic daylight system on daylighting in office buildings in Thailand. M.Sc. thesis, Faculty of Architecture, Kasetsart University.

Kensek, K., Suk, J.Y. 2011. Daylight factor (overcast sky) versus daylight availability (clear sky) in computer-based daylighting simulations. Journal of Creative Sustainable Architecture & Built Environment 1: 3–14.

Linhart, F., Scartezzini, J.L. 2010. Minimizing lighting power density in office rooms equipped with anidolic daylighting systems. Solar Energy. 84: 587–595. doi.org/10.1016/j.solener.2009.05.001

Linhart, F., Wittkopf, S.K., Scartezzini, J.L. 2010. Performance of anidolic daylighting systems in tropical climates–parametric studies for identification of main influencing factors. Solar Energy. 84: 1085–1094. doi.org/10.1016/j.solener.2010.01.014

Mangkuto, R.A., Rohmah, M., Asri, A.D. 2016. Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. Applied Energy. 164: 211–219. doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.046

Munsub, J. 2018. Anidolic lighting system for efficient daylight in office buildings. M.Sc. thesis, Faculty of Architecture, Kasetsart University.

Neufert, E., Neufert, P. 2012. Architects' Data. 4th ed. John Wiley & Sons. West Sussex, UK.

Ossen, D.R., Hamdan Ahmad, M., Madros, N.H. 2005. Optimum overhang geometry for building energy saving in tropical climates. J. Asian Archit. Build. Eng. 4: 563–570. doi.org/10.3130/jaabe.4.563

Roshan, M., Kandar, M.Z., Mohammadi, M.P., Dodo, Y.A. 2013. Empirical validation of daylight simulation tool for a test office with anidolic daylighting system. JBASR 3: 104–112.

Roshan, M., Kandar, M.Z.B., Nikpur, M., Mohammadi, M.P., Ghasemi, M. 2013. Investigating the performance of anidolic daylighting system with respect to building orientation in tropical area. Eng. Sci. Technol.: Int. J. 3: 74–79

Roshan, M. 2014. Anidolic daylighting system for efficient daylighting in deep plan office building in the tropics. Ph.D.Sc. thesis, Faculty of Built Enviroment, Universiti Technologi, Malasia.

Roshan, M., Barau, A.S. 2016. Assessing anidolic daylighting system for efficient daylight in open plan office in the tropics. J. Build. Eng. 8: 58–69. doi.org/10.1016/j.jobe.2016.07.002

Scartezzini, J.L., Courret, G. 2002. Anidolic daylighting systems. Solar Energy. 73: 123–135. doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00040-3

Effect of inclination of multiple curved light shelves on daylighting in University classroom

Rado Sy*, Nuanwan Tuaycharoen
Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: rado.s@ku.th

Abstract

In educational spaces, daylighting has a significant impact on both student's and teacher's visual comfort, work tasks, academic performance, and productivity. Thus, a sufficient level of illuminance should be provided, especially in the classroom. A light shelf is known as one of the approaches to improve indoor daylight quality and at the same time offer shading. It can also redirect a huge amount of the incoming sunlight towards the ceiling, and enhance the light distribution uniformity in the occupied space. Therefore, the purpose of this research aims to promote daylight in the university classroom in Thailand by investigating the effect of the inclination of multiple curved light shelves on daylighting performance. To do so, different angles of external curved light shelves were simulated in a typical university classroom in four different orientations to find the best option for each direction. Results indicated that the double external curved light shelves with a 20^{o} angle upper and a 20^{o} angle lower were found as the best option in three orientations which are the north, the east, and the west. However, the optimum option for the south orientation was the external curved light shelves with a 40^{o} angle upper and a 20^{o} angle lower.

Keywords: Curved light shelves, Daylighting, Illuminance, Uniformity inclination, University classroom

Introduction

The light level has a huge influence on user performance in the space. Proper lighting is very essential since it can increase visibility and task activities. Many studies showed that the absence of daylight in the study room could have a major contribution to the worktables and productivity for both students and teachers (Abdelatia et al., 2010). Moreover, when the amount of light is too low or too high, it may cause eye discomfort (eyestrain), headache, and unable to concentrate on the works. Low uniformity also affects our perception of the environment and our ability to navigate it. As a matter, there are numerous methods to enhance the level of light and uniformity in a space. A light shelf is one of the approaches to solve this issue. It is known as a typical daylighting system that is used to reflect the direct sunlight into the interior space and provide better indoor lighting quality. It helps promote the illuminance and uniformity level especially in non-daylight areas. The light shelf is often placed above the eye level to prevent glare and provide sufficient shading. However, lots of studies are focused only on the flat light shelf. Thus, there was a limit of research conducted in a curved shape. Especially, in Thailand, there were only a few studies conducted on curved light shelves. Kanchan (2017) investigated her research on the characteristics of a single curved light shelf in a kindergarten classroom. After that, in 2019, there was a further research study that focused on the characteristic of multiple curved light shelves in the university classroom (Sok, 2019). The subject matter in his study was the number of curved light shelves. Presently, there is no study about the effect of the angle of multiple curved light shelves on daylighting performance in Thailand. Besides, his outcomes (the illuminance and uniformity values) were quite low, so proposing a study about the angles may have a significant improvement than other factors. Therefore, the purpose of this research study aims to find the best inclination of multiple curved light shelves to enhance daylighting in the university classroom in Thailand.

Materials and Methods

Recommended illuminance and uniformity level for classroom

According to Krüger and Dorigo (2008), even though every country has its standard lighting levels, it all stays between 300 lux to 500 lux for the study room. Moreover, Seangatith and Chaiyakul (2019) have conducted a study on visual performance by comparing between Thai people and western people to find suitable illuminance levels for Thai people and the recommended illuminance standard is 300 lux as shown in Table 1. Besides, based on IESNA and CIBSE standards, the suggested illuminance uniformity is between 0.75 to 0.8 (DiLaura et al., 2011) and (Boyce and Raynham, 2009). Hence, the illuminance 300 lux and the uniformity 0.8 are used as the standards in this study since they were primarily advocated and cited.

Table 1 The recommended illuminance level in a classroom (Seangatith and Chaiyakul, 2019)

Location and tasks	1994 Interior ministerial regulations no.39 (lx)	2001 Bangkok ordinance (lx)	IESNA (lx)	CIBSE (lx)	TIEA (lx)
Classrooms	300	300	300	300	300

Characteristic of the university classroom

In this research study, the classroom sizes are 8m long, 5m wide, and 3.5 m in height. According to (Al-Khatatbeh and Ma'bdeh, 2017) and (Zomorodian et al., 2016), the above numbers were the typical classroom dimensions they have studied. Inside, there is one lecture desk, 15 student tables, a door, and a window. Zomorodian et al. (2016) stated that enlarging the window to wall ratio (WWR) to 35%, 40%, and 50% could promote better daylight into the classroom. Moreover, Mirrahimi et al. (2013) also claimed that the window to floor ratio (WFR) around 10 to 20% was enough to receive the daylight for the small classroom. In this study, the size of the window is 2.2m in height, 4.15m in width, and 70% of glass transmission which equal to 33% of WWR and 23% of WFR. It represents the great opening of the sunlight into the classroom. Furthermore, the window sill height is 0.8m above the floor since the study desk is already 0.7m (Neufert and Neufert, 2012). The ceiling, wall, and floor reflectance coefficients are 90%, 60%, and 30% respectively (alah Ahadi et al., 2016). The above characteristics represent the typical university classroom in Thailand.

Simulation methods

To determine and simulate the illuminance and uniformity levels, DIALux 4.13 was being performed in this research. It is freeware and one of the most used programs for artificial and daylighting design in the exterior as well as interior (Ciampi et al., 2015) and (Fakra et al., 2008). SketchUp 2017 was also utilized to model the curved light shelves. The angles of the curved light shelves are the independent variables in this study which contain seven options including the existing ones as shown in Table 2. In the program, the Bangkok weather data and the clear sky conditions were chosen to run the simulations. All options were simulated in four different orientations such as the south, the north, the east, and the west to find the optimum one for each direction. Also, each option was studied in three different periods of the years such as equinox (March 21st or September 21st), summer solstice (June 21st), and winter solstice (December 21st). Furthermore, in each period, five different hours in a day (8:00 am, 10:00 am, 12:00 pm, 2:00 pm, and 4:00 pm) were selected to do the simulations. To conclude the best option for daylighting performance, an average annual illuminance of each orientation was analyzed and compared to the classroom illuminance standard level (300 lux). If there is more than one option that outreaches the standard, an average annual uniformity is a criterion.

Table 2 Independent variables to be investigated in the study

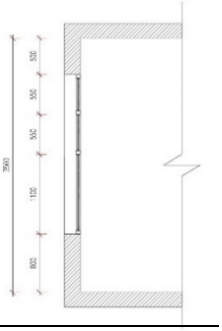
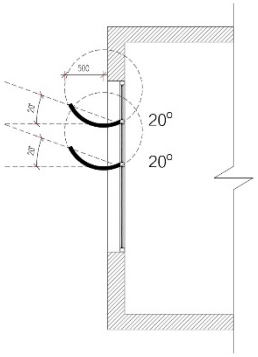
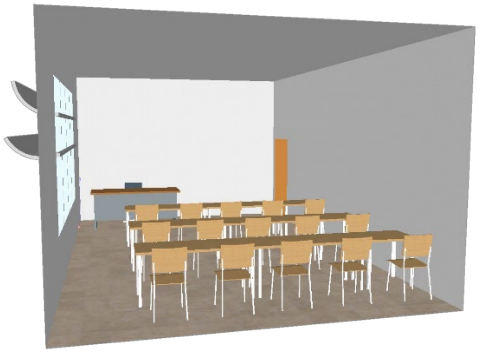
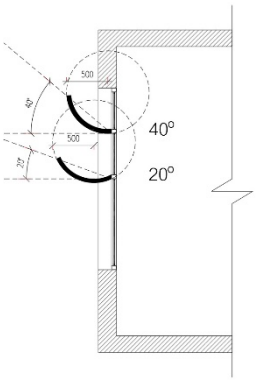
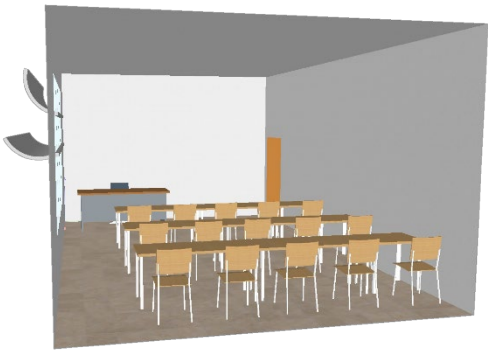
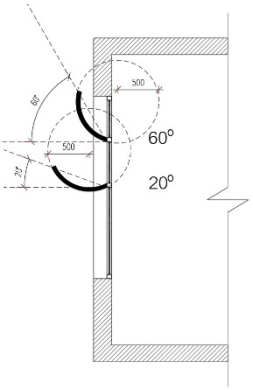
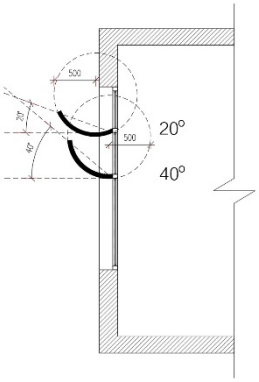
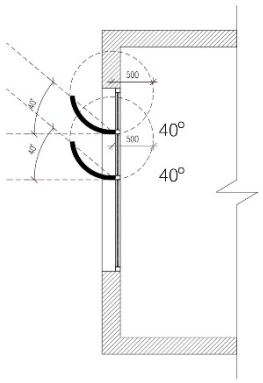
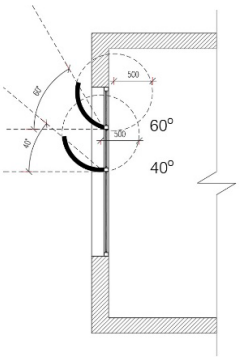
Description	Perspective	2D Section
Existing classroom without light shelves		
1st Option of curved light shelves (20° upper and 20° lower)		
2nd Option of curved light shelves (40° upper and 20° lower)		
3rd Option of curved light shelves (60° upper and 20° lower)		

Table 3 (continued).

Description	Perspective	2D Section
4th Option of curved light shelves (20° upper and 40° lower)		
5th Option of curved light shelves (40° upper and 40° lower)		
6th Option of curved light shelves (60° upper and 40° lower)		

Results and Discussion

Average annual illuminance and uniformity level in south orientation

The chart presents the average annual illuminance of seven options of curved light shelves including the existing in the south orientation as shown in Fig. 1. The results show that the illuminance values of all options were over 300 lux which is the classroom illuminance standard level. The existing classroom received the highest illuminance (1,236 lux) while other options obtained lower daylight between 885 lux to 1,022 lux. Therefore, to find the best option for the south orientation, the uniformity level is needed to be considered.

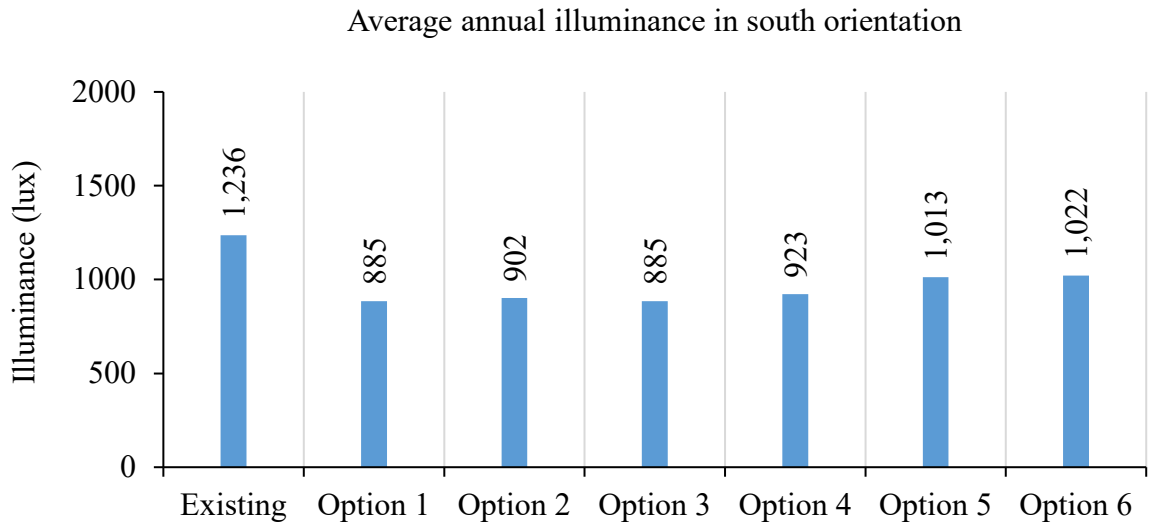


Fig. 1 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in south orientation

Fig. 2 illustrates the average annual uniformity of all options in the south-facade. It can be seen clearly that the classroom without light shelves obtained lower uniformity compared to the classroom that installed the light shelves. According to the outcomes, option 2 received the highest uniformity level at 0.357. Therefore, it is selected as the best option to equip in the south orientation.

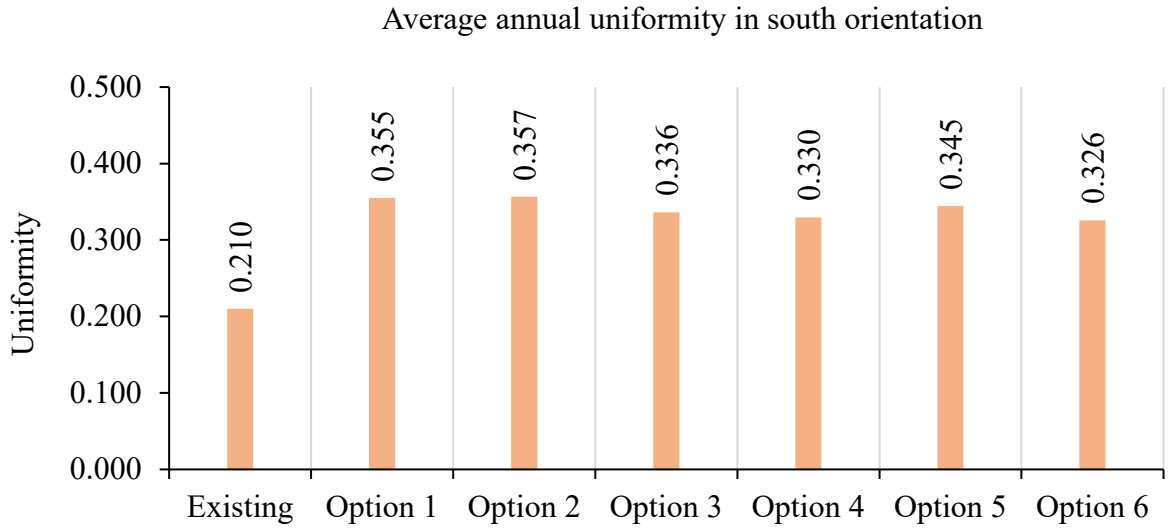


Fig. 2 Average annual uniformity of curved light shelves options in south orientation

Average annual illuminance and uniformity level in north orientation

Fig. 3 shows the average annual illuminance of all options in north orientation. It was found that all proposed models passed the classroom standard level (300 lux). The lowest illuminance was 458 lux (option 3) and the highest was 505 lux (option 5). Due to the chart, it appears that light shelves do not help reduce much of the sunlight in the north because the illuminance results of the existing and other options are not remarkably different.

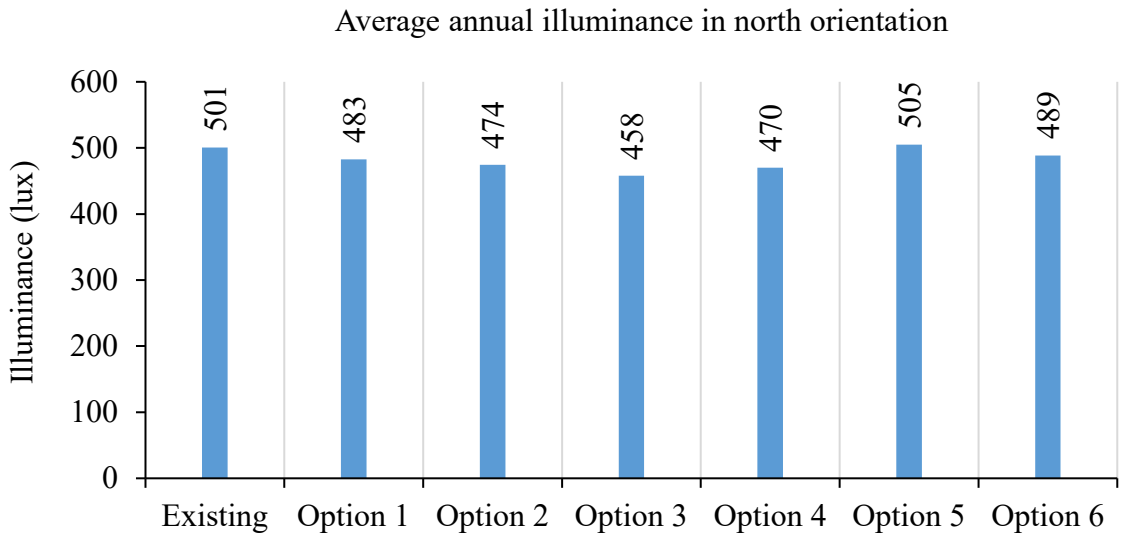


Fig. 3 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in north orientation

The chart plotted in Fig. 4 displays that option 1 received the highest level of uniformity at 0.382. Therefore, option 1 is picked as the best model to install in the north orientation. Interestingly, it is also the option that got the highest uniformity level comparing to all other options in every direction.

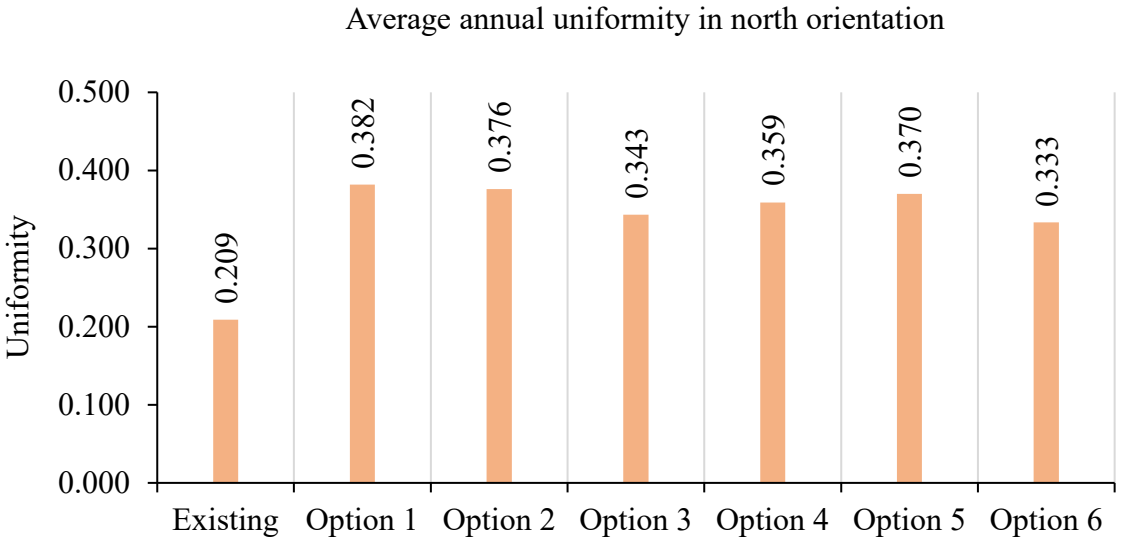


Fig.4 Average annual uniformity of curved light shelves options in north orientation.

Average annual illuminance and uniformity level in east orientation

In the east façade, the illuminance of all the options outreaches the classroom standard level (300 lux). The overall illuminance values were much higher compared to the south and the north. The existing option collected over 2,000 lux while the other six options that equipped the light shelves received only around 1,400 lux. This can explain that light shelves helped decrease a huge amount of unwanted sunlight in the classroom by approximately 600 lux which is about 30%.

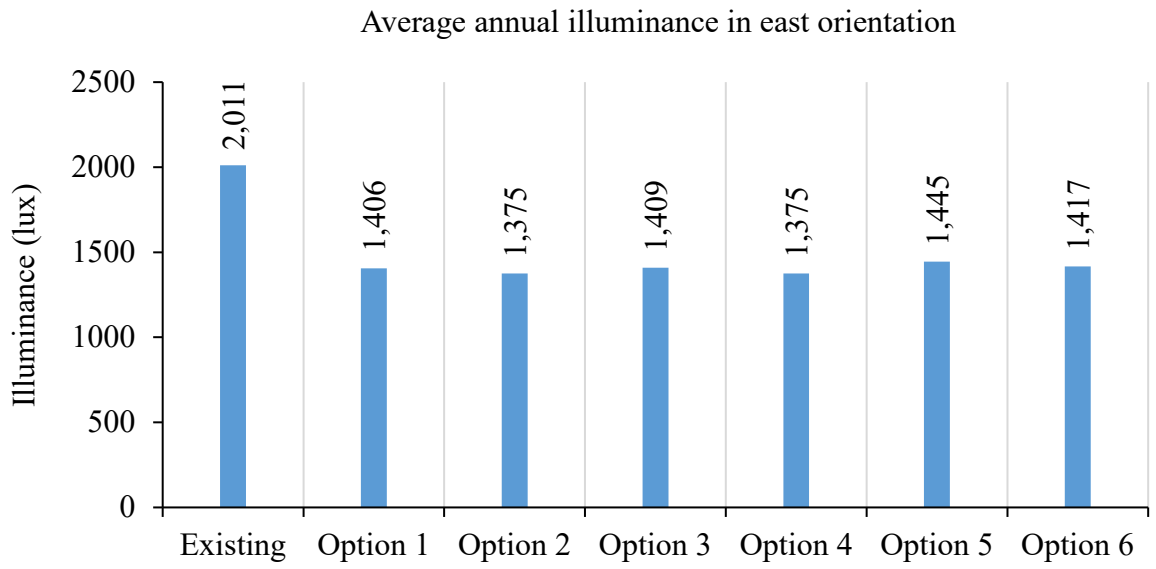


Fig. 5 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in east orientation

Since the illuminance levels of all options in the east orientation were higher than 300 lux, the uniformity is used to decide which option will be the optimum one. From the chart, as shown in Fig. 6, option 1 did the best and still stayed in the top value of 0.282 uniformity level. Thus, it is selected as the best option in the east orientation.

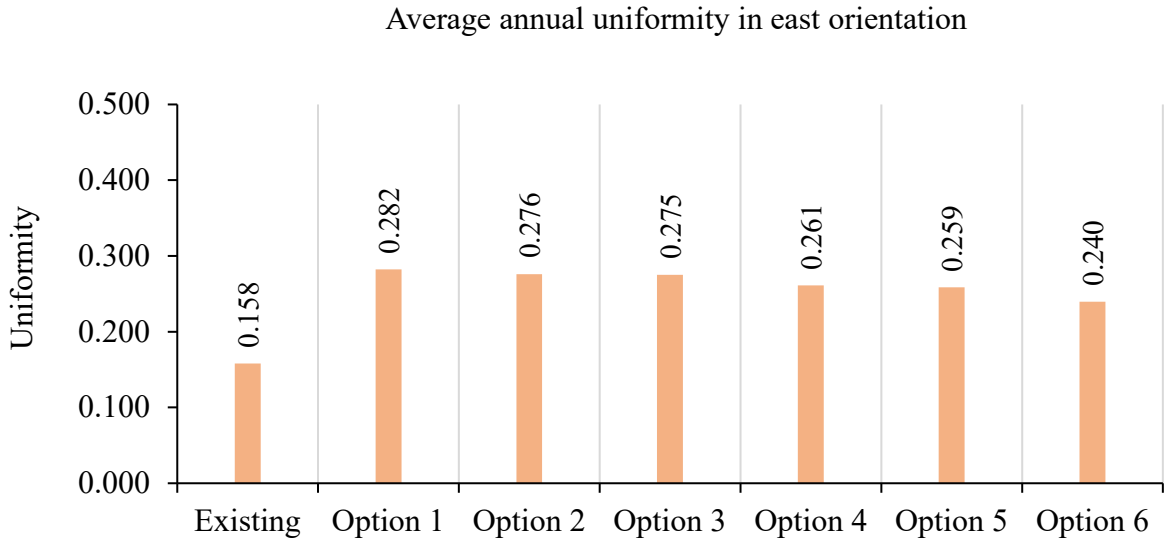


Fig. 6 Average annual uniformity of curved light shelves options in east orientation

Average annual illuminance and uniformity level in west orientation

Fig. 7 summarizes the average annual illuminance of all options in the west orientation. It is apparent that none of the options were under 300 lux and they all stay between 1,180 lux

to 1,800 lux. The existing classroom gained the highest illuminance level of 1,828 lux. Therefore, the decision will be given to the average annual uniformity results.

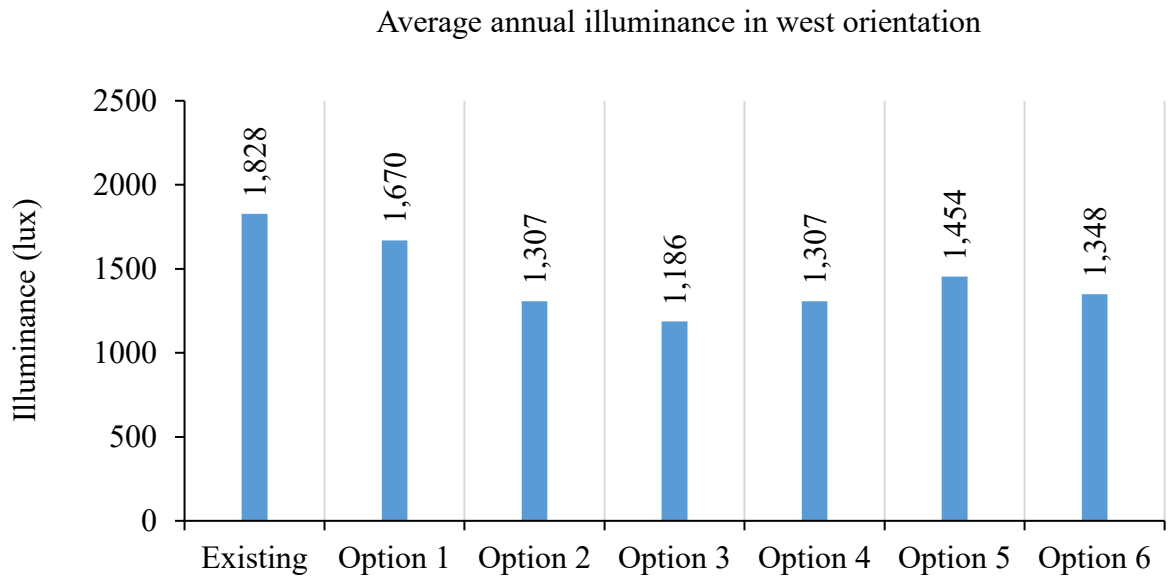


Fig. 7 Average annual illuminance (lux) of curved light shelves options in west orientation

Because overall illuminance results of all options passed the standard, the uniformity becomes the only parameter to conclude which option is the best in west orientation. The average annual uniformity results indicate that the existing option received the least uniformity at only 0.159. However, the option that received the highest was still option 1 with 0.281. By that, it is chosen as the best option to install in the west façade.

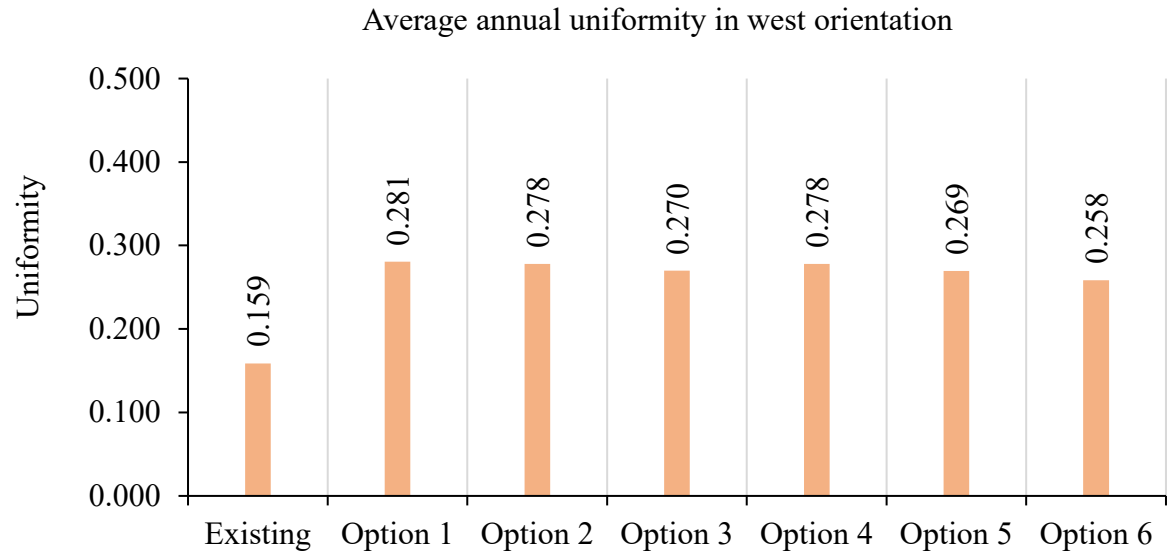


Fig. 8 Average annual uniformity of curved light shelves options in west orientation

Daylighting exploitation has been associated with the user's performance and satisfaction in the occupied area. As already mentioned, a light shelf is one of the simplest

daylighting systems that have the potential in reducing the amount of direct sunlight into space. It is a technique that might require an initial budget at first (approximately 19,200 THB), but it will return the benefits in a long-term period, for example, reducing energy consumption. To conclude, option 1 (20^o upper and 20^o lower) is recommended for the north, the west, and the east orientations. However, the optimum angles for the south orientation were option 2 (40^o upper and 20^o lower).

It should be noted that the dates using in the simulations as representative's days throughout the year were equinox (March 21st or September 21st), summer solstice (June 21st) and winter solstice (December 21st) from 8:00 am to 4:00 pm in four orientations under clear sky conditions only. For complete results, other sky conditions should be investigated which are overcast sky and partly cloudy sky.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Faculty of Architecture at Kasetsart University for sponsoring the postgraduate study and supporting this research.

References

Abdelatia, B., Marenne, C., Semidor, C. 2010. Daylighting strategy for sustainable schools: Case study of prototype classrooms in Libya. J. Sustain. Dev. 3: 60. doi.org/10.5539/jsd.v3n3p60

Al-Khatatbeh, B.J., Ma'bdeh, S.N. 2017. Improving visual comfort and energy efficiency in existing classrooms using passive daylighting techniques. Energy Procedia. 136: 102–108. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.294

alah Ahadi, A., KHanmohammadi, M., Masoudinejad, M., Alirezaie, B. 2016. Improving student performance by proper utilization of daylight in educational environments (Case study: IUST School of Architecture). Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture. 59: 1–21

Fakra, A.H., Boyer, H., Maamari, F. 2008. Experimental validation for software DIALUX: Application in CIE test Cases for building daylighting simulation. In: International Conference on Building Energy and Environment (COBEE 2008), Jul 2008, Dalian, China.

Boyce, P., Raynham, P. 2009. The SLL lighting handbook. Society of Light and Lighting. London, England.

Ciampi, G., Rosato, A., Scorpio, M., Sibilio, S. 2015. Daylighting contribution for energy saving in a historical building. Energy Procedia 78: 1257–1262. doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.270

DiLaura, D.L., Houser, K.W., Mistrick, R.G., Steffy, G.R. 2011. The IESNA lighting handbook: Reference and Application, 10th ed. Illuminating Engineering Society of North America. New York, USA.

Kanchan, R. 2017. The development of curve light shelf for classroom in kindergarten. M.Sc. thesis, Faculty of Architecture, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Krüger, E.L., Dorigo, A.L. 2008. Daylighting analysis in a public school in Curitiba, Brazil. Renewable Energy. 33: 1695–1702. doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.002

Mirrahimi, S., Ibrahim, N.L.N., Surat, M. 2013. Estimation daylight to find simple formulate based on the ratio of window area to floor area rule of thumb for classroom in Malaysia. Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol. 6: 931–935. doi.org/10.19026/rjaset.6.4144

Neufert, E, Neufert, P. 2012. Architects' data. 2nd International English ed. John Wiley & Sons. Oxford, UK.

Seangatith, R., Chaiyakul, Y. 2019. Recommended Illuminance Levels for Visual Tasks in Buildings. Suranaree J. Sci. Technol. 26: 187–197.

Sok, T. 2019. The Effect of multiple curved light shelves on daylighting in university classrooms. M.Sc. thesis, Faculty of Architecture, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Zomorodian, Z., Korsavi, S., Tahsildoost, M. 2016. The effect of window configuration on daylight performance in classrooms: A field and simulation study. Iran University of Science and Technology 26: 15–24.

การชี้บ่งอันตรายกระบวนการและการปฏิบัติงานของระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต โดยการประยุกต์ใช้เทคนิค 4M1E และFMEA

Hazard and Operability Study (HAZOP) of Chlorine Gas Absorption System with Sodium Carbonate Solution by Applying 4M1E and FMEA Techniques

พิมชนิดา ศรีอภัย[a], **ชนินทร์ ปัญจพรผล**[b,*], **ธนาวดี เดชะคุปต์**[c]

Pimchanida Sriaphai[a], **Chanin Panjapornpon**[b,*], **Tanawadee Dechakupt**[c]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[c]ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

[a]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[c]Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand.

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

บทคัดย่อ

การบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตน้ำประปาแต่มีความเป็นอันตรายในเรื่องของการจัดการ อีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือการใช้โซเดียมคาร์บอเนต เนื่องจากมีความเป็นพิษพิษต่ำและจัดเก็บได้ง่าย แต่การประเมินความปลอดภัยยังมีการศึกษาไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ชี้บ่งอันตรายของกระบวนการและการปฏิบัติงานของระบบดังกล่าว ด้วยการประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด 4M 1E ร่วมกับ FMEA ซึ่งมีข้อดีในการช่วยวิเคราะห์แหล่งของปัญหา สาเหตุของอันตรายได้ครอบคลุมในด้านบุคคล เครื่องมือ อุปกรณ์ วิธีการ และสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้วิเคราะห์ HAZOP โดยนำมาประยุกต์ในกรณีศึกษาของระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนตของกระบวนการผลิตน้ำประปาในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษา พบว่า ให้มุมมองในการชี้บ่งอันตรายเชิงลึกและรอบด้านมากกว่าวิเคราะห์จากแผนผังแสดงระบบท่อ อุปกรณ์ และอุปกรณ์วัดคุมต่างๆ

คำสำคัญ: ระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต, 4M1E, FMEA, HAZOP

Abstract

A chlorine gas absorption system by sodium hydroxide is used extensively in water treatment but handling and managing the chlorine gas are concerns. An alternative substance potentially used instead of the sodium hydroxide is sodium carbonate because of its low toxicity. However, few studies on its risk assessment are reported. Therefore, this paper presents a method for analyzing the process and hazards using the 4M1E analysis framework and FMEA to consider causes of hazards covered in Man, Machine, Material, Method, and Environment for HAZOP analysis. The proposed techniques were applied for analyzing a case study of a chlorine gas treatment with sodium carbonate in a tapioca starch plant. The results of the study, it was found that the proposed method provides a more in-depth view of hazards identification than those of analysis by the piping and instrumentation diagram of the process.

Keywords: 4M1E, Chlorine gas absorption system by sodium carbonate, FMEA, HAZOP

คำนำ

ก๊าซคลอรีนเป็นก๊าซที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางในการฆ่าเชื้อโรคในระบบการผลิตน้ำประปา ก๊าซดังกล่าวแม้มีข้อดีแต่ก็มีความเป็นพิษกัดกร่อนและเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ หากมนุษย์สูดดมคลอรีนที่มีความเข้มข้นเพียง 430 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เข้าไปในระยะเวลาเพียง 30 นาที สามารถจะทำอันตรายถึงขั้นเสียชีวิตได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) เพื่อเป็นการลดเหตุการณ์อุบัติภัยที่จะนำมาซึ่งความสูญเสียและบาดเจ็บจากก๊าซคลอรีน การชี้บ่งอันตรายในกระบวนการและการปฏิบัติงานเพื่อให้ทราบถึงความเสี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นถือเป็นปัจจัยสำคัญ กชษธร (2559) ได้ทำการศึกษาก๊าซคลอรีนรั่วไหลที่หอระบายความร้อนของอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีชุมชนอยู่รอบข้าง โดยการประเมินผลกระทบความรุนแรงการรั่วไหลผ่านโปรแกรม ALOHA และ Google Earth และชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี HAZOP เพื่อกำหนดมาตรการฉุกเฉิน ก๊าซคลอรีนมีน้ำหนักมากกว่าอากาศ หากมีการรั่วไหลมีแนวโน้มที่จะกระจายตัวใกล้พื้นดิน มีการศึกษาการแพร่กระจายของก๊าซคลอรีนในอาคารซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมปิด โดยเสนอแบบจำลอง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าการรั่วไหลของก๊าซคลอรีน จะมีการแพร่กระจายตัวลงสู่พื้น และในขณะเดียวกันความเข้มข้นของก๊าซคลอรีนในทุกๆ จุด ภายในห้องนั้นมีความเข้มข้นสูงขึ้นอย่างช้าๆ (Siddiqui, 2012) จิตลักษณ์ (2560) ทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการรั่วไหลของก๊าซคลอรีนในกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยศึกษาระบบจ่ายคลอรีนที่มีถังบรรจุขนาด 1,000 กิโลกรัม โดยการชี้บ่งอันตรายด้วย HAZOP และระบุโอกาสของเหตุการณ์โดยใช้ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ในการชี้บ่งอันตรายของกระบวนการในกรณีเกิดการรั่วไหลของก๊าซคลอรีนที่กล่าวมานั้น ส่วนมากใช้วิธี FMEA แม้มีข้อดีในการวิเคราะห์โอกาสสาเหตุการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ แต่ยังมีข้อด้อยในเรื่องของการวิเคราะห์เชิงการปฏิบัติงาน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ชี้บ่งอันตรายของกระบวนการและการปฏิบัติงาน ด้วยการประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด FMEA ร่วมกับ 4M 1E (Man, Machine, Material, Method, Environment) โดยเป็นกลุ่มปัจจัยเพื่อจะนำไปสู่การแยกแยะสาเหตุของปัญหา ความเสี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้น ซึ่งมีข้อดีในการช่วยวิเคราะห์ได้ครอบคลุมในด้านบุคคล เครื่องมือ อุปกรณ์ วิธีการ และสิ่งแวดล้อม การบ่งชี้อันตรายที่วิเคราะห์ได้จากวิธีการที่นำเสนอนี้จะถูกนำไปชี้บ่งอันตรายด้วย HAZOP ซึ่งจะทำการประเมินความรุนแรงและความเสี่ยงจากประสบการณ์ของวิศวกรและผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการดังกล่าว โดยระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนตของกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อวิเคราะห์การชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยง

1. การชี้บ่งอันตรายของกระบวนการด้วยการประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด FMEA ร่วมกับ 4M 1E

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดของเทคนิค 4M1E และ FMEA ในการชี้บ่งอันตรายของกระบวนการและวิธีการปฏิบัติงาน และดำเนินการประเมินความเสี่ยงด้วยการระบุโอกาสและความรุนแรง วิธีการในการดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 การวิเคราะห์ชี้บ่งอันตรายด้วยเทคนิค 4M1E (Man, Machine, Material, Method, Environment)

การชี้บ่งอันตรายของกระบวนการและวิธีการปฏิบัติงานด้วยวิธี 4M1E เป็นเทคนิคการศึกษาวิเคราะห์และทบทวนเพื่อชี้บ่งอันตรายและค้นหาปัญหาและความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นจากการดำเนินงานในโรงงาน โดยการวิเคราะห์หาอันตรายและปัญหาของระบบต่าง ๆ ให้ครอบคลุมในด้านบุคคล เครื่องมือ อุปกรณ์ วิธีการ และ

สิ่งแวดล้อม รวมทั้งการวิเคราะห์จากแผนผังแสดงระบบท่อ อุปกรณ์ และอุปกรณ์วัดคุมต่างๆ (Piping and instrument diagram, P&ID) และระบบนิรภัย โดยการวิเคราะห์เทคนิค 4M1E มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- *Man: บุคคล* หมายถึง พนักงาน หรือบุคลากรทั้งหมด โดยปัจจัยด้านบุคลที่นำมาวิเคราะห์ เพื่อชี้บ่งปัญหา ได้แก่ ความสามารถทางเทคนิคของผู้ปฏิบัติงาน การปรับตัวและความรู้ความเข้าใจในการดำเนินการ ความเข้าใจและความเชี่ยวชาญในมาตรฐานและวิธีการทำงานรวมถึง ความสามารถในการเป็นผู้นำของหัวหน้างาน ทักษะการตัดสินใจและความสามารถในการบังคับบัญชา ปัจจัยด้านบุคคล จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการกระบวนการและการปฏิบัติงาน
- *Material: วัสดุ* หมายถึง คุณภาพของวัสดุและการเลือกใช้วัสดุที่ถูกต้องและเหมาะสมในกระบวนการ โดยควรเป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ ติดตั้ง หากการควบคุมคุณภาพของวัสดุไม่เป็นไปตามข้อกำหนดเบื้องต้น จะส่งผลต่อความปลอดภัยในการดำเนินการและผู้ใช้งานด้วยเช่นกัน
- *Method: วิธีการ กระบวนการทำงาน* หมายถึง วิธีการ หรือขั้นตอนในการทำงาน ความปลอดภัยของกระบวนการและการปฏิบัติงาน จะต้องมาจากการวิธีการและขั้นตอนที่ถูกต้อง ต้องมีการจัดการ การวางแผน การติดตาม การตรวจสอบ และการควบคุมขั้นตอนการดำเนินการนั้นให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- *Machine: เครื่องจักร อุปกรณ์* เป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในกระบวนการและการปฏิบัติงาน และส่งผลต่อความปลอดภัยโดยตรง ปัจจัยต่างๆที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ การใช้เครื่องจักรอุปกรณ์อย่างเหมาะสม การควบคุมคุณภาพของอุปกรณ์ การดูแลรักษา และการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์อุปกรณ์จากแผนผังแสดงระบบท่อ อุปกรณ์ และอุปกรณ์วัดคุมต่างๆ รวมถึงระบบนิรภัย
- *Environment: สภาพแวดล้อม* สภาพแวดล้อมการทำงานทั้งหมด พิจารณาปัจจัยด้านกายภาพ ได้แก่ ความร้อน แสงสว่าง เสียง รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 การประเมินความเสี่ยงของกระบวนการและวิธีการปฏิบัติงานด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ได้รับการพัฒนาครั้งแรกสำหรับหน่วยงานอากาศยานทางทหารของสหรัฐอเมริกา FMEA จะมุ่งเน้นที่การชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น (Potential Failure Mode) อันเนื่องมาจากการออกแบบ การผลิตหรือการบริการ จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Effects Analysis) และสุดท้ายก็เพื่อการนำไปสู่การหาวิธีป้องกันการเกิดความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Problems Prevention) (Stamatis, 2003) โดยมีขั้นตอนดังแสดงใน Fig.1

1.2.1 การวางแผนการดำเนินการ

เป็นขั้นตอนการเลือกงาน กระบวนการปฏิบัติงาน ระบบ เครื่องจักรอุปกรณ์ที่อาจมีอันตรายส่งผลกระทบให้เกิดอุบัติเหตุ หรือสิ่งแวดล้อม เพื่อทำการกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ที่เฉพาะเจาะจงเพื่อนำมาวิเคราะห์ จากนั้นต้องเตรียมข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้องกับระบบที่จะทำการวิเคราะห์ ได้แก่ P&ID, แผนผังวงจรไฟฟ้า, แผนผังระบบเชื่อมโยงระหว่างเครื่องมือและอุปกรณ์, คู่มือการทำงานของอุปกรณ์, เอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงาน, เอกสารการบักทึก การตรวจสอบการปฏิบัติงาน และประวัติการซ่อมบำรุงเครื่องจักรและอุปกรณ์

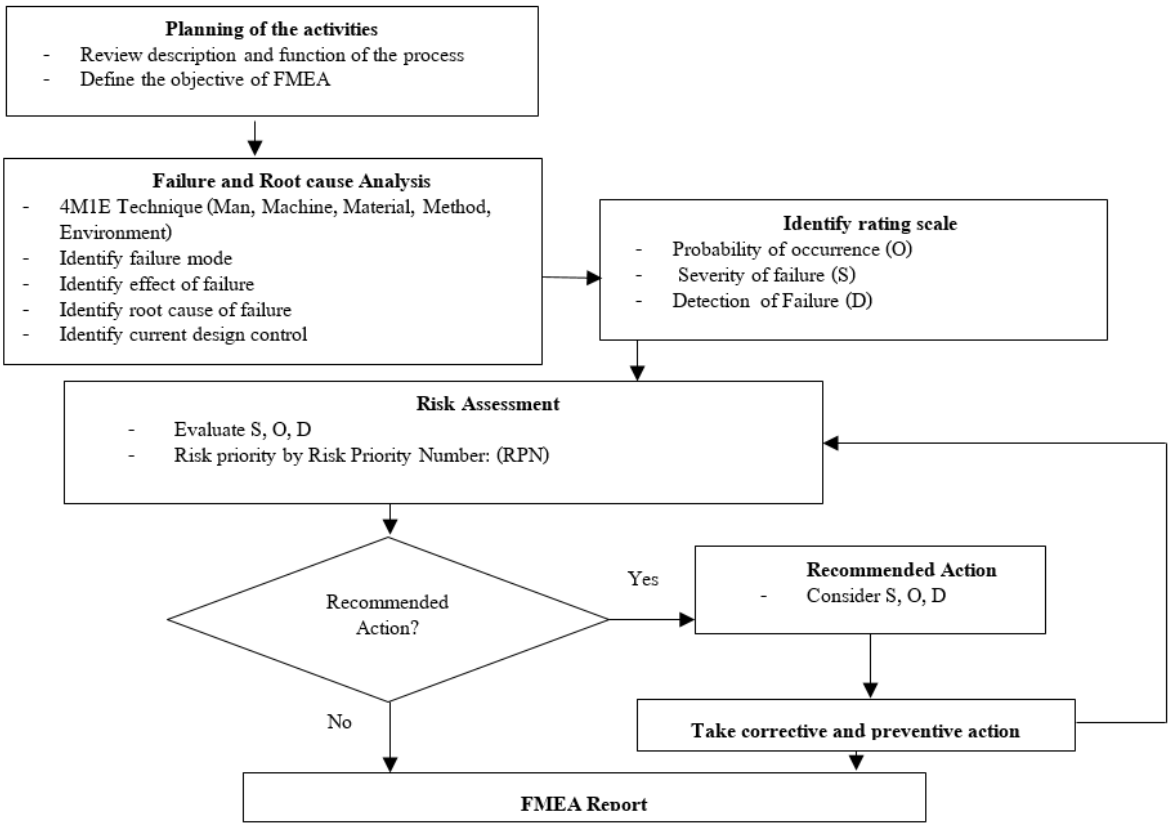


Fig. 1 Flowchart of the procedure for application of design FMEA&4M1E technique

1.2.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและสาเหตุของข้อบกพร่อง

จะต้องมีการเขียนแผนผังของกระบวนการและนำมาพิจารณาแยกแยะคุณลักษณะต่างๆของอุปกรณ์แต่ละชิ้นส่วน รวมถึงงานหรือขั้นตอนเพื่อความชัดเจน จากนั้นจึงวิเคราะห์ข้อผิดพลาด ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับกระบวนการในแต่ละขั้นตอน สิ่งสำคัญคือจะต้องพิจารณาความเป็นไปได้ทุกๆ ทางที่จะทำให้เกิดข้อผิดพลาด ในขั้นตอนนี้จะนำกรอบแนวคิดของ 4M1E เข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นแนวทางในการชี้บ่งให้ครอบคลุมทุกมิติที่เกี่ยวข้อง ในด้านบุคคล เครื่องมือ อุปกรณ์ วิธีการ และสิ่งแวดล้อม ตามที่ระบุไว้ในหัวข้อ 1.1

1.2.3 การประเมินความเสี่ยง

หลังจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องของกระบวนการและการปฏิบัติงานแล้ว จะต้องทำการประเมินถึง

- ความรุนแรงของข้อผิดพลาดที่เกิด (Severity of Failure, S) เกณฑ์การประเมินที่ใช้ จะพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ที่ส่งผลต่อบุคคล ระบบและสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งคะแนนต่ำสุด คือ 1 และสูงสุด คือ 5 ดังแสดง Table 1
- โอกาสของการเกิดข้อผิดพลาด (Probability of Occurrence, O) เกณฑ์การประเมินที่ใช้ จะพิจารณาจากข้อมูลอายุการใช้งานของอุปกรณ์ สถิติการเกิดข้อผิดพลาดหรือความเสียหายของอุปกรณ์ในโรงงาน ดังแสดงใน Table 1
- ความสามารถในการตรวจสอบข้อผิดพลาดได้ก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้น (Detection: D) หมายถึงพิจารณาในเชิงการป้องกัน (Prevention) และการตรวจจับ (Detection) สาเหตุกลไกของข้อบกพร่องหรือลักษณะของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น เช่น การมีระบบ Interlock การบำรุงรักษา หากมีความสามมารถในการตรวจสอบข้อผิดพลาดได้ดีคะแนนที่ได้จะลดต่ำลง ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Severity, Occurrence and Detection rating scale

Level		Severity			Occurrence	Detection
		People	System	Environmental		
1	Very Low	Injuries required immediate first aid treatment.	No breakdown, Property damage less than 50,000 THB	No environment impact	Rare. May occur only exceptional circumstances. May occur once in over 10 years. Chances of occurrence are less than 10%	Detecting system is reliable to detect and can prevent unexpected circumstances.
2	Low	Injuries required medical treatment without lost workday.	Break down more than 12 hours, Property damage from 50,000 – 150,000 THB	Pollution with minimal acute environment that controllably	Could occur 1 time within 5-10 years period. Chances of occurrence are from 10-19%	Detecting system is high probably to detect and can prevent unexpected circumstances.
3	Medium	Injuries required medical treatment with lost workday from 1 day to 2 weeks	Break down from 12 – 16 hours, Property damage from 150,000 – 300,000 THB	Release that result in short-term disruption of the environment	Might occur or should be expected to occur 1 time within 1-5 years period. Chances of occurrence are from 20 - 49%	Detecting system is medium probably to detect and can prevent unexpected circumstances.
4	High	Injuries required medical treatment with lost workday more than 2 weeks	Break down from 16 – 24 hours, Property damage from 300,000 – 500,000 THB	Releases that result in long-term disruption of the environment	Will probably occur 1 time within 1-year period. Chances of occurrence are from 50 - 79%	Detecting system is low probably to detect and can prevent unexpected circumstances.
5	Extreme	Deaths or permanent disabilities	Break down more than 1 day, Property damage more than 500,000 THB	Releases that result in long-term disruption of the environment required many properties to recover to normal	Is expected to occur with a probability of multiple occurrences within 6 months. Chances of occurrence are from 80 - 100%	No detecting system.

1.2.4 การวิเคราะห์ความเสี่ยง

หลังจากการประเมินความเสี่ยงเพื่อให้ทราบผลลัพธ์หรือผลที่จะเกิดขึ้นแล้วจะต้องทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงเพื่อนำผลลัพธ์อันตรายนั้นมาจัดลำดับ ลดและขจัดออกไป ได้นำการประเมินค่าความเสี่ยงชี้นำตัวเลขของความเสี่ยง (Risk Priority Number : RPN) มาจัดลำดับความสำคัญของข้อผิดพลาด โดยได้จากผลคูณของความรุนแรงของผลกระทบและโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่างๆและการตรวจจับ เขียนในรูป Equation 1

$$RPN = S*O*D \quad (1)$$

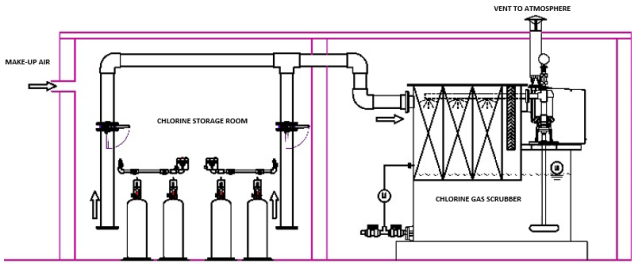
ค่า RPN จะนำมาใช้ในการกำหนดความเสี่ยงของลักษณะข้อบกพร่องที่กำหนด เพื่อให้การวิเคราะห์ความเสี่ยงเป็นไปอย่างถูกต้อง จึงทำการวิเคราะห์คะแนน RPN ด้วยแผนภาพพาเรโตร่วมด้วย

2. กรณีศึกษาระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต

งานวิจัยครั้งนี้ได้นำกรอบแนวคิดการชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงในกระบวนการและการปฏิบัติงานของกระบวนการผลิตน้ำประปาที่มีการใช้ระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่ง จังหวัดนครราชสีมา

2.1 ระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต

ระบบบำบัดก๊าซคลอรีน ถูกนำมาติดตั้งและใช้งานในกรณีก๊าซคลอรีนรั่วไหล ดังแสดงใน Fig. 2



The sensor will detect the chlorine gas leaking from 1 ppm and above. The air suction system will work to suck the contaminated air to the wet scrubber system automatically. A solution of 10 %w/v sodium carbonate (Na_2CO_3) was used to capture chlorine gas.

Fig. 2 Chlorine Gas Absorption System with Sodium Carbonate Solution

2.2 การชี้บ่งอันตรายของกระบวนการและวิธีการปฏิบัติงานด้วยวิธี 4M1E

ทำการวิเคราะห์เพื่อชี้บ่งอันตราย ข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น พบว่ามีทั้งหมด 22 เหตุการณ์ความล้มเหลวที่เกิดขึ้น ที่สามารถส่งผลให้ระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนตทำให้ไม่สามารถบำบัดก๊าซคลอรีนหรือมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคลอรีนลดลง ดังแสดงใน Fig. 3 และ Table 2

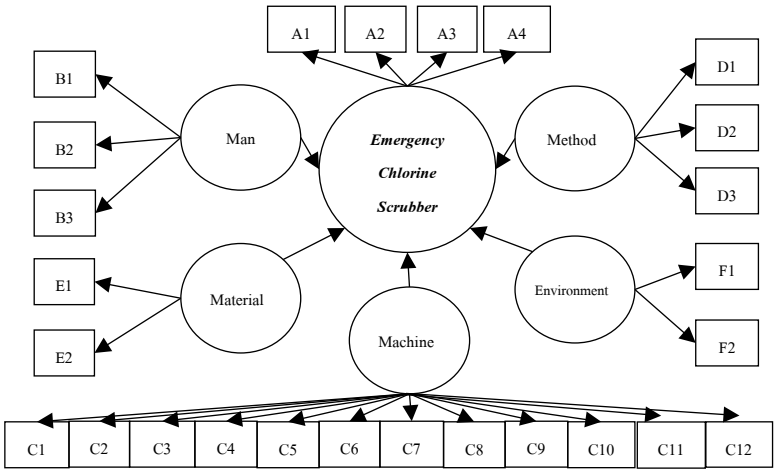


Fig. 3 4M1E Diagram of Emergency Chlorine Scrubber

Table 2 Summary of failure mode of emergency chlorine scrubber applying 4M1E.

Factors	Failures	Symbols	Factors	Failures	Symbols
Emergency	Low efficiency of treatment unit	A1	Machine	Electrical System inactivate	C7
chlorine	Chlorine gas is not detected	A2		Control System inactivate or error	C8
scrubber system	Chlorine gas is not neutralized	A3		Exhaust Fan inactivate	C9
	Contamination in environment	A4		Recirculation Pump inactivate	C10
Man	Do not follow work instruction	B1		pH probe inactivates	C11
	Lack of knowledge	B2		Pressure gauge damaged	C12
	Inexperienced	B3	Method	No preventive maintenance plan	D1

Table 2 (countined).

Factors	Failures	Symbols	Factors	Failures	Symbols
Machine	Chlorine gas Detector inactivate	C1		No system inspection plan	D2
	Scrubber Tank leak or broken	C2		No work instruction	D3
	Scrubber Packing media is deteriorated	C3	Material	Inappropriate of materials	E1
	Spray Nozzle clog, deteriorated	C4		Wrong selection of materials	E2
	Sight Glass break	C5	Environment	Investment is limited	F1
	Sample Valve break	C6		Inappropriate installation area	F2

2.3 การประเมินและวิเคราะห์ความเสี่ยงด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA

หลังจากทำการระบุอันตราย ข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นแล้ว นำข้อผิดพลาดดังกล่าวมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุเพื่อประเมินความเสี่ยง โดยพิจารณาถึงโอกาสของการเกิดข้อผิดพลาด ความรุนแรงของข้อผิดพลาดที่เกิด และการตรวจสอบข้อผิดพลาดได้ก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้นตามหลักเกณฑ์การประเมินใน Table 1 หลังจากการประเมินค่าความเสี่ยงชี้นำตัวเลขของความเสี่ยง (Risk Priority Number : RPN) แล้วจะมีการดำเนินการแก้ไขเพื่อลดค่า RPN ที่สูง สำหรับมาตรการที่เสนอทั้งหมดจะมีการกำหนดผู้รับผิดชอบ ระยะเวลาและแผนการดำเนินการ หลังจากการดำเนินการแก้ไขที่แล้วจะมีการประเมินความเสี่ยงอีกครั้ง สำหรับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Design FMEA Worksheet

Factor	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure	S	Potential Cause of Failure	O	Current Design Control	D	RPN	Recommended Action	S	O	D	RPN
Man	Not have Na_2SO_3 in Scrubber	Chlorine gas is not neutralized.	5	Not follow work instruction of sodium carbonate loading when no absorbent in system	1	Scrubber system running test by weekly.	2	10	Add the automatic absorbent loading system to fill the sodium carbonate when it is a low volume	3	1	1	3
Machine	Chlorine gas Detector not function	Chlorine gas is not detected	5	The sensor is deteriorated due to humidity	3	Monthly Chlorine gas detector function test	2	30	Provide the calibration plan and running test by weekly	4	2	2	16
	Scrubber Tank is leaking or broken	The scrubber has decreased the efficiency	4	Deteriorate	2	Scrubber system running test by weekly.	3	24	Provide the preventive maintenance plan	3	1	3	9
	Packing media damage	The scrubber has decreased the efficiency	3	The salt crystal covering the packing media	4	There is annual preventive maintenance plan	4	48	Provide the flushing system after scrubber running	3	2	1	6
	Spray Nozzle	The scrubber has decreased the efficiency	3	Clog, Break, Deteriorated	3	There is annual preventive maintenance plan	4	36	Provide the flushing system after scrubber running	3	2	1	6
Method	Equipment/ Devices damage	The scrubber has decreased the efficiency	4	No preventive maintenance plan, No inspection plan	1	There is annual preventive maintenance plan	1	4					

Table 3 (coutinued).

Factor	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure	S	Potential Cause of Failure	O	Current Design Control	D	RPN	Recommended Action	S	O	D	RPN
Material	Equipment/ Devices damage	The scrubber has decreased the efficiency	4	Inappropriate of materials	2	There is the inspection engineer	1	8					
Environment	Equipment/ Devices damage	The scrubber has decreased the efficiency	4	Inappropriate installation area	1	External audit, Engineering assessment	2	8					

สรุป

งานวิจัยนี้ได้เสนอการวิเคราะห์การชี้บ่งอันตรายของกระบวนการและการปฏิบัติงาน ด้วยการประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด 4M 1E (Man, Machine, Material, Method, Environment) ร่วมกับ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) โดยนำมาใช้ในกรณีศึกษาของระบบบำบัดก๊าซคลอรีนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ากรอบแนวคิดดังกล่าว เป็นเทคนิคที่มุ่งเน้นการระบุปัญหาหรือข้อบกพร่องในเชิงรุก ซึ่งมีข้อดีในการช่วยวิเคราะห์แหล่งของปัญหา สาเหตุของอันตรายได้ครอบคลุมในทุกมิติของกระบวนการทั้ง ด้านบุคคล เครื่องมืออุปกรณ์ วิธีการ และสิ่งแวดล้อม นำไปสู่การป้องกันไม่ให้เกิดความไม่ปลอดภัย กำจัดและลดอันตรายได้ในระยะยาว จากการศึกษางานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องได้มีวิธีการชี้บ่งอันตรายแบบอื่นจะให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์หาอันตรายและปัญหาของระบบต่าง ๆ ซึ่งอาจจะเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในการออกแบบที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจด้วยการตั้งคำถามที่สมมติสถานการณ์ของการผลิตในภาวะต่าง ๆ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จำเป็นต้องใช้ผู้ชำนาญการและระยะเวลาในการดำเนินการมาก อีกทั้งมีความเหมาะสมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นสรุปได้ว่าในกระบวนการวิธีการในการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกิจกรรม กระบวนการและการปฏิบัติงานที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กรอบแนวคิดของเทคนิค 4M1E และ FMEA เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการประเมินความเสี่ยง แสดงให้เห็นถึงการจัดลำดับความสำคัญของปัญหา นำมาซึ่งมาตรการในการแก้ไขปรับปรุง อย่างไรก็ตามเพื่อให้มีมุมมองที่ดีขึ้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์สาเหตุ จำเป็นต้องมีทีมงานสหสาขาวิชาชีพ ในการวิเคราะห์ และในบางกิจกรรมที่แตกต่างออกไปสามารถปรับรูปแบบวิธีการ เพื่อการพัฒนา เพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์การชี้บ่งอันตรายของกระบวนการและการปฏิบัติงานมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ดีด้วยความกรุณาชี้แนะจาก รศ.ดร. ชนินทร์ ปัญจพรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องมาโดยตลอดจนเสร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2554. คลอรีน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

กชษธร หยกสหชาติ. 2559. การประยุกต์โปรแกรม ALOHA เพื่อประเมินผลกระทบและความเสี่ยงการรั่วไหลของก๊าซพิษและวางมาตรการป้องกันในภาวะฉุกเฉิน : กรณีศึกษาของก๊าซคลอรีนในกระบวนการผลิตน้ำที่ใช้ในหอระบายความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิตลักษณ์ ผลเกิด. 2560. การประเมินผลกระทบการรั่วไหลของสารคลอรีนเพื่อสร้างแผนรองรับเหตุฉุกเฉิน: กรณีศึกษากระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Hossein, S. 2016. Assessment and modeling of chlorine release in urban region: A case study in water supply of Eyvan city, J. Bas. Res. Med. Sci. 3: 7–14. doi: 10.18869/acadpub.jbrms.3.3.7

Siddiqui, M., Jayanti, S., Swaminathan, T. 2012. CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk Mitigation. J. Hazard. Mater. 209–210: 177–185. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.007

Stamatis, D.H. 2003. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution, ASQC Quality Press, Milwaukee, 53203.

การปรับปรุงกระบวนการการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่นบาง ด้วยวิธีซิกซ์ ซิกม่า

Print circuit board assembly (pcba) improvement by using six sigma

นิกร ก๋ำทอง*, วันวิสาข์ สกลภาพ

Nikorn Katong*, Wanwisa Skolpap

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี กลุ่มวิจัยวิศวกรรมชีวเวช คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) ปทุมธานี 12120

Department of Chemical Engineering, Center of Clinical Engineering, School of Engineering, Thammasat University (Rangsit campus), Pathum Thani 12120, Thailand.

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

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่นบาง ด้วยวิธีซิกซ์ ซิกม่า โดยต้องลดจำนวนของงานเสียที่เกิดจากการผลิตจาก 3,528 parts per million (PPM) จนกระทั่งมีจำนวนของเสียต่ำกว่า 500 PPM ตัวแปรศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ได้แก่ คุณภาพของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่นบาง คุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์(ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ) คุณภาพของสารบัดกรี อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการหลอมละลายสารบัดกรี อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต มาตรฐานการทำงานที่ถูกต้อง และการตั้งค่าของเครื่องจักร จากการศึกษาพบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดงานเสียในการผลิต เกิดจากคุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ตัวต้านทาน) ที่มีพื้นผิวที่ถูกกัดกร่อน และการตั้งค่าของเครื่องจักรที่ทำให้คุณภาพของสารบัดกรีต่ำลง รวมทั้งการทำงานของผู้ปฏิบัติงานยังไม่ถูกต้องตามมาตรฐานการทำงานที่กำหนดไว้ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อกันอย่างไม่สมบูรณ์ ดังนั้นหลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยวิธีซิกซ์ ซิกม่า ทำให้จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตลดลงเหลือ 400 PPM

คำสำคัญ: ซิกซ์ ซิกม่า, แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผ่นบาง, สารบัดกรี, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

Abstract

This study aims at improving performance of printed circuit board assembly (PCBA) manufacturing process using Six Sigma approach to reduce product defects from 3,528 parts per million (PPM) to be less than 500 PPM. There are several studied variables such as quality of PCB, quality of electronic device (Resistor─Capacitor), quality of solder paste, oven temperature for heating solder paste, PCBA equipment, standardize work and machine setup. After implementing Six Sigma's root cause analysis, most important factors affecting the product quality are corroded surface mount resistor for use in the electronic device and machine setting error leading to poor PCB solder ability. The soldering problem can cause a lifted pad defect resulting a short-circuit. When the insufficient solder is used on the pads and they exposed to an excessive force, the pad may become lifted off the board causing damaging the entire circuit board. The PCBA quality improvement using Six Sigma achieves the reduction of defects to 400 PPM

Keywords: electronic device, print circuit board (flexible type), six sigma, solder paste

บทนำ

เพื่อตอบสนองโครงการ “Thailand 4.0” ในการพัฒนาประเทศสู่ความมั่งคั่ง มั่นคง และยั่งยืน สำหรับภาคอุตสาหกรรมสามารถทำได้ด้วยการลดต้นทุนการผลิต อาศัยนวัตกรรมเป็นตัวขับเคลื่อน และลดความสูญเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ ได้แก่ การผลิตที่มากกว่าความความต้องการ (Overproduction) การขนถ่ายงานที่ไม่มีความจำเป็น (Transportation) ขั้นตอนการทำงานที่ถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อเพิ่มคุณภาพของงานดีขึ้น แต่ทำให้งานที่ได้จากการผลิตต่ำกว่ากว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ (Over processing) การกักเก็บสินค้าจำนวนมาก (Inventory) การทำงานที่ทำให้ผู้ปฏิบัติงานมีการเคลื่อนที่ (Motion) ที่มากเกินความจำเป็น การทำงานที่ต้องหยุดรองานจากกระบวนการก่อนหน้า (Waiting) และการทำงานที่ต้องแก้ไขคุณภาพของงานที่ได้จากการผลิต (Defect) ทำให้ผู้ประกอบการของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละแห่ง ต้องทำการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิต เพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางอุตสาหกรรมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามสถานการณ์ของเศรษฐกิจโลก โดยอาศัยการประยุกต์ใช้วิธีการของซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) และ การผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) มาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการลดต้นทุนการผลิตที่มีผลกระทบจากความสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการผลิต

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้วิธีการของซิกซ์ ซิกม่า มาใช้ในการลดความสูญเสียในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่งที่ทำการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (PCBA : Print Circuit Board Assembly) ด้วยการผลิตแบบ Surface Mount Technology (SMT) ซึ่งวัสดุหลักที่ใช้สำหรับการผลิตนี้ประกอบด้วย แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้การผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบไม่มีขาอุปกรณ์ (Surface Mount Device: SMD) โดยแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการผลิตแบ่งได้ 2 ประเภท ที่มีสมบัติต่างกัน ได้แก่ แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแข็ง (Rigid Board) และแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบาง (Flexible Board) สำหรับการผลิตแบบกึ่งอัตโนมัติของโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์แห่งนี้ กล่าวคือการผลิตนี้มีการใช้เครื่องจักรอัตโนมัติและพนักงานทำงานร่วมกัน ดังนั้นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อความสูญเสียในการผลิต (Production loss) แบ่งออกเป็น 3 สาเหตุหลัก ประกอบด้วย ปัญหาเครื่องจักร ปัญหาที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดของพนักงาน และปัญหาจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต จากสาเหตุหลักข้างต้น พบว่าวัสดุที่ใช้ในการผลิตเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการผลิต เนื่องจากวัสดุบางส่วนเป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำ และยากต่อการควบคุมคุณภาพของวัสดุที่ได้รับจากผู้ผลิต (Supplier) ทำให้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการควบคุมคุณภาพในกระบวนการการผลิต นอกจากนี้แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดที่เป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้ในการผลิตของกระบวนการผลิต มีสมบัติที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิง ซึ่งจำแนกได้ 3 ชนิด ได้แก่ (i) ชนิด FR1 (Phenolic paper) เป็นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นกระดาษ มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น แต่มีข้อเสียที่มีอัตราการทนความร้อนได้ต่ำและปัญหาเรื่องเศษฝุ่นที่ส่งผลกระทบต่อการผลิต (ii) ชนิด FR4 (Woven glass) และ (iii) ชนิด CEM3 (Non-woven glass) ซึ่งชนิด FR4 และ CEM3มีต้นทุนที่สูงกว่า เนื่องจาก มีโครงสร้างหลักเป็นเส้นใยแก้วถักกัน ทำให้ผลิตเป็นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณภาพสูง อย่างไรก็ตามในการผลิตยังประสบปัญหาเรื่องเศษใยเส้นแก้วที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการผลิต ในขณะที่ปัญหาของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR1 ซึ่งเป็นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบาง (Flexible board) ที่มีโครงสร้างหลักทำจากวัสดุที่เป็นพอลิเอไมด์ (Polyamide) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอัตราการทนความร้อนที่ต่ำ การผลิตมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง (Tolerance) และจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมเข้ามาช่วยเพื่อให้สามารถนำเอาแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบาง มาใช้

ในกระบวนการการผลิตได้ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่ใช้แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบาง ในโรงงานอุตสาหกรรมแห่งนี้ เกิดจากการออกแบบโครงสร้างของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ทำให้มีต้นทุนในการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ำ และเลือกใช้วัสดุที่มีต้นทุนที่ต่ำเช่นกัน ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพ ในการผลิตอย่างมาก ดังแสดงใน Fig. 1 อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดปริมาณขยะอันตรายมากขึ้น เนื่องจากของเสียที่เกิดขึ้นมีส่วนประกอบของสารเคมีเจือปนอยู่

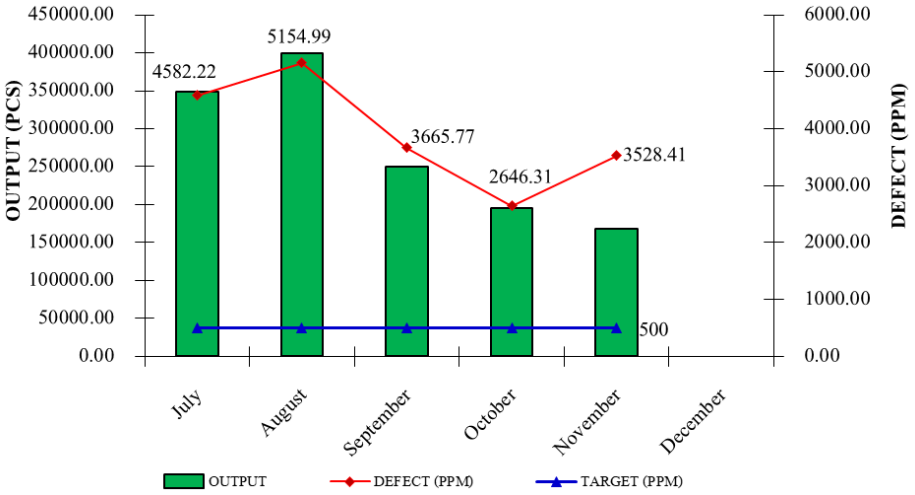


Fig. 1 Defect tendency in PCBA (Flexible Type) production

จาก Fig. 1 แสดงปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการการผลิตเทียบกับปริมาณงานดีที่สามารถผลิตได้ต่อเดือน ซึ่งมีปริมาณของเสียสูงเกินกว่าปริมาณที่สามารถยอมรับได้ โดยที่ลักษณะของงานเสีย (Defect symptom) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงใน Fig. 2

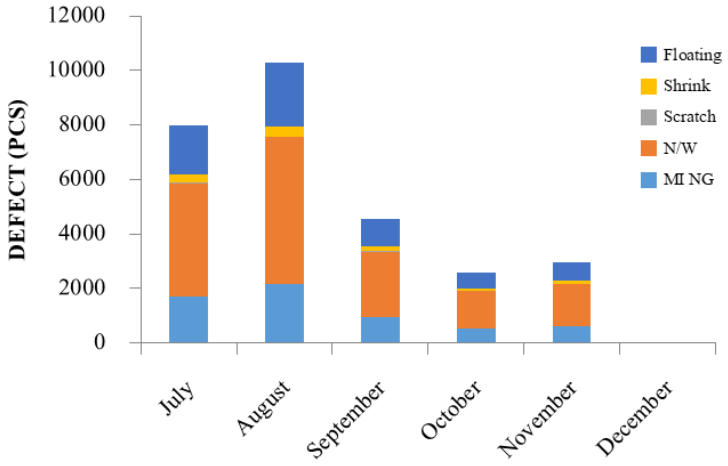


Fig. 2 Defect tendency by separate defect symptom

จากปัญหาดังกล่าว โรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์แห่งนี้จึงต้องปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อลดปริมาณของเสียให้ต่ำกว่า 500 ppm หรือกล่าวว่าในทุกการผลิตสามารถยอมรับให้มีของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตได้ 500 หน่วย ต่อ 1 ล้านหน่วยการผลิต และลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบาง ด้วยการใช้หลักการ

ของซิกซ์ ซิกม่า เพื่อนำไปสู่การลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการการผลิต ด้วยการปรับปรุงกระบวนการผลิต และออกแบบมาตรฐานการทำงานที่สามารถควบคุมความผันผวนที่เกิดขึ้นในการผลิตได้

วิธีการ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการตามวิธีการของซิกซ์ ซิกม่า ที่มีขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ขั้นตอน อาศัยแนวทางปฏิบัติ D-M-A-I-C (สิริกานดา, 2563) ซึ่งสามารถแบ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

1. การศึกษานี้เริ่มจากการกำหนดเป้าหมาย (Define) ของการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยวิธีการ CTQ (Critical to quality) โดย CTQ เป็นหนึ่งในวิธีการของซิกซ์ ซิกม่า ที่ใช้สำหรับระบุเป้าหมายที่ต้องการและปัจจัยที่ผลกระทบต่อเป้าหมายที่ตั้งไว้ เพื่อให้ง่ายต่อการวัดผลการปรับปรุง (ฐิติ, 2553) ดังแสดงใน Fig. 3

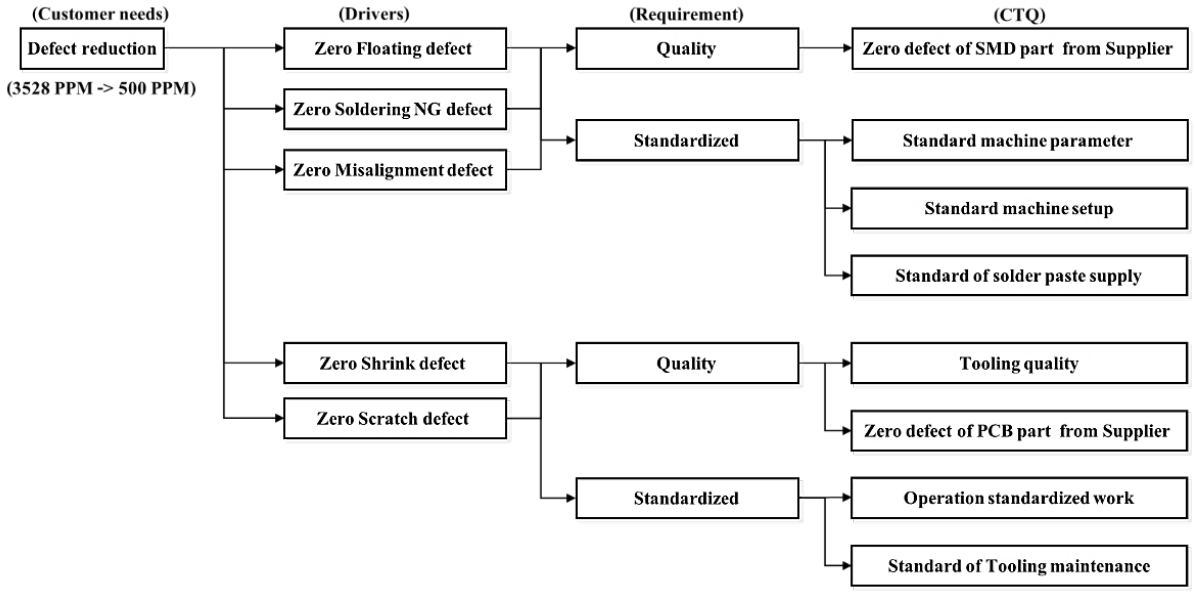


Fig. 3 CTQ (Critical to Quality) by Tree Diagram

จากรายละเอียดของ CTQ ข้างต้น พบว่าปัจจุบันกระบวนการผลิตนี้ มีจำนวนของงานเสีย 3,528 PPM ซึ่งมีเป้าหมายที่จะลดจำนวนของเสียลงให้มีจำนวนต่ำกว่า 500 PPM อีกทั้งยังพบว่างานเสียบางประเภทมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพเหมือนกัน ดังนั้นหากมีการแก้ไขปัญหาอย่างใดอย่างหนึ่งในการผลิต จะส่งผลให้จำนวนของของเสียมากกว่าหนึ่งประเภท มีจำนวนลดลง

2. จากการกำหนดเป้าหมายในขั้นตอนที่ 1 ก่อนเริ่มการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิต จำเป็นต้องตรวจสอบสถานะปัจจุบันของจำนวนของเสียแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นในการผลิตด้วยการแสดงผลแบบพาเรโต (Pareto chart) ดังแสดงใน Fig.4 เพื่อทำให้แน่ใจว่าประเภทของงานเสียแบบไหนที่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนของงานเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตมากที่สุด อย่างไรก็ตามการวัดผลจำเป็นต้องกำหนดวิธีการหรือเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดผล เพื่อให้ได้ผลของการปรับปรุงอย่างถูกต้องและแม่นยำ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุของงานเสียในการผลิต โดยการศึกษานี้ได้นำเอาระบบการติดตามผลการผลิต (Production data monitoring) เข้า

มาใช้สำหรับบันทึกข้อมูลการผลิตในแต่ละวัน ซึ่งข้อมูลดังกล่าว ประกอบด้วย จำนวนงานดี จำนวนงานเสีย และประเภทของงานเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยประเภทของงานเสียที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ประกอบด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกเชื่อมต่อบนแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในลักษณะเอียงหรือตะแครง (Floating), แผ่นวงอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบางมีการหดตัว (Shrink), แผ่นวงอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบางมีรอยขีดข่วน (Scratch), การบัดกรีหรือการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีความไม่สมบูรณ์ (Soldering Failure) และ หลังจากการบัดกรีหรือการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความคลาดเคลื่อน (Misalignment) จากข้อมูลข้างต้นที่ได้จากระบบการติดตามผลการผลิต จะถูกคำนวณด้วยสมการที่ 1

$$\text{Defect (PPM)} = (\text{Quantity of defect} \div \text{Total Quantity of Electronic part}) \times 1{,}000{,}000 \quad (1)$$

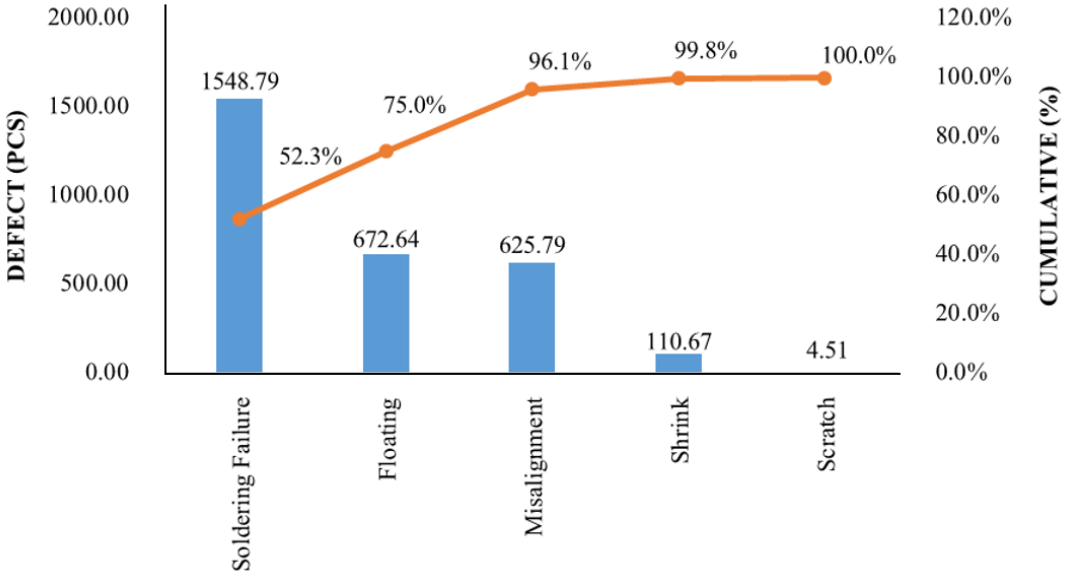


Fig. 4 Current status of Defect ratio by Pareto Chart

3. สำหรับขั้นตอนของการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิต (Analysis) ผู้จัดทำได้นำเอาแผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) เข้ามาใช้สำหรับวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบ (Cause and Effect analysis) ของกระบวนการผลิต ร่วมกับการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของกระบวนการผลิต ด้วยวิธีการ FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) ในเบื้องต้นผู้จัดทำได้เริ่มจากการประชุมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เพื่อทำการประเมินความเสี่ยงในแต่ละขั้นตอนของการผลิตด้วย FMEA โดยผลที่ได้จากการทำ FMEA สามารถช่วยเรียงลำดับความสำคัญของการพัฒนาและปรับปรุงการผลิตด้วยการอ้างอิงผลประเมินของคะแนน RPN (Risk Priority Number) ซึ่งถ้ากระบวนการไหนได้คะแนน RPN สูงสุด จะถูกจัดลำดับให้มีการพัฒนาและปรับปรุงเป็นอันดับแรก (ปาริฉัตร สาน้อย, 2558) และจะต้องทำการระบุแผนการพัฒนาและปรับปรุงการผลิตอย่างชัดเจน เพื่อนำเอาผลที่ได้ตากการพัฒนาและปรับปรุงมาใช้สำหรับทำการประเมินความเสี่ยงใน FMEA อีกครั้ง และคะแนน RPN ต้องลดลงจากการประเมินที่ทำไว้ก่อนมีการพัฒนาและปรับปรุงการผลิต โดยที่คะแนน RPN

ถูกคำนวณจากสามส่วน ประกอบด้วย (i) ความรุนแรง (S: Severity), (ii) โอกาสที่จะเกิดขึ้น และ (iii) ความสามารถในการป้องกัน (ดังแสดงใน Equation 2)

$$RPN = Severity(S) \times Occurrence(C) \times Detection(D) \quad (2)$$

ซึ่งหนึ่งในขั้นตอนของการทำ FMEA จะต้องมีการระดมความคิดของแต่ละหน่วยงาน เพื่อระบุความเป็นไปได้ของสาเหตุที่ทำให้เกิดงานเสียขึ้น ซึ่งผู้จัดทำได้เลือกใช้แผนผังก้างปลา เพื่อทำการระบุปัจจัยที่ทำให้เกิดงานเสียในการผลิต พบว่าแต่ละชนิดของงานเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตนี้ มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบร่วมกัน เช่น (i) คุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Part Quality), (ii) การทำงานของผู้ปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้อง (Wrong operation), (iii) ปริมาณของสารบัดกรีที่ไม่เหมาะกับการผลิต (Solder paste volume), (iv) อุณหภูมิที่ใช้สำหรับบัดกรี (Profile temperature) และ (v) การปรับตั้งค่าเครื่องจักรให้มีความเหมาะสมกับการผลิต (Machine setup error) ดังแสดงใน Fig. 5

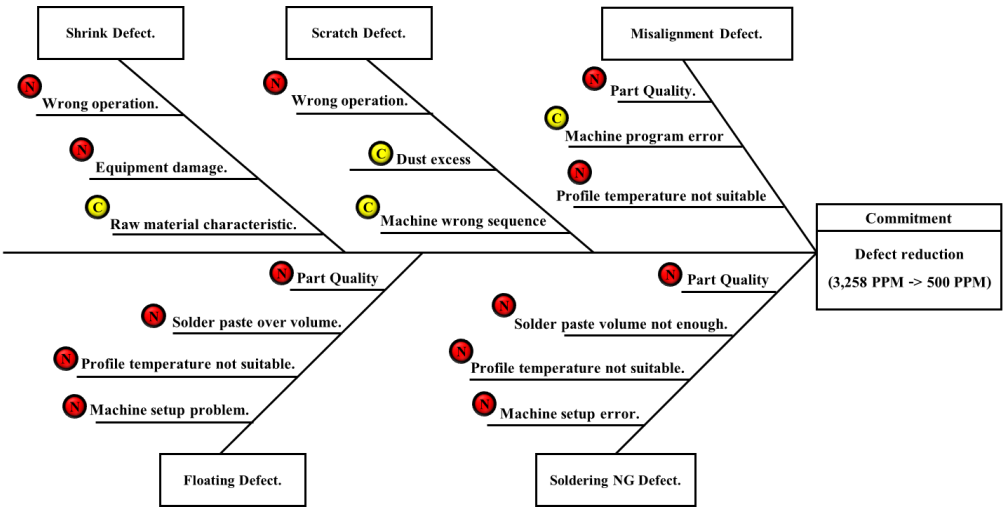


Fig. 5 Fishbone Diagram – Root cause identification

จาก Fig.5 พบว่าสาเหตุใดที่ไม่มีมาตรฐานการทำงานที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการผลิต ถูกระบุสัญลักษณ์ (N) ในทางกลับกัน สาเหตุที่มีมาตรฐานการทำงานหรือการควบคุมคุณภาพการทำงาน จะถูกระบุสัญลักษณ์ (C) เพื่อให้มีความชัดเจนในการวิเคราะห์ รวมไปถึงการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิต

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลังจากทำการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของกระบวนการผลิตเสร็จแล้ว ทางผู้จัดทำได้เริ่มทำการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิต อ้างอิงจากแผนการพัฒนาและปรับปรุง (Recommended Action) จากการทำ FMEA ดังแสดงใน Table. 1 ซึ่งพบว่าสิ่งที่ต้องพัฒนาและปรับปรุงอย่างเร่งด่วน คือกระบวนการที่คะแนน RPN =

480 คะแนน ประกอบด้วย (i) การสร้างมาตรฐานการเติมสารบัดกรีเข้าไปในเครื่องจักร (ii) การสร้างมาตรฐานการปรับตั้งค่าของเครื่องจักร (iii) การแก้ไขปัญหาคุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

(i) การสร้างมาตรฐานการเติมสารบัดกรีเข้าไปในเครื่องจักร (RPN=480) จากการวิเคราะห์และตรวจสอบพบว่าในกระบวนการผลิตไม่ได้มีมาตรฐานการทำงานสำหรับขั้นตอนการทำงานนี้ หลังจากนั้นผู้จัดทำจึงได้ทำการทดลอง เพื่อสร้างมาตรฐานการทำงานใหม่ ซึ่งออกแบบให้มีการตรวจวัดในเชิงปริมาณที่สามารถตรวจสอบด้วยสายตาได้ ดังนั้นปริมาณสารบัดกรีที่เหมาะสมกับการผลิตต้องอยู่ระหว่าง 14.2 – 21.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร

(ii) การสร้างมาตรฐานการปรับตั้งค่าของเครื่องจักร (RPN = 480) จากการวิเคราะห์และตรวจสอบพบว่าการปรับตั้งค่าเครื่องจักร ไม่มีการตั้งค่าที่เป็นมาตรฐานสำหรับการผลิต หลังจากนั้นผู้จัดทำจึงได้ทดลองการปรับตั้งค่าเครื่องจักรและจัดทำเป็นมาตรฐาน อย่างไรก็ตามการปรับตั้งค่าเครื่องจักร อาจจะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้เพิ่มการทำงานของเครื่องจักรที่สามารถตรวจสอบความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติได้ (Poka-yoke)

(iii) การแก้ไขปัญหาคุณภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (RPN=480) เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนหนึ่งที่ถูกนำเข้าจากผู้ผลิตข้างนอก ทำให้ผู้จัดทำต้องทำการวิเคราะห์หาปัญหาที่มาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจึงรายงานต่อผู้ผลิต เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้น หลังจากที่ทำการวิเคราะห์พบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการเคลือบผิวที่มีความหนาต่ำกว่ามาตรฐาน ทำให้ผิวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีคราบสนิม ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับอากาศ (Oxidation) โดยที่มาตรฐานของการเคลือบผิวจะต้องมีความหนาอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร (±0.2) จากกรณีข้างต้น พบว่าความหนาของผิวที่เคลือบบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตร

Table 1 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) for PCBA production process – Before & After Improvement

				Before Improvement							**After Improvement**			
											Action Result			
Items	**Process**	**Potential of Failure Mode**	**Potential Effect of Failure Mode**	**Severity (1-10)**	**Potential Cause of Failure Mode**	**Occurrence (1-10)**	**Current control for prevention**	**Detection (1-10)**	**RPN**	**Recommend Action**	**Severity**	**Occurrence**	**Detection**	**RPN**
1	Solder paste supply	Solder paste volume is insufficient	Soldering Failure	8	No standardized work	6	No control	10	480	Create standard of solder paste supply process	8	1	3	24
2	Solder paste supply	Solder paste volume is over	Soldering Failure	8	No standardized work	6	No control	10	480	Create standard of solder paste supply process	8	1	3	24
3	Solder paste printing	Solder paste volume is insufficient	Soldering Failure	8	Wrong machine parameter setting	6	No control	10	480	Create standard machine parameter	8	1	3	24
4	Solder paste printing	Solder paste is low quality during production time	Soldering Failure	8	No standardized work	4	No control	10	320	Create standard of solder paste quality control during machine running	8	1	2	16
5	Soldering process	Soldering condition is not suitable	Soldering Failure	8	Soldering temperature is not suitable	6	No master condition check	9	432	Create standard of soldering condition	8	1	2	16
6	Soldering process	Soldering condition is not completely	Soldering Failure	8	SMD Part quality is out of specification	6	No inspection	10	480	Control supplier quality	8	1	3	24
7	Soldering process	Soldering condition is not completely	Misalignment	8	SMD Part quality is out of specification	6	No inspection	10	480	Control supplier quality	8	1	3	24
8	Soldering process	Soldering condition is not completely	Floating	8	SMD Part quality is out of specification	6	No inspection	10	480	Control supplier quality	8	1	3	24

สรุป

หลังจากที่มีการนำเอาวิธีการของซิกซ์ ซิกม่า มาใช้พัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดบาง พบว่าสามารถลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในผลิตได้ จากเดิมจำนวนของเสีย 3,258 PPM ลดลงเหลือ 300 PPM โดยนำเอาผลที่ได้จากการทดลองปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของการผลิต มาสร้างเป็นมาตรฐานการทำงานใหม่ รวมไปถึงการสร้างมาตรฐานการปรับตั้งค่าเครื่องจักรให้มีการทำงานที่ถูกต้อง จนนำไปสู่การควบคุมปัจจัยที่มีความเสี่ยงต่อผลกระทบของคุณภาพการผลิต อีกทั้งยังช่วยสร้างแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงการผลิตอย่างต่อเนื่อง บนพื้นฐานของ D-M-A-I-C เพื่อให้เกิดพัฒนาและปรับปรุงอย่างแบบยั่งยืนในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

เอกสารอ้างอิง

ฐิติ บุญประกอบ. 2552. CTQ...เครื่องมือช่วยกำหนดว่า จะต้องอบรมเรื่องอะไร. https://www.tpa.or.th/tpanews/upload/mag_content/23/ContentFile275.pdf, 28 ธันวาคม 2562

ปาริฉัตร สาน้อย. 2558. ออกแบบกระบวนการ ให้มีประสิทธิผลด้วย FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). https://www.ftpi.or.th/2015/2277, 15 มกราคม 2563

สิริกานดา ชินโสตร. 2563. Six Sigma ปรับปรุงธุรกิจอย่างสร้างสรรค์ ปั้นกำไรอย่างยั่งยืน. https://dsp.dip.go.th/th/category/2017-11-27-08-04-02/2020-09-10-10-07-26, 15 ตุลาคม 2563

Thailand 4.0 โมเดลขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน. 2559. http://www.stabundamrong.go.th/web/download/newkm/thailand4.0.pdf, 28 ธันวาคม 2562

การจำลองการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) โดยใช้เทคนิคพัลล์กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

Simulation cooling of a thermoelectric coolers (TEC) by pulse current continuous technique

ณพล ศรีเกษมสุนทร, กันต์พจน์ วงศ์หนองเตย, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์*

Napol Srikasemsuntorn, Kanpoj Wongnongtoey, Taweedej Sirithanapipat*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการจำลองการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) หรือ แผ่นเพลเทียร์ สำหรับกระบวนการ PCR หรือปฏิกริยาลูกโซ่พอลิเมอเลสซึ่งเป็นเทคนิคการเปลี่ยนอุณหภูมิเพิ่มและลดลงอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิที่กำหนดซึ่งจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ากระบวนการในการให้ความร้อนนั้นจะใช้เวลาไม่นานมากนักในการไปยังอุณหภูมิที่ต้องการแต่ในส่วนด้านการทำความเย็นนั้นค่อนข้างใช้เวลานานกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเพิ่มการประสิทธิภาพในการทำความเย็น โดยจำลองในขั้นตอน Annealing ของกระบวนการ PCR ซึ่งต้องลดอุณหภูมิจาก 90 องศาเซลเซียสไปยัง 55 องศาเซลเซียส โดยตัวแปรในการจำลองคือพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้ TEC โดยใช้เทคนิคพัลล์ต่อเนื่อง (Pulse Width Modulation: PWM) ที่กระแสสูงสุด 1 แอมแปร์ และความถี่ PWM เท่ากับ 1 kHz โดยการศึกษาการปรับเปลี่ยนวัฐจักรการทำงาน (Duty Cycle) พบว่าที่ 75% Duty Cycle เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการขับพลังงานไฟฟ้าให้ TEC ในการทำความเย็นโดยจำลองผ่านซอฟต์แวร์โซลิดเวิร์ค เวอร์ชั่น 2019 SP5

คำสำคัญ: โซลิดเวิร์ค, เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, วัฏจักรการทำงาน

Abstract

This paper presenting, the simulation of Thermoelectric cooler or Peltier operation for PCR process which is DNA amplifier technique. PCR technique allows fast heating and rapid cooling in PCR temperature profile. As related literature found in heating process, the temperature can reach required target in a short time. However, in cooling process, the operation time is more than heating process. Thus, this research concentrates to enhance cooling operation in Annealing process of PCR technique that decrease temperature from 90˚C to 55˚C. PWM is using in this research to simulate by adjust Duty cycle base on Maximum current is 1 Ampere and PWM frequency is 1 kHz. We found at 75% duty cycle is the most appropriate setting value for cooling operation by simulate via Solidworks software Version 2019 SP5.

Keywords: CFD, Peltier, Polymerase chain reaction, PWM, Solidworks, TEC, Thermoelectric Coolers

คำนำ

ในปัจจุบันเทคนิคการทำ PCR เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายๆ วงการเช่น การแพทย์, การเกษตร,อุตสาหกรรมเพาะเลี้ยง, นิติวิทยาศาสตร์ โดยเทคนิค PCR ถูกคิดค้นขึ้นโดย Kary Mullis เมื่อปี พ.ศ. 2526โดยกระบวนการ PCR จะมี 3 ขั้นตอนและหมุนเวียนต่อเนื่องกันไป ในสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 Denaturing คือการแยกสายดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบจากสภาพที่เป็นเส้นคู่ให้เป็นเส้นเดี่ยว อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 90– 95 องศาเซลเซียส, ขั้นตอนที่ 2 Annealing คือกระบวนที่ให้ไพรเมอร์เข้าจับกับสายดีเอ็นเอตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ในบริเวณที่เป็นนิวคลีโอไทด์ที่เป็นคู่สมทั้งสองสายอย่างจำเพาะ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50–66 องศาเซลเซียส , ขั้นตอนที่ 3 Extension คือกระบวนการสร้างดีเอ็นเอสายใหม่โดยสังเคราะห์ต่อจากส่วนปลายของไพรเมอร์ (ที่ใส่เข้าไปในขั้นที่สอง) ตามข้อมูลบนดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบแต่ละสายโดยอาศัยการทำงานของเอ็นไซม์ดีเอ็นเอโพลิเมอร์เรส (DNA polymerase) ซึ่งเอนไซม์นี้ทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 72–75 องศาเซลเซียสตลอดทั้งสามขั้นตอนซึ่งจะได้ผลเป็นจำนวณของดีเอ็นเอ ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2^n (n=cycle) ตามที่ต้องการ ดังแสดงใน Fig. 1

โดยในการที่จะทำอุณหภูมิให้เป็นตาม 3 นตอนดังกล่าวนั้นถ้าหากใช้ตัวทำความร้อนแบบธรรมดา (Heater) ก็จะไม่สามารถลดอุณหภูมิลงมาอย่างรวดเร็วได้ ดังนั้น เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) หรือแผ่นเพลเทียร์ จึงเข้ามามีบทบาทกับเทคนิค PCR เนื่องจากว่า คุณสมบัติของ TEC คือสามารถเพิ่มหรือลดระดับอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ดีด้วยความสามารถของ TEC ในด้านการลดระดับอุณหภูมิ (Cooling) ยังสามารถทำอัตราความชัน (Ramp Rate) ได้ยากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating) จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยให้ความร้อนระบายออกได้มากขึ้น เช่น ฮีตซิงค์ (Heatsink) , พัดลม (Fan) และใช้เทคนิคในการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับ TEC เพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิไปถึงค่าที่ต้องการได้ภายในเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการ PCR.

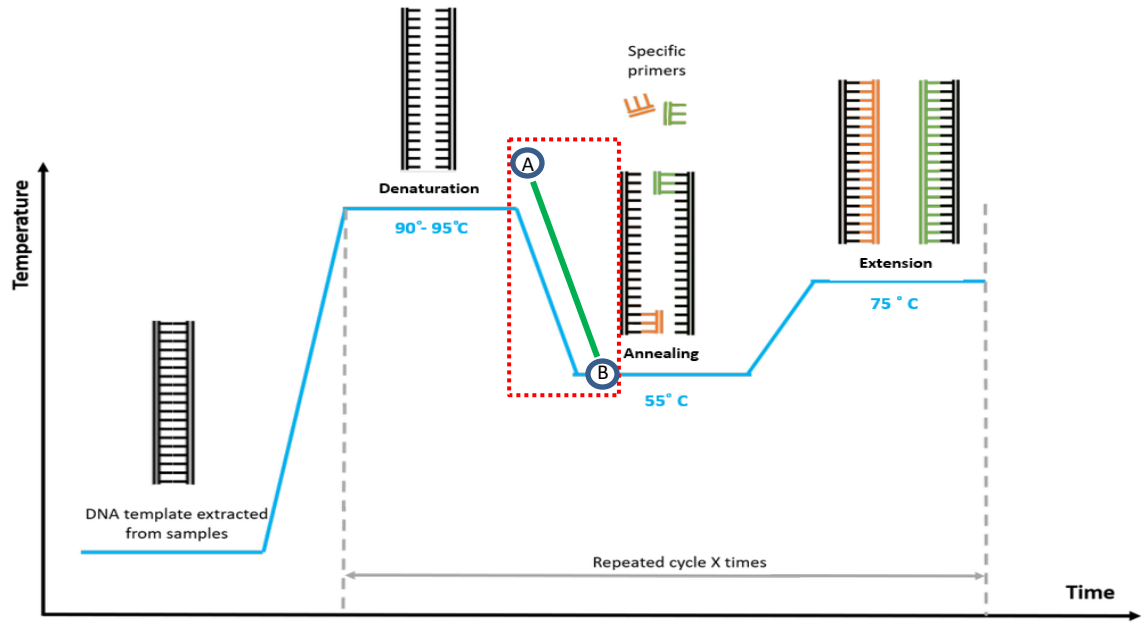


Fig. 1 Temperature profile of PCR

อุปกรณ์และวิธีการ

แผนผังการสร้างโมเดลและการจำลอง

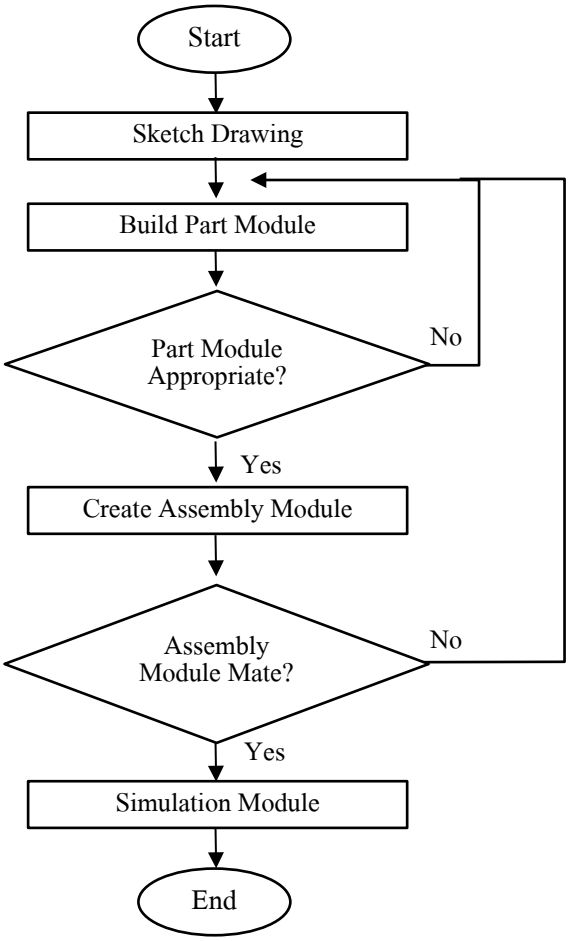


Fig. 2 Design and Simulation Flowchart

การสร้างโมเดลและการจำลองใน SolidWorks จะทำตามขั้นตอนแผงผังดังเช่น Fig. 2 โดยเริ่มจากการ Sketch Drawing จากนั้นทำการสร้างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น (Part Module) และประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน (Assembly Module) จากนั้นจะทำการจำลอง CFD (Computational Fluid Dynamics) เกี่ยวกับถ่ายเทความร้อนโดยการใช้ฟังก์ชั่นของ Flow Simulation ของ Solidworks เวอร์ชั่น 2019 SP05 ดังแสดงใน Fig. 3

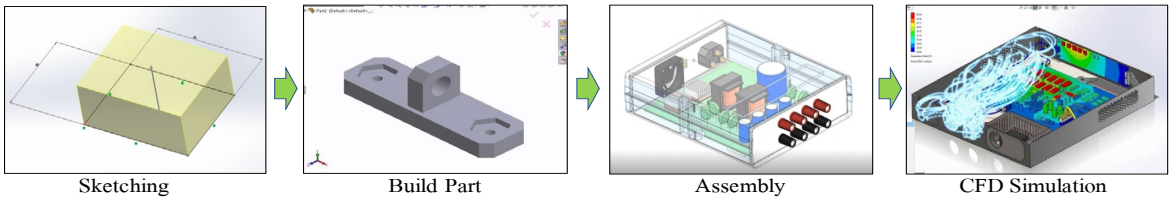


Fig. 3 Design and Simulation sequence

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ขั้นแรกทำการสร้างโมเดลชิ้นส่วนหลักของเครื่อง PCR หรือ Thermal Cycler โดยมีชิ้นส่วนหลักดังต่อไปนี้ แผ่นเพลเทียร์ (TEC) คืออุปกรณ์ที่สามารถสร้างความเย็นได้ที่ด้านหนึ่ง และปล่อยความร้อนออกมายังที่อีกด้านหนึ่งเพียงแค่ทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในแผ่นเพลเทียร์ ซึ่งข้อมูลในการสร้างโมเดลจำลองแผ่นเพลเทียร์นี้จะอ้างอิงจากแผ่นเพลเทียร์ รุ่น TEC-12706, แผ่นทดสอบอุณหภูมิ(Temperature Test Plate) คือแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้วัดอุณหภูมิผลลัพธ์ของระบบ, ฮีตซิงค์ (Heatsink) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการช่วยในการระบายความร้อนของระบบจะช่วยให้แผ่นเพลเทียร์ด้านเย็นสามารถทำความเย็นได้มากขึ้น, พัดลมกระแสตรง (DC Fan) คืออุปกรณ์ที่ช่วยระบายความร้อนโดยใช้หลักการพาความร้อนแบบบังคับและนำชิ้นส่วนมาประกอบรวมกันดังแสดงใน Fig. 4

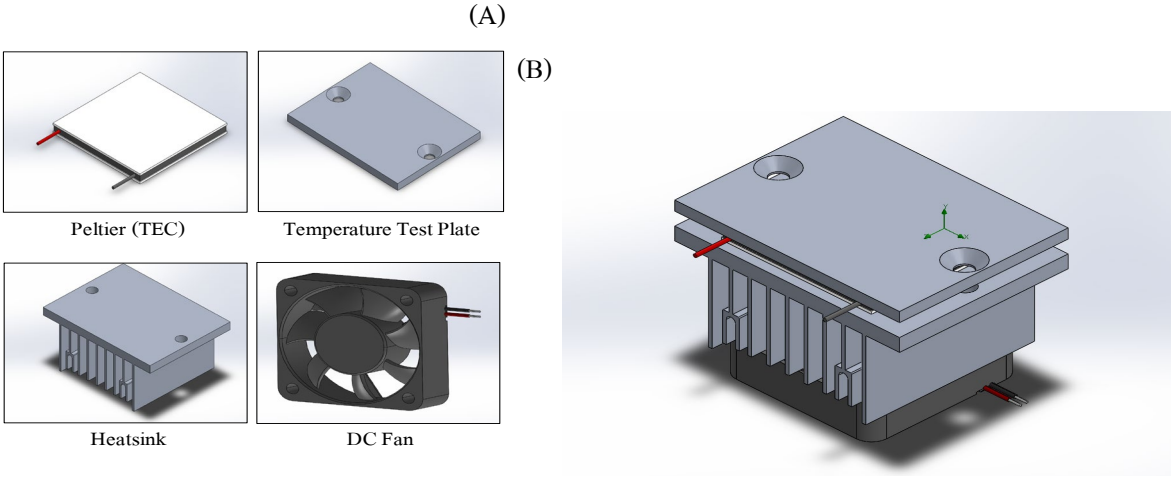


Fig. 4 Thermal Cycler Main component (A), Thermal Cycler Assembly (B)

ในขั้นตอนต่อไปจะทำการจำลอง CFD ผ่าน SolidWorks Flow Simulation Feature โดยเริ่มต้นจะทำการสร้างโปรเจคสำหรับการจำลองด้วยคำสั่งWizard โดยการเลือก Analysis type เป็นแบบ External และทำการเลือกฟังก์ชั่นการวิเคราะห์ โดยให้ทำการเลือกฟังก์ชั่น Heat conduction in solids คือการวิเคราะห์การนำความร้อนในของแข็ง และ Time-dependent คือการวิเคราะห์ข้อมูลแบบขึ้นกับเวลา หลังจากนั้นทำการกำหนดคุณสมบัติชิ้นส่วนของแข็ง (Solid Material) ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Solid Materials property Setting

Component	Material	Density (kg/m3)	Specific Heat (J/kg K)	Thermal Conductivity (W/m K)	Melting Temperature (°C)
Test Plate	Aluminum (6061)	2700	897	202	585
Heat sink	Aluminum (6061)	2700	897	202	585
Ceramic Substrate	Alumina (Al_2O_3)	3890	880	35	2,000

ขั้นตอนต่อไปการตั้งค่าให้กับแผ่นโมเดลแผ่นเพลเทียร์ โดยผ่านฟังก์ชั่น Thermoelectric Coolers โดยใช้ค่าตัวแปรในการตั้งค่าอ้างอิงจากคุณสมบัติของ TEC-12706 ดังแสดงใน Table 2

Table 2 TEC-12706 performance specification

Hot Side Temperature (°C)	25 (°C)	50 (°C)
Heat Pump (Watts)	50	57
Temperature Drop (°C)	66	75
Current (Amps)	6.4	6.4
Voltage (Volts)	14.4	16.4

และทำการเลือกการตั้งค่า Parameter ของการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้ TEC เป็นแบบ Dependency โดยจะทำการจ่ายกระแสเป็นสัญญาณรูปแบบพัลส์ Pulse Width Modulation (PWM) ตามแสดงใน Fig. 5

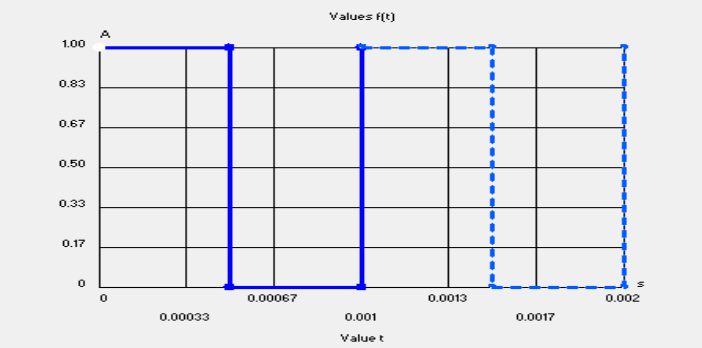


Fig. 5 TEC supply current setting

ขั้นตอนต่อไปทำการตั้งค่า การทำงานของพัดลม (Fan) โดยเลือกการวิเคราะห์เป็นแบบ Internal Inlet Fan หลังจากนั้น ทำการเลือกด้านที่ลมเข้าและด้านที่ลมออกและทำการเลือกรุ่นของ พัดลม ที่ต้องการทำการวิเคราะห์ โดยที่ในการทดลองนี้จะทำการเลือกรุ่น DC Axial Fan 412 ดังแสดงใน Fig. 6

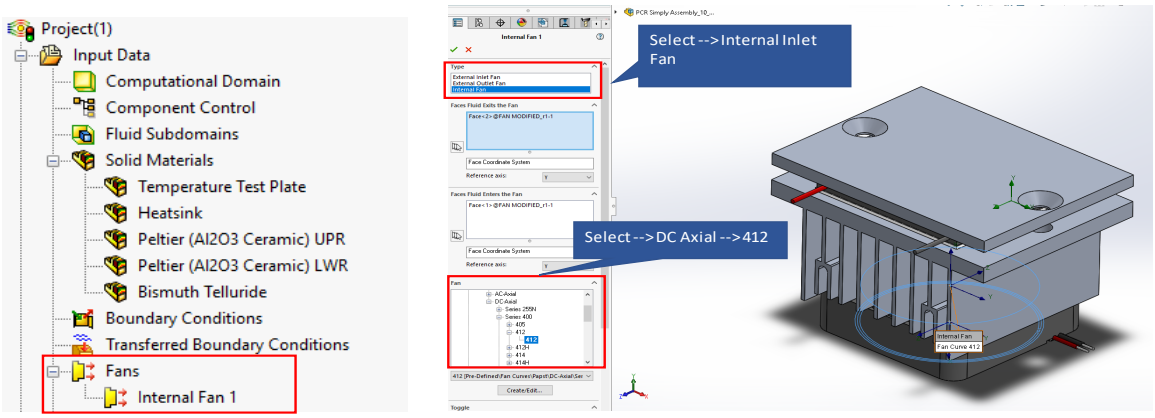


Fig. 6 Fan simulation setting.

จากนั้นจะทำการตั้งค่า Initial Conditions เพื่อจะจำลองการทำความเย็นในช่วงกระบวนการ Annealing ของเทคนิค PCR โดยจะต้องทำการลดอุณหภูมิจาก 90 องศาเซลเซียส ไปยัง 55 องศาเซลเซียส โดยจะทำการตั้งค่า

อุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นทดสอบและอุณหภูมิแผ่นเพลเทียร์ด้านที่ติดกับแผ่นทดสอบที่ 90 องศาเซลเซียสดังแสดง Fig. 7

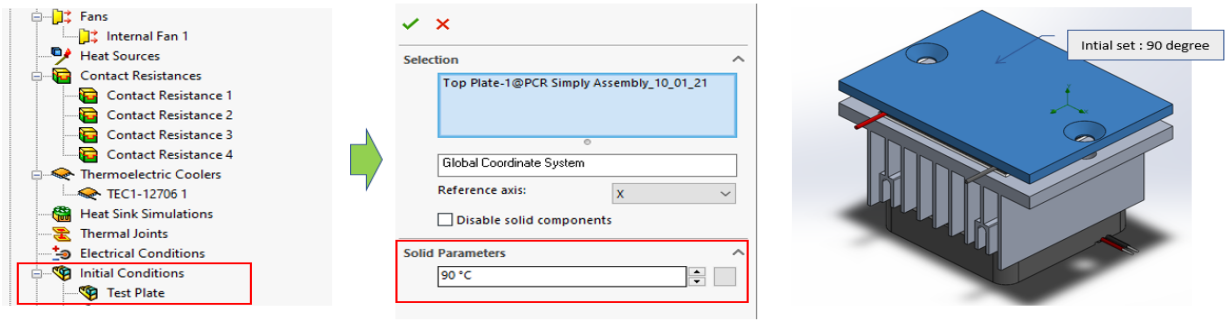


Fig. 7 Initial Conditions setting.

ขั้นตอนต่อไปใช้คำสั่ง Run เพื่อเริ่มทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ โดยซอฟต์แวร์จะทำการสร้าง Mesh เพื่อทำการวิเคราะห์และทำการประมวลผลลัพธ์ ให้รอจนกระทั่งโปรแกรมวิเคราะห์เสร็จ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการจำลองการทำความเย็นของขั้นตอน Annealing ของกระบวน PCR โดยจะทำการลดอุณหภูมิจาก 90 องศาเซลเซียส มาเป็น 55 องศาเซลเซียส และลดจาก 90 องศาเซลเซียส มายัง 20 องศาเซลเซียสโดยจะทำการเปลี่ยนค่า Duty Cycle ของ PWM สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ TEC โดยจะทำการจำลองที่ Duty Cycle ของ PWM เท่ากับ 25%, 50%, 70%, 100% ตามลำดับโดยค่ากระแสสูงสุด (I_{max}) อยู่ที่ 1 Ampere และความถี่ PWM เท่ากับ 1 kHz จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงใน Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Table 3

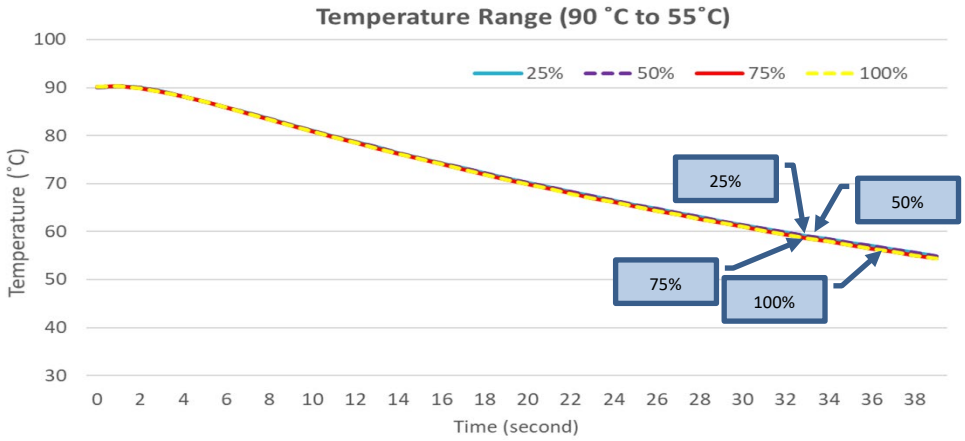


Fig. 8 Result of Cooling Range from 90˚C to 55˚C at PWM duty cycle 25%, 50%, 70%, 100%

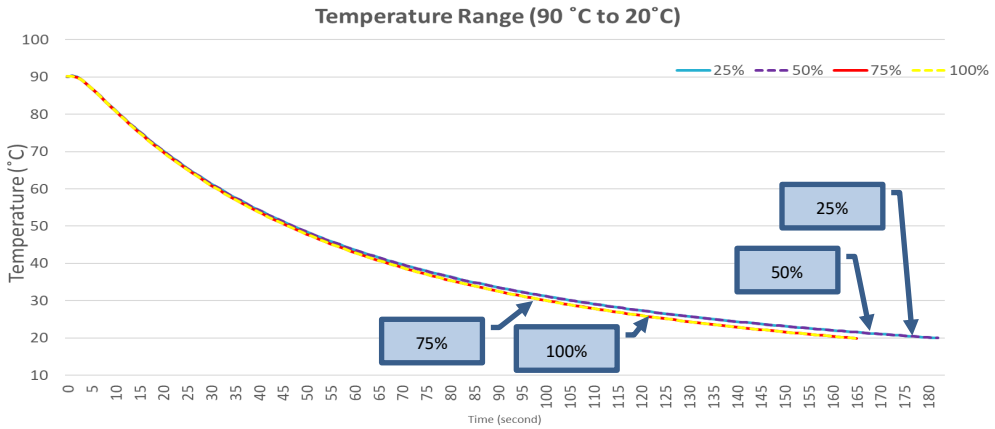


Fig. 9 Result of Cooling Range from 90˚C to 20˚C at PWM duty cycle 25%, 50%, 70%, 100%

(A)

(B)

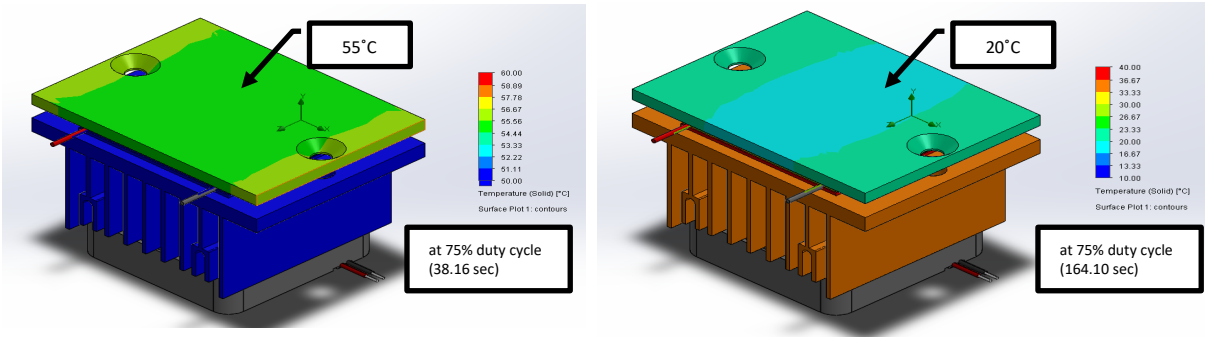


Fig. 10 Temperature contour of Test plate at 75% duty cycle, Range 90˚C to 55˚C (A), Range 90˚C to 20˚C (B)

Table 3 Result of cooling operation time.

Cooling Range (˚C)	Cooling Time (second)			
	25% PWM	50% PWM	75% PWM	100% PWM
90˚C → 55˚C	38.93	38.92	38.16	38.15
90˚C → 20˚C	181.59	181.56	164.10	164.07

สรุป

จากผลลัพธ์ตาม Fig. 8–10 และ Table 3 จะเห็นว่าที่ PWM duty cycle ต่างกันจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิจาก 90 มายัง 55 องศาเซลเซียส ไม่ต่างกันมาก ประมาณ 38 วินาที แต่ในการลดอุณหภูมิจาก 90 มายัง 20 องศาเซลเซียสนั้น ที่ 25% และ 50% duty cycle จะใช้เวลาการ cooling ประมาณ 181 วินาที แต่ที่ 75% และ 100% นั้นทำการ cooling โดยใช้เวลาน้อยกว่า ที่ประมาณ 164 นาที และผลระหว่าง 75% และ 100% duty cycle นั้นมีการใช้เวลา

ในการ cooling ใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าที่ 75% PWM duty cycle เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทำความเย็น โดยงานในอนาคตจะมีการทำการทดลองเพื่อสอบเทียบความถูกต้องผลที่ได้ จากการจำลองต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้หากไม่ได้รับการอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลห้องทดลอง PID Lab คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และทุนสนันสนุนบางส่วนที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กันต์พจน์ วงศ์หนองเตย, ณพล ศรีเกษมสุนทร, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. 2562. การควบคุมอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งด้วยตัวควบคุมพีไอดี ใน: การประชุมวิชาการเครือข่าวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.

วสันต์ จันทร์หยวก. 2559. เทคนิคการใช้งานวิเคราะห์การไหลด้วย SOLIDWORKS Flow Simulation, พิมพ์ครั้งที่ 1 บริษัท บุญกุลการพิมพ์ จำกัด, สมุทรปราการ

อารีย์รัตน์ หนูนวล. 2560. เทคนิค Polymerase chain reaction ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, https://meded.psu.ac.th/binlaApp/class02/B2_364_221/Molecular_genetic_part1/index2.html, 28 มกราคม 2564.

Gholami Pareh, A., Maktabifard, M., Ojaghi Seyed Saran, Z., Torabi, F. 2015. Effect of conjugate heat transfer in designing thermoelectric beverage cooler Energy Equipment and Systems. 3: 83–95. dx.doi.org/10.22059/ees.2015.17028

Piggotta, A.J., Allen, J.S. 2017. Peltier Supercooling with isosceles current pulses: Cooling an object with internal heat generation. ECS J. Solid State Sci. Technol. 6: 250–259.

Chong, K.S. Gan. K.B. 2016. Portable Polymerase Chain Reaction (PCR): Thermal ramping rate performance evaluation. In: IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences. December, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 447–449. doi: 10.1109/IECBES.2016.7843490.

Mani, P.I. 2016. Design, Modeling and Simulation of a Thermoelectric cooler system (TEC). M.Sc. Thesis, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Western Michigan University. Michigan, United States.

สมบัติการลดทอนรังสีแกมมา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้ร่วมกับบิสมัสคลอไรด์

Gamma attenuation, mechanical and physical properties of poly(vinyl chloride)/wood powder/bismuth chloride composites

จริยาภรณ์ รักษ์แก้ว[a]*, เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง[b] , ธีระศักดิ์ หมากผิน[a], ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ[a], เอกชัย วิมลมาลา[a]

Jariyaporn Rakkaew[a]*, Kiadtisak Saenboonruang[b], Teerasak Markpin[a], Narongrit Sombatsompop[a], Ekachai Wimolmala[a]

[a]กลุ่มวิจัย P-PROF คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[b]ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]P-PROF Research Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

[b]Department of Applied Radiation and Isotopes, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: jariyaporn.ra@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้ (WPVC) โดยทำการดัดแปรผงไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซิตริกร่วมกับสารตัวเติมป้องกันรังสีแกมมาชนิดบิสมัทคลอไรด์ ($BiCl_3$) ที่อัตราส่วน $BiCl_3$ กับผงไม้ ที่ 0/100, 30/70 และ 50/50 %wt. ตามลำดับ และนำผงไม้ที่มี $BiCl_3$ ในอัตราส่วนต่าง ๆ เติมในวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ อัตราส่วน 50:50 %wt. ผลของการดัดแปรผงไม้ร่วมกับ $BiCl_3$ พบว่าผงไม้มีสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล (μ_m) เพิ่มขึ้นตามปริมาณ $BiCl_3$ และเมื่อเติมผงไม้ที่ผ่านการดัดแปรในวัสดุเชิงประกอบ พอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่า WPVC มีสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา ค่าความหนาแน่นและความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่มีความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดัดโค้งเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ WPVC ที่สามารถลดทอนความเข้มของรังสีแกมมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการด้านรังสีได้

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบ, สมบัติการลดทอนรังสีแกมมา, สมบัติเชิงกล, รังสี

Abstract

This work aimed to investigate gamma attenuation, mechanical, and physical properties of wood/ poly(vinyl chloride) (WPVC), of which the wood powder was modified using sodium hydroxide, citric acid and a gamma protective filler, namely bismuth chloride ($BiCl_3$), with ratios of $BiCl_3$/wood powder (%wt.) varied at 0/100, 30/70 and 50/50, respectively. The modified wood and PVC ratio used was fixed at 50:50 %wt. The results indicated that the modified wood powder with the addition of $BiCl_3$ exhibited higher mass attenuation coefficients (μ_m) than neat wood powder, with the μ_m values increased with increasing $BiCl_3$ contents. Furthermore, the addition of the modified wood powder in poly(vinyl chloride) resulted in increases of gamma shielding abilities, densities, and surface hardness but oppositely led to a decrease in impact strength of the composites. The results also revealed that there was no significant change in flexural strengths after the addition of modified wood powder. The overall outputs of this work indicated the high gamma attenuation abilities of the developed composites that could be utilized as gamma-shielding materials in radiology.

Keywords: gamma attenuation, materials composites, mechanical properties, radiation

คำนำ

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงรูปแบบหนึ่ง ที่มีการแพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (นวล ฉวี , 2547) ซึ่งในปัจจุบันรังสีแกมมามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มขึ้น โดยสามารถนำรังสีแกมมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีก่อไอออนพลังงานสูง เมื่อเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่สูงเกินกว่าที่กำหนด อาจส่งผลเสียต่อร่างกายของผู้ปฏิบัติงานได้ ทั้งนี้การปฏิบัติงานทางด้านรังสีของเจ้าหน้าที่ ควรได้รับปริมาณรังสีในขณะปฏิบัติงานให้น้อยที่สุด แต่ยังคงสามารถปฏิบัติงานให้บรรลุผลสำเร็จตามที่ต้องการได้ ซึ่งเป็นไปตามหลักการความปลอดภัยด้านรังสีที่ เรียกว่า As Low As Reasonably Achievable (ALARA) โดยมีองค์ประกอบหลัก 3 ประการ ได้แก่ เวลา ระยะทาง และวัสดุกำบังรังสี ทั้งนี้ ในส่วนของเวลาและระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับผู้ปฏิบัติงานนั้น เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนล่วงหน้าก่อนมีการปฏิบัติงานจริง ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีการใช้วัสดุกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับลักษณะงาน เพื่อให้การปฏิบัติงานมีความปลอดภัยตามที่ต้องการ

ในกรณีของวัสดุกำบังรังสีแกมมานั้น ปัจจุบันใช้วัสดุแผ่นตะกั่วถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากตะกั่วมีเลขอะตอมและความหนาแน่นที่สูง ซึ่งทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมาได้ดี อย่างไรก็ตาม ฝุ่นจากผงตะกั่วที่เกิดขึ้นทั้งในขั้นตอนการผลิตและการใช้งาน อาจส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ภายในร่างกายของผู้ปฏิบัติงานได้ (Hyun et al., 2016) ดังนั้นในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาวัสดุกำบังรังสีแกมมาที่ไม่ใช้ตะกั่ว โดยนำธาตุหรือสารประกอบที่มีเลขอะตอม และความหนาแน่นสูงชนิดอื่นที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน แต่ยังคงไว้ซึ่งความสามารถในการลดทอนความเข้มของรังสีแกมมาได้เทียบเท่าหรือสูงกว่าตะกั่ว ได้แก่ บิสมัท ทังสเตน หรือเหล็ก เป็นต้น (Asari Shik et al., 2018) ปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ หรือยางเอทธิลีน โพรพิลีนไดอีน ผสมกับธาตุชนิดอื่นแทนตะกั่วเพื่อเพิ่มความสามารถในการกำบังรังสีแกมมา (Asari Shik et al., 2018; Güngör et al., 2018; Jamil et al., 2019) สมบัติการลดทอนรังสีแกมมา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่ผสมผงไม้เป็นสารตัวเติมหลัก หรือเรียกว่า Wood Poly (vinyl chloride); WPVC ที่มีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง รับแรงดัดโค้งได้ดี ทนทานต่อความชื้นและสภาพแวดล้อมที่ดี จึงสนใจนำมาใช้งานด้านวัสดุตกแต่งภายในห้องที่มีการปฏิบัติงานด้านรังสี แต่พบว่าวัสดุ WPVC ไม่สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ จากคุณสมบัติของผงไม้ที่ภายในมีความเป็นรูพรุน ลักษณะเป็นเส้นใยมีองค์ประกอบของเซลลูโลสเป็นหลัก ภายในโครงสร้างเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับความชื้น และไอออนของโลหะในสารละลาย เช่น แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล สังกะสี และทองแดง ได้เป็นอย่างดี (Sciban et al., 2006)

ดังนั้น งานวิจัยนี้สนใจถึงกลไกของกระบวนการดูดซับไอออนของโลหะในสารละลายของผงไม้ ด้วยวิธีการดัดแปรผงไม้ทางเคมี โดยเติมร่วมกับสารตัวเติมป้องกันรังสีแกมมาชนิดบิสมัทคลอไรด์ (รูปแบบสารละลาย) ผสมลงในวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีต่อสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แผ่นกำบังรังสีแกมมา ที่นำไปใช้งานในห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านรังสี

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ผงไม้ยางพารา ขนาดไม่เกิน 250 μm สารเคมีที่ใช้ปรับพื้นผิวผงไม้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จาก QRëC ประเทศนิวซีแลนด์ และกรดซิตริก ($C_6H_8O_{10}$) จาก Elago Enterprlses Pty Ltd ประเทศออสเตรเลีย สารตัวเติมบิสมัทคลอไรด์ ($BiCl_3$) จาก Shanghai Ruizheng Chemical Technology Co., Ltd. Shanghai ประเทศจีน ตัวทำละลายอะซิโตน (C_3H_6O) จาก EMSURE®, Germany สารคู่ควบไซเลนชนิด N - 2(aminoethyl) - 3 - aminopropyl trimethoxysilane (KBM603) จาก Shin-Etsu ประเทศญี่ปุ่น และพอลิไวนิลคลอไรด์คอมปาวด์ (PVC compound) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท วี.พี. วู๊ด จำกัด ประเทศไทย

การเตรียมปรับพื้นผิวผงไม้

การเตรียมผงไม้ที่ปรับพื้นผิว เริ่มจากคัดขนาดผงไม้ด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช (ไม่เกิน 250 μm) อบผงไม้ในตู้อบเพื่อขจัดความชื้น ที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแช่ผงไม้ใน 0.1 M NaOH (อัตราส่วนของผงไม้ต่อ NaOH เท่ากับ 1:20 %wt.) และกวนผสมที่ความเร็วรอบ 150 rpm เวลา 2 ชั่วโมง ต่อจากนั้นล้างผงไม้ด้วยน้ำกลั่นและอบผงไม้ อุณหูมิ 80°C เวลา 48 ชั่วโมง ต่อจากนั้นแช่ผงไม้ใน 1M $C_6H_8O_{10}$ (อัตราส่วนของผงไม้ต่อ $C_6H_8O_{10}$ เท่ากับ 1:7 %wt.) ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 4 ชั่วโมง ทำการล้างผงไม้ด้วยน้ำกลั่น และอบผงไม้ ที่อุณหูมิ 80°C เวลา 48 ชั่วโมง ต่อจากนั้นแช่ผงไม้ที่ปรับพื้นผิวในสารละลาย C_3H_6O 700 ml ร่วมกับสารตัวเติม $BiCl_3$ ที่อัตราส่วน $BiCl_3$ / ผงไม้ เท่ากับ 0/100, 30/70 และ 50/50 %wt. ทุกสัดส่วน เวลา 4 ชั่วโมง ล้างผงไม้ด้วยน้ำกลั่นและอบผงไม้ที่ 80°C เวลา 48 ชั่วโมง และตรวจสอบคุณลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer: BET) และหมู่ฟังก์ชันของผงไม้ (Fourier-transform infrared spectroscopy: FTIR)

การเตรียมผสมและขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

ผสมผงไม้กับสารคู่ควบไซเลนชนิด KBM603 0.5 %wt. ของผงไม้ ผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High speed mixer) รุ่น LMXS บริษัท LAB TECH Engineering จำกัด เป็นเวลา 5 นาที อบผงไม้ที่ 80°C เวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการหลอมผสมผงไม้กับ PVC ที่ปริมาณ 50:50 %wt. ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น CTW 1000 C บริษัท Haake Rheomax จำกัด ประเทศเยอรมนี อุณหภูมิการผสมจากบริเวณ Feed zone ถึง Die zone ที่ 140, 150, 160 และ 165°C ตามลำดับ ความเร็วรอบการผสมที่ 60 rpm ทำการตัดเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ต่อจากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ได้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยแรงดัน (Hot compression molding) รุ่น LG-20M บริษัท LAB TECH Engineering ประเทศไทย ที่อุณหภูมิ 170°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 50 kg/cm^2 เป็นเวลา 3 นาที เพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์เป็น 150 kg/cm^2 เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็น (Cooling) ที่อุณหภูมิ 25°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 150 kg/cm^2 เป็นเวลา 5 นาที

การทดสอบการลดทอนรังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบการลดทอนรังสีแกมมาโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี (Source) ชนิดซีเซียม-137 (Cs-37) ที่พลังงาน 662 keV โดยตรวจวัดรังสีแกมมาทั้งหมด 10 ซ้ำต่อหนึ่งสัดส่วน ตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรง

กระแทก (Notch impact strength) โดยทำรอยบากที่กลางชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 ตรวจสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ตามมาตรฐาน ASTM D790-10 ด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น Autograph AG-I บริษัท Shimadzu จำกัด ทดสอบความแข็ง (Shore D) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness durometer) รุ่น GS-719G บริษัท Teclock จำกัด ประเทศญี่ปุ่น และตรวจสอบความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน ASTM D792-13

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการปรับพื้นผิวของผงไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซิตริก

การศึกษาคุณลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของผงไม้ ก่อนและหลังการปรับพื้นผิวด้วยด่าง NaOH ร่วมกับกรด $C_6H_8O_{10}$ แสดงใน Table 1 พบว่า ผงไม้หลังจากการปรับพื้นผิว มีพื้นที่ผิว (Surface area) ค่าเฉลี่ยปริมาตรของรูพรุน (Average volume of pores) และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (Average pores diameter) มากกว่าก่อนการปรับพื้นผิวผงไม้ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับผิวทางเคมี ด้วย NaOH สามารถสลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างลิกนินและเซลลูโลส และสลายไขมันบนผิวของเซลลูโลส (Sciban et al., 2006) ทำให้พื้นผิวผงไม้มีความขรุขระ รูพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของผงไม้ได้มากขึ้น

Table 1 Surface area, pore volume and pore size of wood particle and NaOH and $C_6H_8O_7$ treated wood particle

Surface characteristic of wood flour particles	Unit	Wood particle	NaOH and $C_6H_8O_7$ treated wood particle
Surface area	m^2/g	**1.8657**	**1.9225**
- Adsorption cumulative surface area of pores 1.7 - 300 nm diameter		1.8806	1.9092
- Desorption cumulative surface area of pores 1.7 - 300 nm diameter		1.9604	2.0219
Pore volume	cm^2/g		
- Adsorption cumulative volume of pores 1.7 - 300 nm diameter		0.004058	0.004523
- Desorption cumulative volume of pores 1.7 - 300 nm diameter		0.003236	0.003640
Pore size	nm		
- Adsorption average pore diameter		8.6309	9.4757
- Desorption average pore diameter		6.6020	7.2020

ส่วนการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบผงไม้ก่อน และหลังปรับพื้นผิวด้วยด่าง NaOH ร่วมกับกรด $C_6H_8O_{10}$ แสดงดัง Fig. 1 พบว่า เปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (Transmittance) ของผงไม้หลังปรับพื้นผิวที่เลขคลื่น (Wavenumber) ช่วง 1700–1750 cm^{-1} เป็นช่วงของกลุ่มคาร์บอนิล (หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิก: C=O ที่มาจากกรด) น้อยกว่าผงไม้ก่อนปรับพื้นผิว เนื่องจากการปรับสภาพด้วยกรด $C_6H_8O_{10}$ สามารถเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิก ทั้งนี้เป็นผลจากการทำปฏิกิริยาของผงไม้กับกรด $C_6H_8O_{10}$ โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ที่เปลี่ยนแปลงจากไฮดรอกซิล (-OH) เป็นคาร์บอนิล การที่ผงไม้มีหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิกเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มไอออนลบให้ผงไม้ ทำให้ผงไม้มีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกของโลหะหนัก

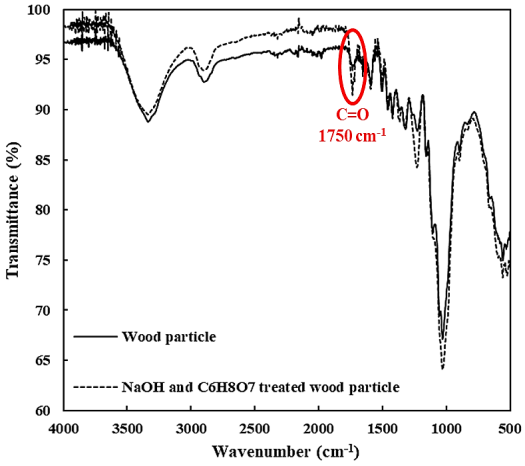


Fig. 1 Comparison of the FTIR spectra of wood particle and NaOH and $C_6H_8O_7$ treated wood particle

ผลของการลดทอนรังสีแกมมาของผงไม้ที่ผ่านการแช่ในสารละลายอะซิโตนร่วมกับบิสมัทคลอไรด์

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบของผงไม้ที่ผ่านการแช่ในสารละลายอะซิโตนร่วมกับบิสมัทคลอไรด์ แสดงดัง Fig. 2 พบว่า ผงไม้ที่ผ่านการแช่ในสารละลายปรากฏเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านที่เลขคลื่น 520 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงของพันธะ Bi-O ในขณะที่ผงไม้ที่ไม่ได้ผ่านการแช่ในสารละลายไม่ปรากฏความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากการล้างผงไม้ที่ผ่านการแช่ในสารละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีความเป็นกลาง (pH เท่ากับ 7) ส่งผลทำให้สาร Bi เปลี่ยนรูปจากบิสมัทคลอไรด์ ($BiCl_3$) เป็นบิสมัทออกซีคลอไรด์ (BiOCl) และสามารถล้างกรด HCl ที่เกิดขึ้นได้ แสดง Equation 1

$$BiCl_3 + H_2O \rightarrow BiOCl + 2HCl \quad (1)$$

การศึกษาการลดทอนรังสีแกมมา สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงมวล (Mass attenuation coefficient: μ_m) ของผงไม้ที่ผ่านการแช่ในสารละลาย อัตราส่วน $BiCl_3$ / ผงไม้ เท่ากับ 0/100, 30/70 และ 50/50 %wt. แสดงดัง Fig. 3 พบว่า เมื่อปริมาณบิสมัท (Bi) เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ผงไม้มีสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงมวลเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของสาร Bi ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมสาร Bi ทำให้รังสีแกมมาสามารถเกิดอันตรกิริยาและการถ่ายโอนพลังงานให้กับอะตอมของ Bi ได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านชิ้นงานมีค่าลดลง

ผลของการลดทอนรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้ (WPVC)

การศึกษาการลดทอนรังสีแกมมา แสดงถึงสัมประสิทธิการลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient: μ) และความหนาวัสดุที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลง 50% จากความเข้มรังสีเริ่มต้น (Half value layer: HVL) ของวัสดุเชิงประกอบผงไม้ผสม PVC ที่อัตราส่วน $BiCl_3$ / ผงไม้ เท่ากับ 0/100, 30/70 และ 50/50 %wt. และผสม PVC ที่อัตราส่วน PVC : ผงไม้ เท่ากับ 50:50 %wt. แสดงดัง Fig. 4 พบว่า เมื่อปริมาณของสาร Bi เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของสาร Bi ที่เพิ่มขึ้น และความหนาวัสดุที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลง 50 % จากความเข้มรังสีเริ่มต้นลดลง เนื่องจากการเติมสาร Bi ทำให้รังสีแกมมาสามารถเกิด อันตรกิริยาและเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้กับอะตอมของ Bi ได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านชิ้นงานมีค่าลดลง ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมาได้ดี

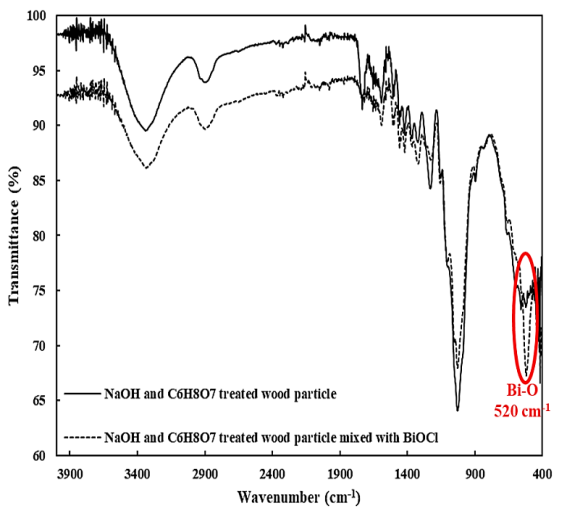


Fig. 2 FTIR spectra of NaOH and $C_6H_8O_7$ treated wood particle and NaOH and $C_6H_8O_7$ treated wood particle mixed with BiOCl at 50:50 %wt

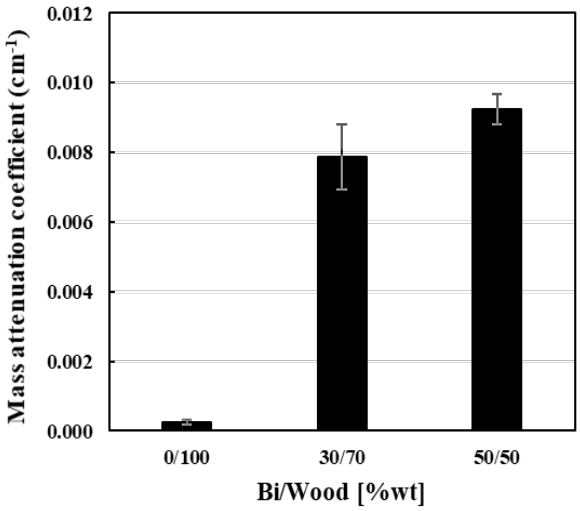


Fig. 3 Effects of Bi/Wood variation on mass attenuation coefficient

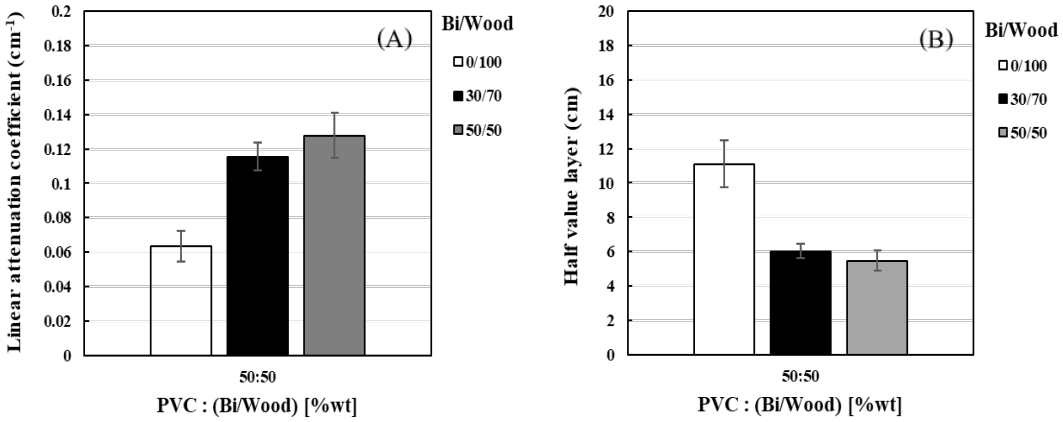


Fig. 4 Effects of PVC: (Bi/Wood) variation on linear attenuation coefficient (A) and half value layer (B)

ผลทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้ (WPVC)

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ ตรวจสอบความต้านทานแรงกระแทก (Notch impact strength) ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ความแข็ง (Hardness) ความหนาแน่น (Density) ของวัสดุเชิงประกอบผงไม้ผสม PVC ที่อัตราส่วน $BiCl_3$ / ผงไม้ เท่ากับ 0/100, 30/70 และ 50/50 %wt. และผสม PVC ที่อัตราส่วน PVC : ผงไม้ เท่ากับ 50:50 %wt. แสดงดัง Fig. 5 (A–D) พบว่า เมื่อปริมาณ Bi เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความต้านทานแรงกระแทกลดลง เนื่องจากการเติมสาร Bi ทำให้ความเข้ากันระหว่างผงไม้และวัสดุเชิงประกอบ PVC ลดลง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความต้านทานแรงกระแทกลดลง ความต้านทานแรงดัดโค้งไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนความแข็งและความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสาร Bi ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม Bi ซึ่งเป็นธาตุที่มีความหนาแน่นสูง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งและความหนาแน่นโดยรวมเพิ่มขึ้น

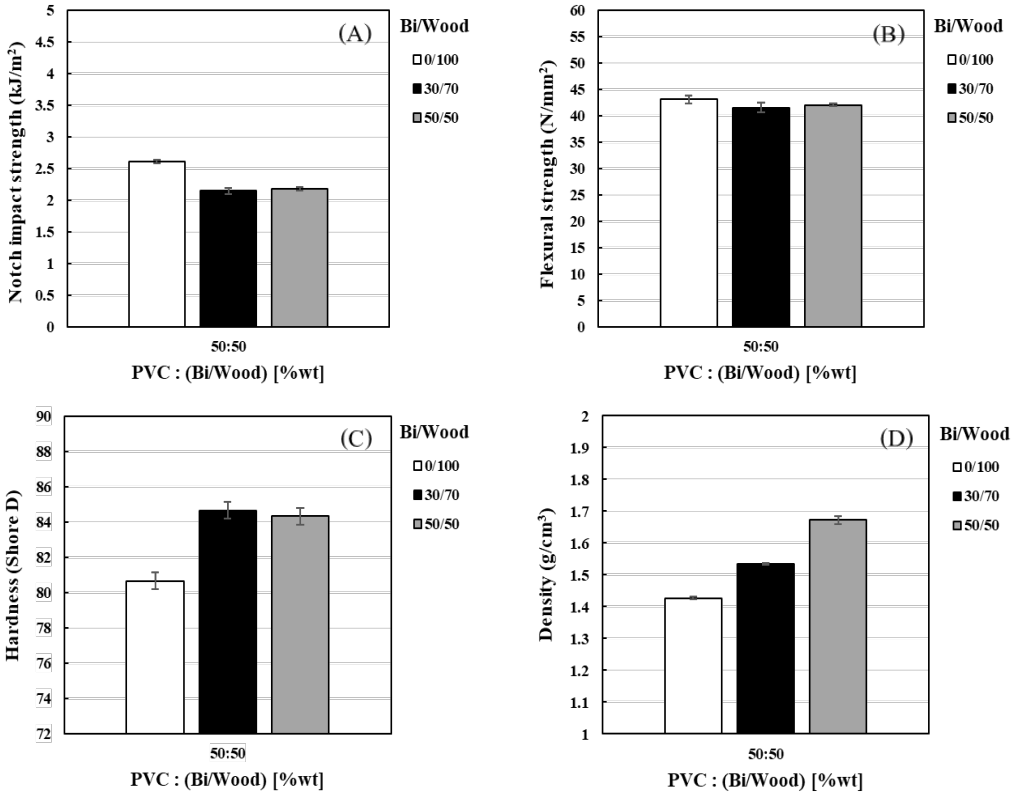


Fig. 5 Effects of PVC: (Bi/Wood) variation on notch impact strength (A), flexural strength (B), hardness (C) and density (D)

สรุป

1. การปรับพื้นผิวของผงไม้ด้วยด่าง NaOH และกรด $C_6H_8O_{10}$ ทำให้พื้นที่ผิวมีค่าเฉลี่ยปริมาตรของรูพรุน ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิกของผงไม้เพิ่มขึ้น

2. การแช่ผงไม้ในสารละลาย C_3H_6O ร่วมกับ $BiCl_3$ ทำให้ผงไม้มีสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงมวลเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของสาร $BiCl_3$ ที่เพิ่มขึ้น

3. การผสมผงไม้ที่เติมสารบิสมัทกับวัสดุเชิงประกอบ PVC ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของสารบิสมัทที่เพิ่มขึ้น และความหนาวัสดุที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลง 50 % จากความเข้มรังสีเริ่มต้นลดลง

4. วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติความต้านทานแรงกระแทกลดลง ความแข็งและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของสารบิสมัทที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดัดโค้งเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

5. อัตราส่วน $BiCl_3$ / ผงไม้ เท่ากับ 50/50 %wt. เหมาะสมสำหรับผลิตวัสดุเชิงประกอบลดทอนรังสีแกมมาพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้ร่วมกับบิสมัสคลอไรด์

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย แผนงานพัฒนาบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาโท ประจำปีงบประมาณ 2563 จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และบริษัท วี.พี. วู้ด จำกัด สนับสนุนวัสดุและสารเคมีในการวิจัย และสถาบัน*เทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ* (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบทางด้านรังสี

เอกสารอ้างอิง

นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. 2547. พลังงานนิวเคลียร์เพื่อมนุษยชาติ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Asari Shik, N., Gholamzadeh, L. 2018. X-Ray shielding performance of the EPVC composites with micro- or Nanoparticles of WO_3, PbO or Bi_2O_3. Appl. Radiat. Isot. 139: 61–65.

Güngör, A., Akbay, İ.K., Ya**Ş**ar, D., Özdemir, T. 2018. Flexible X/Gamma ray shielding composite material of EPDM rubber with bismuth trioxide: Mechanical, thermal investigations and attenuation tests. Prog. Nucl. Energy. 106: 262–269.

Hyun, S.J., Kim, K.J., Jahng, T.A., Kim, H.J. 2016. Efficiency of lead aprons in blocking radiation - How Protective Are They? Heliyon. 2: e00117.

Jamil, M., Hazlan, M.H., Ramli, R.M., Noor Azman, N.Z. 2019. Study of Electrospun PVA-Based Concentrations Nanofibre Filled with Bi_2O_3 or WO_3 as Potential X-Ray Shielding Material. Radiat. Phys. Chem. 156: 272–282.

Sciban, M., Klasnja, M., Skrbic, B. 2006. Modified softwood sawdust as adsorbent of heavy metal ions from water. J. Hazard. Mater. 136: 266–271.

ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงผสมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วมระหว่างนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารเอชพีคิวเอ็ม

Antibacterial performance and mechanical properties of recycled high density polyethylene containing co-antibacterial agent between nano-ZnO and HPQM

เพิ่มพล เสียงดัง[a]*, รัฐโรจน์ อัครธนกุลกิตติ์[b], เอกชัย วิมลมาลา[a], ธีระศักดิ์ หมากผิน[a], ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ[a]

Phoempon Siangdang[a]*, Rattaroj Akkarathanakulkit[b], Ekachai Wimolmala[a], Teerasak Markpin[a], Narongrit Sombatsompop[a]

[a]กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[b]บริษัท เอส.พี. พลาสติก อินดัสตรี จำกัด กรุงเทพมหานคร 10140

[a]Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

[b]S.P. Plastic Industries Co., Ltd, Bangkok 10140, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: phoempon.ft@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง (rHDPE) ที่ผสมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วมระหว่างนาโนซิงค์ออกไซด์ (Nano-ZnO) กับเอชพีคิวเอ็ม (2-hydroxypropyl-3-piperazinyl-quinoline carboxylic acid methacrylate; HPQM) ปริมาณ 0–8 pph โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารเอชพีคิวเอ็ม ทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ด้วยเทคนิคการวัดรัศมียับยั้งแบคทีเรีย และตามมาตรฐาน JIS Z2801 ทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D638 ผลการศึกษาพบว่า การเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณ 0.03 กรัม ในสารละลายเอชพีคิวเอ็ม 30 มิลลิลิตร ค่า pH 9.0 ปั่นผสมเวลา 60 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดร้อยละ 65.80 และการเติมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วมที่ 6 pph สามารถยับยั้งแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ได้ทั้ง 2 ชนิด ส่วนสมบัติมอดุลัสแรงดึงและการต้านทานแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม ในขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง

คำสำคัญ: นาโนซิงค์ออกไซด์, ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย, พลาสติกรีไซเคิล, สารเอชพีคิวเอ็ม

Abstract

This work aimed to investigate the antibacterial performance and mechanical properties of recycled high density polyethylene (rHDPE) containing co-antibacterial agent between nano-ZnO and 2-hydroxypropyl-3-piperazinyl-quinoline carboxylic acid methacrylate (HPQM) content at 0-8 pph. The antibacterial performance against *E. coli* and *S. aureus*, with JIS Z2801 technique and mechanical properties with ASTM D638 of rHDPE containing co-antibacterial agents were investigated. It was found that the addition of 0.03 g nano-ZnO mixed with 30 mL of solution HPQM, stirred at pH 9.0 for 60 minute, provided high absorption efficiency up to 65.80%. According to the antibacterial performance against both of *E. coli* and *S. aureus*, the recommended dosage of the co-antibacterial agent was 6 pph. The addition of co-antibacterial agent in rHDPE was found to increase the tensile modulus and tensile strength properties, but decrease the elongation at break of rHDPE.

Keywords: antibacterial performance, Plastic recycled, HPQM, nano-ZnO

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณขยะพลาสติก 2.7 ล้านตันต่อปี ซึ่งขยะส่วนมากตกค้างในสิ่งแวดล้อมที่ ไม่ถูกกำจัดอย่างถูกวิธี (BLT Bangkok, 2019) การนำกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลเป็นหนึ่งในวิธีการที่ลดปริมาณขยะพลาสติก ด้วยสมบัติของเทอร์โมพลาสติกของขยะพลาสติกที่สามารถหลอมขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ จากข้อมูลรายงานประเภทของพลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล พบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีปริมาณการนำไปรีไซเคิลสูงสุด รองลงมาเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ตามลำดับ (Special Chem, 2017) พอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงสามารถนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น ถังน้ำ แกลลอน กะละมัง และตะกร้า เป็นต้น การใช้งานบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวอาจมีสิ่งปนเปื้อนจากเชื้อโรคหรือแบคทีเรีย ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยต่อผู้บริโภค การพัฒนาวัสดุที่ใช้งานบรรจุภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้มีสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียจึงเป็นสิ่งน่าสนใจอย่างยิ่ง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีการนำสารยับยั้งแบคทีเรียชนิดเอชพีคิวเอ็มผสมกับพอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน โดยพบว่า สารเอชพีคิวเอ็มสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบได้ดี (*E. coli*) แต่มีการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) ได้น้อย (อาทิตย์ และคณะ, 2558) และพบว่า สารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีกับแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ (Li, S.-C., และ Li, Y.-N., 2010) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาประสิทธิภาพการเติมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม (Co-antibacterial) ระหว่างนาโนซิงค์ออกไซด์และสารเอชพีคิวเอ็ม และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

วัสดุพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง (recycled Hight Density Polyethylene ; rHDPE) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอส.พี. พลาสติก อินดัสทรี จำกัด มีความสามารถในการไหล (Flow ability) ในช่วง 0.82 – 0.84 กรัมต่อ 10 นาที สารตัวเติมยับยั้งแบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ สารเอชพีคิวเอ็ม (2-Hydroxypropyl-3-Piperazinyl-Quinoline Carboxylic acid ; HPQM) จากบริษัท Micro Science Tech จำกัด (ประเทศเกาหลีใต้) และสารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์โดย บริษัท Dxnano technical (charangzhou) จำกัด ประเทศจีน แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli* (*E. coli*) สายพันธุ์ ATCC 25922 และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) จากบริษัท ไบโอมีเดีย (ประเทศไทย) จำกัด อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว (Nutrient Broth; NB) อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง (Nutrient BAgar; NA) และอาหารเลี้ยงชนิดแข็งสำหรับนับโคโลนี (Plate Count Agar; PCA) เปปโตน (Peptone) จากบริษัท Hi Media Laboratories จำกัด

ขั้นตอนการตรึงสารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารเอชพีคิวเอ็มด้วยวิธีการดูดซับ

1) อบสารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อขจัดความชื้น อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
2) นำสารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.03 กรัม กวนผสมกับสารละลายเอชพีคิวเอ็ม (10,000 ppm) ที่ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ด้วยแท่งแม่เหล็กเวลาต่าง ๆ กรองและอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่ง

น้ำหนักของแข็งจากการระเหยแห้งสารที่ได้จากการกรอง คำนวณร้อยละการดูดซับ ดังแสดง Equation 1 เพื่อหาระยะเวลาเริ่มต้น (Start time) ในการดำเนินงาน

$$\text{Absorption percent (\%)} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ C_0 คือ ปริมาณสารเอชพีคิวเอ็มเริ่มต้น (มิลลิกรัม)
C_1 คือ ปริมาณสารเอชพีคิวเอ็มที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัม)

3) ศึกษาตัวแปร/ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของสารยับยั้งแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด ดังนี้
   - ปริมาณสารดูดซับนาโนซิงค์ออกไซด์ ตั้งแต่ 0.01–0.05 กรัม
   - ความเป็นกรดด่าง (pH) ตั้งแต่ 5.0–11.0
   - เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ตั้งแต่ 15–120 นาที

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการผสมพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงกับสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม (Co-antibacterial) ที่ปริมาณ 0-8 ส่วนในร้อยส่วนโดยน้ำหนัก (pph) อัตราส่วนระหว่างนาโนซิงค์ออกไซด์และสารเอชพีคิวเอ็ม ดังแสดงใน Table 1 และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาด 18 × 18 × 0.1 เซนติเมตร

Table 1 Co-antibacterial agent ratio between nano-ZnO and HPQM mixed with rHDPE

Sample	Content (g)	
	HPQM	ZnO
rHDPE-HPQM	7.27	-
rHDPE-Co-antibacterial_4 pph	3.63	0.37
rHDPE-Co-antibacterial_6 pph	5.45	0.55
rHDPE-Co-antibacterial_8 pph	7.27	0.73
rHDPE-nano ZnO	-	0.73

การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย

การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการวัดรัศมีการยับยั้งแบคทีเรีย (Halo test) โดยผสมแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวเข้ากับวุ้นอาหารเลี้ยงเชื้ออัตราส่วน 1 : 1 ได้เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดกึ่งแข็งที่มีความเข้มข้นเชื้อแบคทีเรียประมาณ 10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) เทลงบนจานเพาะเชื้อที่เตรียมไว้ วางชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร บนอาหารเลี้ยงเชื้อบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการยับยั้งแบคทีเรีย และคำนวณดังแสดงใน Equation 2

$$R_A = \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (2)$$

โดยที่ R_A คือ รัศมีการยับยั้งแบคทีเรีย (มิลลิเมตร)

D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานทดสอบ (มิลลิเมตร)

D_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณการยับยั้งแบคทีเรีย (มิลลิเมตร)

การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียเชิงปริมาณ ด้วยเทคนิค JIS Z2801 โดยเตรียมแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อแบบเหลว ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10^6 CFU/ml หยดบนชิ้นงานทดสอบขนาด 5 × 5 เซนติเมตร ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเจือจางความเข้มข้นให้ลดลงครั้งละ 10 เท่า และเลี้ยงแบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง และคำนวณประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย ดังแสดงใน Equation 3

$$R = [\log(B/A) - \log(C/A)] \quad (3)$$

โดยที่ R คือ การยับยั้งแบคทีเรีย (Antibacterial Activity)

A คือ ค่าเฉลี่ยแบคทีเรียที่มีชีวิตหลังทดสอบ 0 ชม. บนชิ้นงานทดสอบที่ไม่มีสารยับยั้งแบคทีเรีย

B คือ ค่าเฉลี่ยแบคทีเรียที่มีชีวิตหลังทดสอบ 24ชม. บนชิ้นงานทดสอบที่ไม่มีสารยับยั้งแบคทีเรีย

C คือ ค่าเฉลี่ยแบคทีเรียที่มีชีวิตหลังทดสอบ 24 ชม. บนชิ้นงานทดสอบที่มีสารยับยั้งแบคทีเรีย

การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกล มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-14 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น CTW1000C บริษัท Haake Rheomax จำกัด ประเทศเยอรมนี อุณหภูมิการผสมจากบริเวณ Feed Zone, Metering zone ถึง Die zone ดังนี้ 165, 170, 175 และ 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบการผสม 60 รอบต่อนาที และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบลักษณะดรัมเบลล์ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) รุ่น E-80B ของบริษัท Eite Precision Machieniry จำกัด อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปจากบริเวณ Feed Zone ถึงหัวฉีด ดังนี้ 190, 210, 220 และ 220 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างน้อย 15 ชิ้นงาน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การดูดซับนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารเอชพีคิวเอ็ม

การศึกษาตัวแปรในการดูดซับนาโนซิงค์ออกไซด์กับสารเอชพีคิวเอ็ม เพื่อใช้เป็นสารยับยั้งแบคทีเรียร่วมที่เวลา 120 นาที พบว่า มีค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด ดังแสดงใน Fig. 1A นอกจากนี้ มีตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณสารดูดซับ และค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่า สารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์ ปริมาณ 0.03 กรัม มีค่าร้อยละการดูดซับ 16.6 ดังแสดงใน Fig. 1B และเมื่อปรับค่า pH ที่ 9.0 จากค่า pH เริ่มต้น 11.8 มีร้อยละการ ดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 68.1 ดังแสดงใน Fig. 1C เนื่องจากค่า pH ลดลง แสดงถึงไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) บนพื้นผิวนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น (Zhang et al., 2016) ส่งผลทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสารเอชพีคิวเอ็ม และนา

โนซิงค์ออกไซด์มากขึ้น โดยที่สารเอชพีคิวเอ็มมีหมู่คาร์บอกซิลิก (R-COOH) เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุล สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiaoxia F. and Yonggang Y. และผลของระยะเวลาสัมผัสระหว่างนาโน ซิงค์ออกไซด์กับสารเอชพีคิวเอ็มภายใต้ปริมาณนาโนซิงค์ออกไซด์ และค่า pH ที่เหมาะสมพบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดร้อยละ 65.8 เนื่องจากความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลอัตราการดูดซับคงที่ ดังแสดงใน Fig. 1D

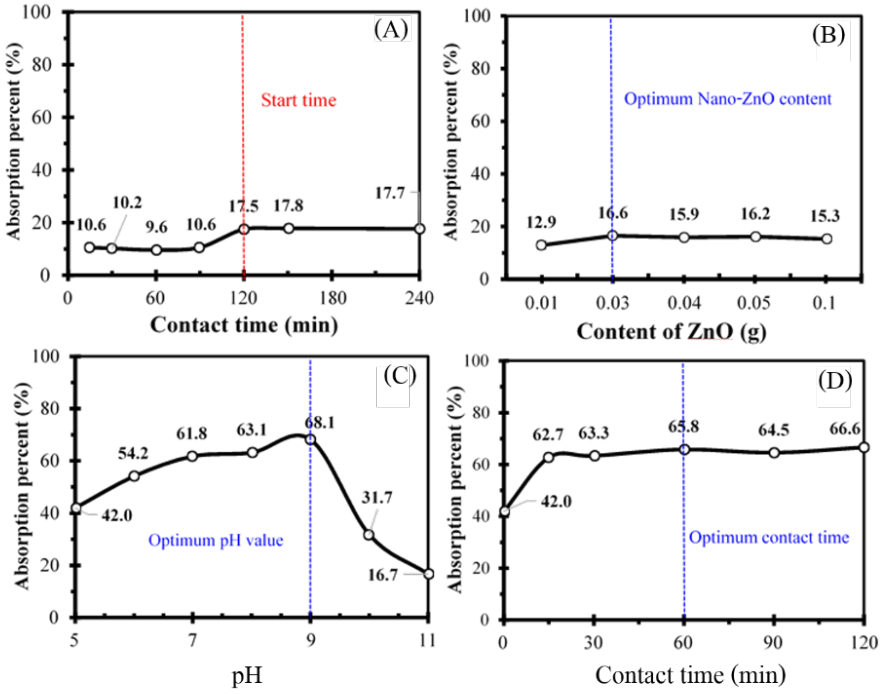


Fig. 1 Adsorption percent (%) between nano-ZnO and HPQM under various conditions. (A) Start time; (B) Optimum Nano-ZnO content; (C) Optimum pH value; (D) Optimum contact time

ผลของประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียเชิงคุณภาพด้วยเทคนิควัดรัศมีการยับยั้ง แสดงความสามารถการแพร่ของสารยับยั้งแบคทีเรียออกจากชิ้นงาน ดังแสดงใน Table 2 พบว่า พอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงผสมสารเอชพีคิวเอ็ม (rHDPE_HPQM) และมีรัศมีการยับยั้งแบคทีเรียมากกว่าพอลิเอทิลีน รีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงผสมสารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์ (rHDPE_ZnO) ทั้งนี้เนื่องจากสารเอชพีคิวเอ็มมีความสามารถในการแพร่ได้ดีกว่า โดยอาศัยความแตกต่างความเข้มข้นของสารยับยั้งเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) แต่สารประกอบนาโนซิงค์ออกไซด์มีความสามารถในการแพร่ต่ำ ส่งผลทำให้มีเกิดรัศมีการยับยั้งต่ำ และไม่เกิดรัศมีการยับยั้งในการทดสอบด้วยเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.coli*

เมื่อพิจารณาระหว่างพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง ผสมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม (rHDPE-Co-antibacterial) มีแนวโน้มของรัศมีการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม แต่รัศมียับยั้งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ rHDPE-HPQM เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนขัดขวางการแพร่ออก

จากชิ้นงาน ต้องอาศัยหลักการคายซับบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานที่สัมผัสกับอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งที่มี น้ำเป็นองค์ประกอบ (Sributr et al., 2014) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรัศมีการยับยั้งระหว่าง *E. coli* และ *S. aureus* พบว่า รัศมีการยับยั้ง *E. coli* มากกว่า *S. aureus* โดยสารเอชพีคิวเอ็มมีกลไกการในการขัดขวางการเชื่อมต่อของพันธะเปปทิโดไกลแคน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ และขัดขวางการสังเคราะห์ดีเอ็นเอไกรเลส (อาทิตย์และคณะ, 2558) ทำให้ *S. aureus* ที่มีชั้นของเปปทิโดไกลแคนหนากว่า (40 ชั้น) ถูกทำลายผนังเซลล์เพียงบางส่วน ขณะที่เปปทิโดไกลแคนของ *E. coli* มีจำนวนผนังเซลล์ที่บาง (1–2 ชั้น) (พิมพ์เพ็ญ, 2558) ทำให้ความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลง เกิดรูรั่วของเหลวในไซโตพลาสซึมไหลออกมาภายนอก ทำให้แบคทีเรียตาย

Table 2 The radius of the clear zone (mm.) recycled high density polyethylene containing co-antibacterial agent

Sample	*Radius of clear zone (mm.)*	
	E. coli	*S. aureus*
rHDPE	-	-
rHDPE-HPQM	1.83 ± 0.09	1.69 ± 0.11
rHDPE-Co-antibacterial_4 pph	1.71 ± 0.15	1.51 ± 0.19
rHDPE-Co-antibacterial_6 pph	1.71 ± 0.06	1.48 ± 0.25
rHDPE-Co-antibacterial_8 pph	1.81 ± 0.08	1.77 ± 0.14
rHDPE-nano ZnO	-	0.93 ± 0.06

ผลทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียเชิงปริมาณด้วยเทคนิค JIS Z2801 พบว่า ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม เนื่องจากการทดสอบมีน้ำองค์ประกอบหลัก โดยที่สารเอชพีคิวเอ็มสามารถละลายน้ำได้ สารดูดซับนาโนซิงค์ออกไซด์ถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของน้ำเป็นการทำลายพันธะไฮโดรเจน ส่งผลทำให้สารยับยั้งร่วมมีประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบได้ดี

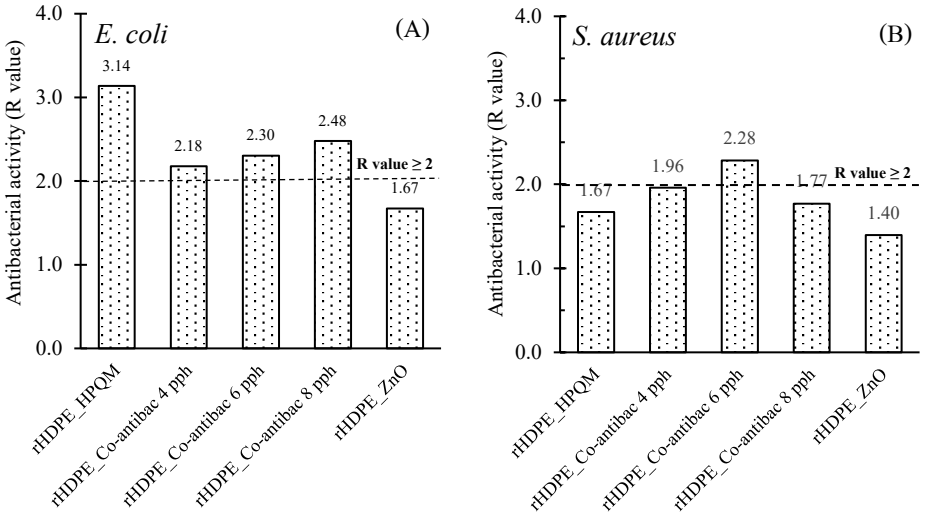


Fig. 2 Antibacterial activity (R value) of recycled high density polyethylene containing co-antibacterial agent (A) *E. coli* (B) *S. aureus*

ดังแสดงใน Fig. 2A และ Fig. 2B แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) พบว่า rHDPE-Co-antibacterial ที่ปริมาณ 6 pph มีประสิทธิภาพยับยั้งแบคทีเรียสูงสุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกลไกการทำงานการยับยั้งร่วมกัน โดยที่สารเอชพีคิวเอ็มสามารถทำลายเปปทิโดไกลแคนได้บางส่วน ร่วมกับกลไกยับยั้งของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เหนี่ยวนำอนุมูลอิสระ (Reactive Oxygen Species: ROS) ที่พื้นผิวของอนุภาค ซึ่งมักเกิดร่วมกับกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photo-catalysis) ก่อให้เกิดไอออนอิสระ (OH^-, O_2^-, H_2O_2) หลุดจากพื้นผิวของอนุภาคแทรกซึมเข้าผนังเซลล์ไปทำลายส่วนประกอบภายในเซลล์ ทำให้แบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโตและตายได้ (ฉัตร, 2560) และเมื่อเพิ่มปริมาณสารยับยั้งแบคทีเรียร่วมเป็น 8 pph อาจเกิดการเกาะกลุ่มกันของนาโน ซิงค์ออกไซด์ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียมีค่าลดลง

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ rHDPE-Co-antibacterial ที่ปริมาณ 4, 6 และ 8 pph แสดงใน Fig. 3 พบว่าค่ามอดุลัสแรงดึงโดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมสารยับยั้งร่วมซึ่งเป็นของแข็งส่งผลทำให้มอดุลัสโดยรวมเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Fig. 3A ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงกับสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม ส่งผลทำให้การส่งผ่านแรงทำได้ดี ดังแสดงใน Fig. 3B และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงผสมสารยับยั้งร่วมมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมสารยับยั้งร่วมส่งผลทำให้ความต่อเนื่องของเฟสรับแรง (rHDPE) ลดลงเมื่อได้รับแรงกระทำดังแสดงใน Fig. 3C

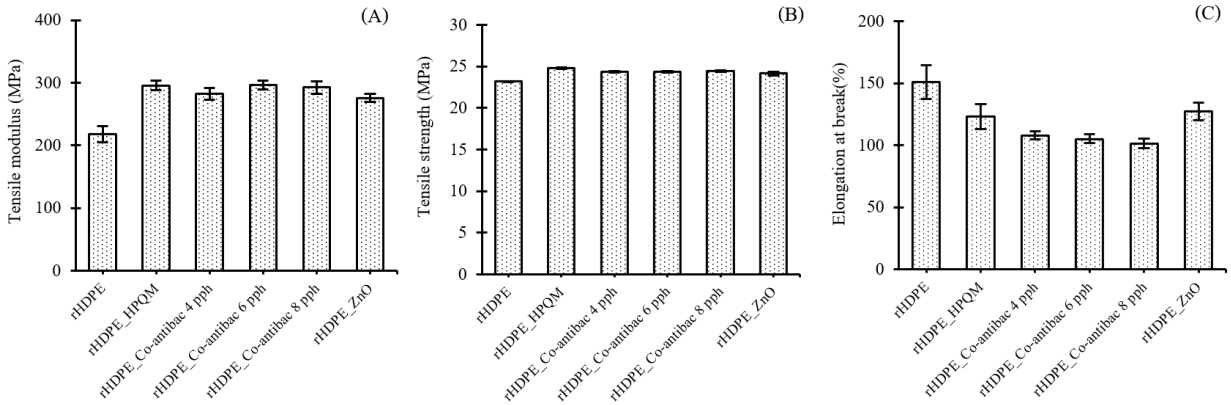


Fig. 3 Mechanical properties of recycled high density polyethylene containing co-antibacterial agent. (A) Tensile modulus; (B) Tensile strength; (C) Elongation at break

สรุป

1. การเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณ 0.03 กรัม ในสารละลายเอชพีคิวเอ็ม 30 มิลลิลิตร ค่า pH 9.0 ปั่นผสมเป็นเวลา 60นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดร้อยละ 65.80
2. การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียด้วยเทคนิควัดรัศมีการยับยั้ง พบว่า มีแนวโน้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม ในขณะที่การทดสอบเทคนิค JIS Z2801 พบว่า การเติมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วมที่ 6 pph สามารถยับยั้งได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*)
3. สมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึง และการต้านทานแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมสารยับยั้งแบคทีเรียร่วม ในขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) สกสว. ร่วมกับบริษัท เอส.พี.พลาสติก อินดัสตรี จำกัด เลขที่สัญญา MSD62I0087 สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการดูดซับ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการทดสอบการยับยั้งแบคทีเรีย

เอกสารอ้างอิง

ฉัตร ผลนาค. 2560. อนุภาคซิงก์ออกไซด์กับการต้านเชื้อจุลชีพก่อโรค. สมาคมฟิสิกส์ไทย. 34: 37–47.

พิมพ์เพ็ญ พรลิมพงศ์. 2558. แบคทีเรีย, http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0197/แบคทีเรีย-bacteria, 12 กุมภาพันธ์ 2564.

อาทิตย์ เอกศิรินิมิต, กุลนิดา เทพทิม, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2558. ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีนผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย HPQM รูปแบบสารดูดซับและสารละลาย. ใน: การประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 การพัฒนาท้องถิ่นสู่ภูมิภาคอาเซียน: ความหลากหลายบนพื้นที่ชายแดน. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, จังหวัดอุบลราชธานี.

BLT Bangkok. 2563. คนไทยใช้ถุงพลาสติกมากถึง 5,300 ตัน/วัน เอกชนหนุนยกเลิกพลาสติกใช้ครั้งเดียว, https://www.bltbangkok.com/news/5074, 11 กุมภาพันธ์ 2564.

Zhang, F., Chena, X., Wua, F., JibaJiangsu. Y. 2016. High adsorption capability and selectivity of ZnO nanoparticles for dye removal. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 509: 474–483.

Li, S.C., Li, Y.-N. 2010. Mechanical and antibacterial properties of modified nano-ZnO/high-density polyethylene composite films with a low doped content of nano-ZnO. J. Appl. Polym. Sci. 16: 2965–2969.

SpecialChem. 2017. Global Plastic Recycling Market to Reach at USD 56.8 Bn by 2024. https://polymer-additives.specialchem.com/news/industry-news/plastic-recycling-market-2024-000185885, 9 January 2021.

Sributr, A., Yamsaengsung, W., Wimolmala, E., Kositchaiyong, A., Isarangkura, K., Sombatsompop, N. 2014. Effects of solution and solid forms of 2-Hydroxypropyl-3-Piperazinyl-quinoline Carboxylic Acid Methacrylate on antibacterial, physical and mechanical properties of polypropylene sheeting. J. Plast. Film Sheeting. 31: 248–268.

Xiaoxia F., Yonggang Y. 2019. Poly(amino acid)/ZnO nanoparticles nanocomposites.with enhanced thermal, mechanical, and antibacterial properties. Polym. Bull. 77: 2325–2343.

การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์งานยกคว่ำเครื่องดับเพลิงแบบยกหิ้วชนิดผงเคมีแห้ง เพื่อตรวจเช็คคุณภาพผงเคมีภายในถัง

Ergonomic risk assessment of lift shake the portable extinguisher dry chemical for checking the quality of chemical inside the tank

เพลินศักดิ์ อุบลหล้า[a,*], **เพ็ญสุดา พันฤทธิ์ดำ**[b]

Phloensak Ubonla[a,*], **Pensuda Phanritdum**[b]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัยและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี 20230

[b]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี 20230

[a]Engineering Safety Engineering and Environmental Management Program, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Chonburi 20230, Thailand.

[b]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Chonburi 20230, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาผลการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของผู้ปฏิบัติงานจำนวน 1 คนในงานยกคว่ำเครื่องดับเพลิงแบบยกหิ้วชนิดผงเคมีแห้ง เพื่อตรวจเช็คคุณภาพผงเคมีภายในถัง น้ำหนักสูงสุดของการยก 9.8 กก. จำนวน 441 ถัง การประเมินครั้งนี้ใช้แบบประเมินของ REBA และ NIOSH ประเมินควบคู่กัน ผลที่ได้คะแนน REBA = 10 และ LI = 1.16 ทำให้ทราบว่างานนี้มีปัญหาด้านการยศาสตร์ จึงทำการวิเคราะห์ผลเพื่อทำการลดความเสี่ยง โดยจัดทำเครื่องมือช่วยยกและเทียบผลหลังการปรับปรุง คะแนน REBA = 3 และ LI = 0.60 งานนี้มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและทำให้ประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้นมาก

คำสำคัญ: การยศาสตร์, NIOSH, REBA, เครื่องดับเพลิงชนิดผงเคมีแห้ง

Abstract

This research studied the results of an ergonomics risk assessment of 1 operator in lifting, shaking the portable fire extinguishers, dry chemical type. For check the quality of the chemical powder inside. The maximum lifting weight is 9.8 kg. total 441 tanks. By using the assessment tooling of REBA and NIOSH. The result is REBA = 10 and LI = 1.16 to understand that this work has an ergonomic problem. Analyze results for work risk reduction by make a tooling to help and then do compare the results after improvement, REBA score = 3 and LI = 0.60. This work has safety for operator and thus the work efficiency get better.

Keywords: ergonomic, extinguisher dry chemical, NIOSH, REBA

คำนำ

เครื่องดับเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการที่จะนำไปใช้ระงับเหตุเพลิงไหม้ในขั้นต้น เครื่องดับเพลิงมีหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมกับประเภทของไฟที่เกิดจากเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ สำหรับเครื่องดับเพลิงแบบยกหิ้วชนิดผงเคมีแห้ง ก็เป็นที่นิยมนำมาติดตั้งเพื่อใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และเพื่อให้เครื่องดับเพลิงสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะยาว จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องดับเพลิงอย่างสม่ำเสมอ โดยตามหลักทั่วไปการตรวจสอบและบำรุงรักษาจะต้องตรวจสอบความสมบูรณ์ของสภาพถังและอุปกรณ์ภายนอกแล้วนั้น ยังต้องตรวจสอบคุณภาพผงเคมีที่บรรจุอยู่ภายในเครื่องดับเพลิงด้วย เพื่อให้มั่นใจว่าผงเคมีที่บรรจุอยู่ภายในสามารถใช้งานได้ โดยให้ทำการยกถังคว่ำไปมา 4–6 ครั้ง เพื่อให้ผงเคมีที่อยู่ด้านในมีการแตกตัวไม่จับเป็นก้อนอย่างน้อยเดือนละครั้งหรือหกเดือนครั้ง ตามกระทรวงอุตสาหกรรม (2552) และกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน (2555)

ทั้งนี้จากปัญหาที่เกิดขึ้นในบริษัท โลจิสติก อัลลายแอนซ์ (ประเทศไทย) พบว่าพนักงานตรวจสอบเครื่องดับเพลิง เกิดความเมื่อยล้าที่ต้นแขนและหัวไหล่ทั้งสองข้างจากการที่ต้องยกคว่ำเครื่องดับเพลิงจำนวนนวนมาก ซึ่งขนาดน้ำหนักสูงสุดที่ยกคือ 9.8 กิโลกรัม โดยต้องทำเป็นประจำทุก ๆ เดือนต่อ 1 รอบการตรวจสอบ ความเมื่อยล้าที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดปัญหาต่อผลการปฏิบัติงานคือ ถังดับเพลิงไม่ได้รับการตรวจสอบทั้งหมดตามเป้าหมาย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปัญหาความเมื่อยล้าและประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของพนักงาน โดยการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์สำหรับการประเมินการยกวัตถุด้วยแรงคนด้วย REBA (Rapid Entire Body Assessment) และด้วย NIOSH Lifting Equation เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานให้เกิดความปลอดภัยกับพนักงานตามหลักการทางด้านการยศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

1. ศึกษาข้อมูลและขั้นตอนการทำงานบันทึกข้อมูลด้วยกล้องถ่ายรูปและบันทึก VDO
2. การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยการสังเกต การประเมินความเสี่ยง REBA และ NIOSH Lifting Equation
3. วิเคราะห์ผลนำเสนอแนวทางการปรับปรุงการทำงานเพื่อลดปัญหาทางการยศาสตร์
4. ดำเนินการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์และวิธีการทำงานแล้วทดลองใช้งาน
5. เก็บข้อมูลการลดปัญหาการยศาสตร์จากแนวทางที่เสนอเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง
6. ประเมินผล/สรุปผล/ข้อเสนอแนะจากการปรับปรุงการทำงานเพื่อลดปัญหาการยศาสตร์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าผลการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของพนักงานจำนวน 1 คนในงานยกคว่ำเครื่องดับเพลิงแบบยกหิ้วชนิดผงเคมีแห้งเพื่อตรวจเช็คคุณภาพผงเคมีภายในถังและเพื่อให้ผงเคมีด้านในมีการแตกตัวไม่จับเป็นก้อนดัง Fig. 1 น้ำหนักสูงสุดของการยก 9.8 กก. จำนวน 441 ถัง วิธีการทำงานดังแสดงใน Fig. 1 ทำการประเมินผลโดยใช้แบบประเมินของ REBA ในการประเมินการเคลื่อนไหวของร่างกายที่มีการเปลี่ยนท่าทางอย่างรวดเร็ว และ NIOSH Lifting Equation สำหรับการประเมินการยกวัตถุด้วยแรงคน ผลที่ได้ดังแสดงใน Table 1

พบว่าผลก่อนการปรับปรุงวิธีการทำงาน คะแนน REBA มีค่าเท่ากับ 10 และ LI (Lifting Index) มีค่าเท่ากับ 1.16 แสดงให้เห็นว่างานยกค่ำเครื่องดับเคมีแห้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพผงเคมีในถัง มีปัญหาด้านการยศาสตร์ น้ำหนักของเครื่องดับเพลิงที่ยกมีค่ามากกว่าค่าขีดจำกัดของน้ำหนักที่เหมาะสมในการยก งานนี้มีความเสี่ยงต้องได้รับการปรับปรุงโดยทันที

ในขั้นตอนการปรับปรุงผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์โอกาสของการลดหรือกำจัดค่าความเสี่ยงจากค่าตัวแปรและปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินค่าความเสี่ยงตามหลักการของ REBA ส่วนของร่างกาย คอ หลัง ขา แขนส่วนบน แขนส่วนล่าง ข้อมือ การจับยึด และ NIOSH จากสมการ RWL = LC × HM × VM × DM × AM × FM × CM โดยออกแบบและจัดทำเครื่องมือช่วยยกโดยประยุกต์เข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้เป็นประจำเพื่อลดความเสี่ยงตามหลักการยศาสตร์ดังแสดงใน Fig. 2 เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ จันจิราภรณ์ และสุนิสา (2557), ชนิกาพร และนิวิท (2558), ปริญญาภรณ์ และสุนิสา (2562), พรศิริ (2556), ยุพาวดี (2559), รัฐวุฒิ (2560), วีรชัย (2561) วรรณรา, บุตรี และปาณิสรา (2555), และสุเมธี (2560) ซึ่งหลังการปรับปรุงผลการประเมินความเสี่ยงที่ได้ดังแสดงใน Table 1 คือ คะแนนการประเมินความเสี่ยงคะแนน REBA มีค่าเท่ากับ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าความเสี่ยงลดลงแต่ต้องทำการพิจารณาศึกษาให้ละเอียดเพิ่มขึ้นและติดตามวัดผลอย่างต่อเนื่อง ส่วนค่าดัชนีการยก NIOSH Lifting Equation: LI มีค่าเท่ากับ 0.60 แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักของวัตถุมีความเหมาะสมในการยก ไม่มีความเสี่ยงทางด้านการยศาสตร์ ผู้ปฏิบัติงานมีความปลอดภัยและทำให้ประสิทธิภาพการทำงานเป็นไปตามเป้าหมาย จำนวนถังที่ยกค่ำได้ก่อนปรับปรุงที่ 173 ถัง คิดเป็น 39.23 % หลังปรับปรุงได้ 441 ถัง คิดเป็น 100 % ดังแสดงใน Table 2 และแสดงให้เห็นว่าวิธีการทำงานมีความรวดเร็วและสะดวกมากขึ้นดังแสดงใน Fig. 3 ผลลัพธ์ของผงเคมีที่อยู่ภายในถังมีการแตกตัวจากการด้วยการใช้เครื่องมือหมุนเทียบเท่ากับการยกค่ำด้วยแรงของพนักงาน 100 % ดังแสดงใน Fig. 4

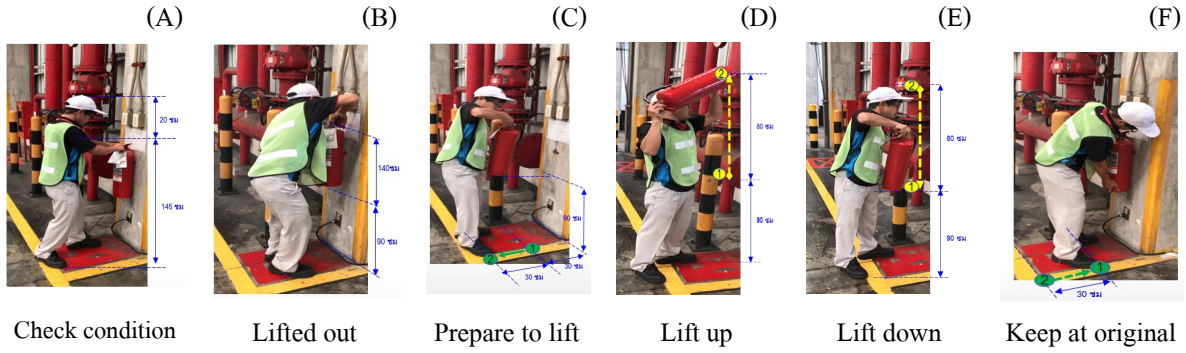


Fig. 1 Lifting and shake extinguisher inspection process

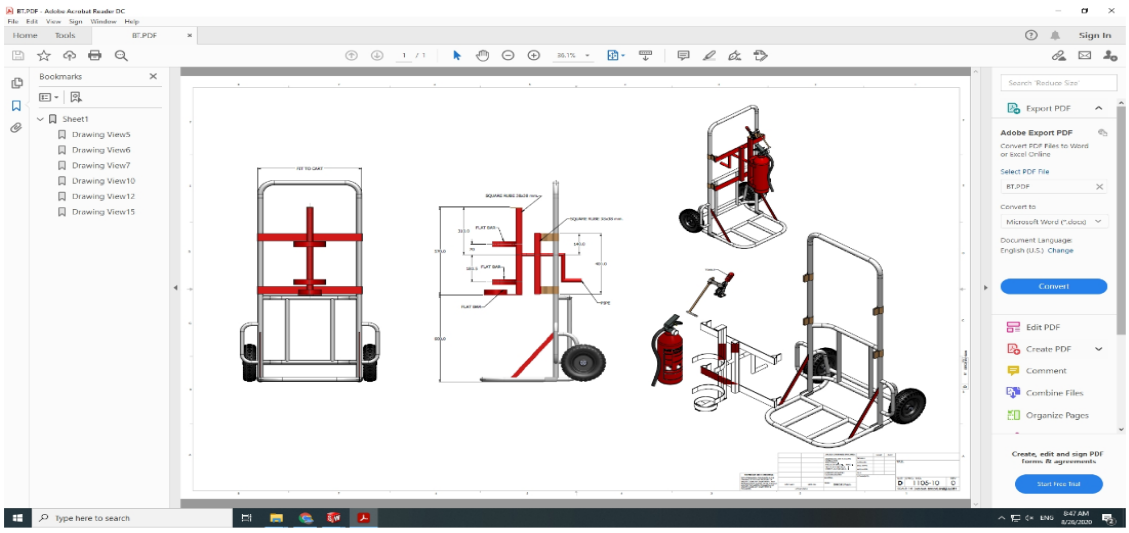


Fig. 2 Design the tooling



Fig. 3 Extinguisher inspection process using tooling support

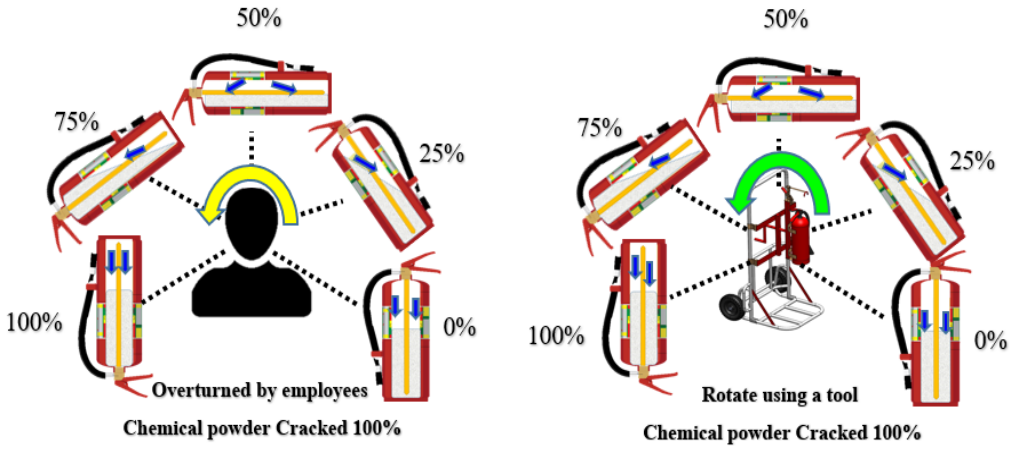


Fig. 4 Disintegration of dry powder in the tank of lift shake by employee and rotation tank by using the tooling to result 100 %

Table 1 The score of REBA and NIOSH Lifting Equation before and after improvement

REBA

Evaluate posture	Score	
	Before	After
Neck	2	1
Trunk Posture	3	1
Leg	1	1
Postured Score A	4	1
Weight	1	1
Score A	5	2
Upper Arm	6	3
Lower Arm	2	1
Wrist	2	1
Posture Score B	9	3
Coupling	0	0
Score B	9	3
Score C	9	2
Activity	1	1
Final REBA Score	10	3

NIOSH Lifting Equation

NIOSH Lifting Equation	Before		After	
	Data	Score	Data	Score
LC (kg.)	9.8	23	9.8	23
HM (cm.)	52.75	0.48	0	1
VM(cm.)	68	0.97	0	0.78
DM (cm.)	102	0.87	0	1
AM (°C)	0	1	0	1
FM (time/min)	2	0.91	2	0.91
CM	good	1	good	1
OBJECT WEIGHT (kg.)	9.8	9.8	9.8	9.8
RWL	-	8.48	-	16.33
LI	-	1.16	-	0.6

Note: LI is greater than 1, meaning that the weight of the lifting object is greater than the appropriate lifting weight limit.

Level	Score	REBA Meaning
1	1	Negligible risk
2	2–3	Low risk change may be needed
3	4–7	Medium risk. Further investigate change soon.
4	8–11	High risk. Investigation and implement change
5	>11	Very high risk. Implement change.

Table 2 Compare work efficiency before and after improvement

Compare	Month	Factory number				Result	Target	Meet target	Nor meet target
		1	2	3	4				
Before	Apr	76	0	0	0	76	441	17.23%	82.77%
	May	0	122	0	0	122	441	27.66%	72.34%
	Jun	0	0	70	0	70	441	15.87%	84.13%
	Jul	0	0	0	173	173	441	39.23%	60.77%
After	Aug	76	122	70	173	441	441	100%	0%
	Sep	76	122	70	173	441	441	100%	0%
	Oct	76	122	70	173	441	441	100%	0%

สรุป

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิธีการทำงานของผู้ปฏิบัติงานที่ทำหน้าที่ตรวจสอบเครื่องดังเพลิงโดยใช้วิธี REBA และ NIOSH Lifting Equation ในการประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ ผู้วิจัยได้ทำการเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ด้วยการออกแบบและจัดทำเครื่องมือเพื่อลดความเสี่ยงในการยก ทำการวิเคราะห์ผลจากการประเมินทั่งร่างกายด้วยวิธี REBA ค่าความเสี่ยงที่ได้เช่นเดียวกับใช้การประเมินงานของนักกายภาพบำบัด Hignett and McAtamney (1999) และพนักงานโรงเลื่อยไม้ในภาคอุตสาหกรรม Jones and Kumar (2010) ส่วน NIOSH Lifting Equation ก็เช่นเดียวกับ Shahu (2016) ที่ใช้ประเมินท่าทางการทำงานเพื่อลดปัญหาการปวดหลังของคนงานที่ยกของด้วยมือ

ผู้วิจัยนำผลที่ได้จากการประเมินมาพิจารณาถึงโอกาสในการลดและกำจัดค่าความเสียงจากตัวแปรต่าง ๆ นำไปสู่การออกแบบเครื่องมือเพื่อปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานจากเดิมเหมือนกับ Robin Burgess-Limerick (2018) เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ไม่มีความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บหรือเมื่อยล้าที่หัวไหลและต้นแขนตามวิธีการของ Ergonomics Plus (2015) และ NIOSH (2004) และทำให้สามารถตรวจเช็คเครื่องดับเพลิงและทำให้ผงเคมีแห้งในถังเกิดการแตกตัวด้วยการหมุนถังด้วยเครื่องมือแทนการออกแรงยกคว่ำ เครื่องดับเพลิงได้รับการทำให้ผงเคมีแห้งในถังแตกตัวไม่จับเป็นก้อนครบทุกถังเป็นไปตามเป้าหมายของบริษัท

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารบริษัท โลจิสติก อัลลายแอนซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความสำคัญในงานด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานของพนักงาน โดยสนับสนุนงบประมาณในการทำการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในการทำงานและผู้จัดการทั่วไปแผนกความปลอดภัยที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่ง

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. 2555. กฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานในการบริหารจัดการและดำเนินการด้านความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทางานเกี่ยวกับการป้องกันและระงับอัคคีภัย พ.ศ. 2555, https://www.labour.go.th/index.php/labor-law/category/6-laws-labor-4, 7 ธันวาคม พ.ศ. 2555

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2552. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงาน พ.ศ. 2552. https://www.diw.go.th/hawk/law/safety/23.pdf, 29 กันยายน พ.ศ. 2552

จันจิราภรณ์ วิชัย, สุนิสา ชายเกลี้ยง. 2557 การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ในพนักงานที่มีการยกเคลื่อนย้ายวัสดุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ชนิกาพร ใหม่ตัน, นิวิท เจริญใจ. 2558. การประเมินความเสี่ยงในงานยกย้ายในการผลิตโถสุขภัณฑ์แบบนั่งยอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ปริญญาภรณ์ แก้วยศ, สุนิสา ชายเกลี้ยง. 2562. เครื่องมือประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์และท่าทางขณะทำงานยก: การทบทวนงานวิจัยอย่างมีระบบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พรศิริ จงกล. 2556. การประเมินภาระงานในกิจกรรมงานก่อสร้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ยุพาวดี ดวงอุปะ. 2559. การปรับปรุงวิธีการทำ งานของพนักงานบรรจุมอเตอร์เครื่องปรับอากาศโดยการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รัฐวุฒิ สมบูรณ์ธรรม. 2560. การปรับปรุงสภาพงานโดยใช้หลักการยศาสตร์แบบมีส่วนร่วมเพื่อลดความเสี่ยงบริเวณหลังส่วนล่างในพนักงานแผนกลอกยางของโรงงานยางพาราแผ่นรมควันแห่งหนึ่งในจังหวัดจันทบุรี.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.

วีรชัย มัฏฐารักษ์. 2561. การลดความสูญเสียในการทางานของเกษตรกรชาวสวนยางพารา ด้วยวิธีการประเมินผลทางการยศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.

วรรณรา ชื่นวัฒนา, บุตรี เทพทอง และ ปาณิสรา ศรีใจ. 2555. การวิเคราะห์ท่าทาง และความเมื่อยล้าของกล้ามเนื้อจากการทำงานโดยเทคนิคการประเมินท่าทางร่างกายทั้งลำตัว.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา.

สุเมธี อู่จันทร์ฉาย. 2560. การปรับปรุงขั้นตอนการอัดยางนอกตามหลักการยศาสตร์ในแผนกคลังสินค้าสำเร็จรูปและจัดส่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Ergonomics Plus. 2015. A Step-by-Step Guide: Rapid Entire Body Assessment (REBA). http://ergo-plus.com/wp-content/uploads/REBA-A-Step-by-Step-Guide.pdf, 17 November 2015

Jones, T. Kumar, S. 2010. Comparison of ergonomic risk assessment output in four sawmill jobs. Int. J. Occup. Saf. Ergo. 16: 105–111. doi: 10.1080/10803548.2010.11076834

NIOSH, 2004. Easy Ergonomics: A guide to selecting non-powered hand tools, https://www.cdc.gov, 18 August 2004

Shahu, R. 2016. The NIOSH lifting equation for manual lifting and its applications. J. Ergonomics 6: 1–10. doi: 10.4172/2165-7556.1000159

Robin Burgess-Limerick. 2018. Participatory ergonomics: Evidence and implementation lessons. Applied Ergonomics 68: 289–293. doi:10.1016/j.apergo.2017.12.009

Hignett, S., McAtamney, L. 2000. Rapid Entire Body Assessment (REBA). Applied Ergonomics 31: 201–205. doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3

การออกแบบและปรับปรุงสถานีงานเพื่อลดปัญหาด้านการยศาสตร์ในกระบวนการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม

Design and improvement of workstation to reduce ergonomic problem in aluminium can lid process

มณีรัตน์ จันทร์สนิท[a], รมิดายุ อยู่สุข[b]*, จเร เลิศสุดวิชัย[c]

Maneerat Chansanit[a], Ramidayu Yusuk[b]*, Charay Lerdsudwichai[c]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[c]ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[c]Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้คือการออกแบบเครื่องมือและปรับปรุงสถานีงาน เพื่อลดปัญหาการยศาสตร์ในกระบวนการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม จากแบบสอบถามความเมื่อยล้าของกล้ามเนื้อของพนักงาน 36 คน พบว่าร้อยละ 80.6 มีอาการปวดบริเวณหลังส่วนล่าง และเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลผู้วิจัยได้นำแบบประเมิน REBA มาประเมินท่าทางการทำงาน พบว่าได้คะแนนสูงถึง 11 คะแนน ซึ่งจัดเป็นระดับความเสี่ยงสูงมากต้องปรับปรุงทันที ผู้วิจัยได้นำ X-Lift มาประยุกต์ใช้เพื่อปรับระดับความสูงและปรับตำแหน่งพาเลทเพื่อลดการหมุนตัวขณะปฏิบัติงาน จากการปรับปรุงพบว่าคะแนนความเสี่ยงของ REBA ลดลงจาก 11 เหลือ 4 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลาง และยืนยันผลด้วยแบบสอบถามหลังการปรับปรุงอีกครั้ง ซึ่งชี้ให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถลดอาการปวดหลังส่วนล่างของพนักงานและไม่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต

คำสำคัญ: การผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม, การยศาสตร์, REBA

Abstract

The objectives of this research are of design and to improve workstation in order to reduce ergonomic problem in aluminium can lid process. The muscle fatigue questionnaire of 36 employees showed that 80.6% of pain is the lower back. It was confirmed by REBA scored 11, which is extremely high risk. At this level the work station must be improved to prevent immediately potential muscle injury. The researcher has implemented X-Lift tool that can adjust the height as well as rearranged pallets to minimize body movement during operation. As a result, it can decrease REBA scored from 11 to 4 as a medium risk. The questionnaire also confirms that this designed could help improving and reducing ergonomics problem. This will also reduce muscle pain of employees. Move over, it can increase production throughput.

Keywords: aluminium can lid process, ergonomics, REBA

คำนำ

โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระป๋องและฝาอะลูมิเนียมแห่งหนึ่ง ตั้งอยู่ในจังหวัดสระบุรี ที่ผู้วิจัยเลือกนำมาเป็นกรณีศึกษา ปัจจุบันมีสายการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียมทั้งหมด 4 สายการผลิต โดยใช้ระบบการผลิตแบบอัตโนมัติ 3 สายการผลิต และอีก 1สายการผลิตยังเป็นรูปแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีความเร็วรอบในการผลิตที่สูง และมีการทำงานร่วมกันระหว่างคนกับเครื่องจักร ซึ่งทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องทำงานด้วยความรวดเร็วเพื่อให้ทันตามรอบเวลาเคลื่อนที่ของเครื่องจักร จากการรวบรวมข้อมูลสถิติการเข้าใช้บริการห้องพยาบาลประจำปี พ.ศ. 2562 พบว่ามีจำนวนผู้เข้าใช้บริการด้วยโรคระบบกล้ามเนื้อและกระดูก ทั้งหมด 619 ครั้ง ซึ่งแผนกผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียมมีอัตราการเข้าใช้บริการห้องพยาบาลด้วยโรคระบบกล้ามเนื้อและกระดูกสูงสุดเป็นอันดับ 1 มีอัตราส่วนเท่ากับ 1.27 ของจำนวนพนักงานทั้งหมดที่มาใช้บริการ ทั้งนี้ความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกที่เกิดขึ้นเนื่องจากผู้ปฏิบัติงานมีท่าทางการทำงานที่ผิดหลักการยศาสตร์ และมีการทำงานซ้ำ ๆ อยู่ตลอดเวลา (อรรถพล และคณะ, 2560)

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาด้านการยศาสตร์ในกระบวนการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม โดยใช้ผลจากแบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อและผลการประเมินความเสี่ยงทางด้านการยศาสตร์ด้วยเทคนิค REBA นำไปสู่ผลการออกแบบและปรับปรุงสถานีงานเพื่อลดความเสี่ยงทางด้านการยศาสตร์ (ปิณา, 2559)

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. แบบประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์แบบทั่วทั้งร่างกาย (Rapid Entire Body Assessment : REBA)
2. แบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อ
3. กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหว
4. ตลับเมตรสำหรับวัดระยะในหน่วยเซนติเมตร

สถานีที่ใช้ในการวิจัยและขั้นตอนการปฏิบัติงาน

สายการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียมที่ 4 เป็นสายการผลิตแบบกึ่งอัตโนมัติ มีลักษณะการทำงานร่วมกันระหว่างคนกับเครื่องจักร มีขั้นตอนการผลิตตามลำดับดังต่อไปนี้ และแสดงดัง Fig. 1

1. การขึ้นรูปและม้วนขอบฝา (Shell Press)
2. การใส่ซองและป้อนฝา (Roll Over 1)
3. การฉีดน้ำยางคอมพาว์ด (Compound Liner)
4. การใส่ซองและป้อนฝา (Roll Over 2)
5. การขึ้นรูปและติดห่วงดึง (Conversion Press)
6. การบรรจุฝาใส่ซองและเรียงลงบนพาเลท (Packing)

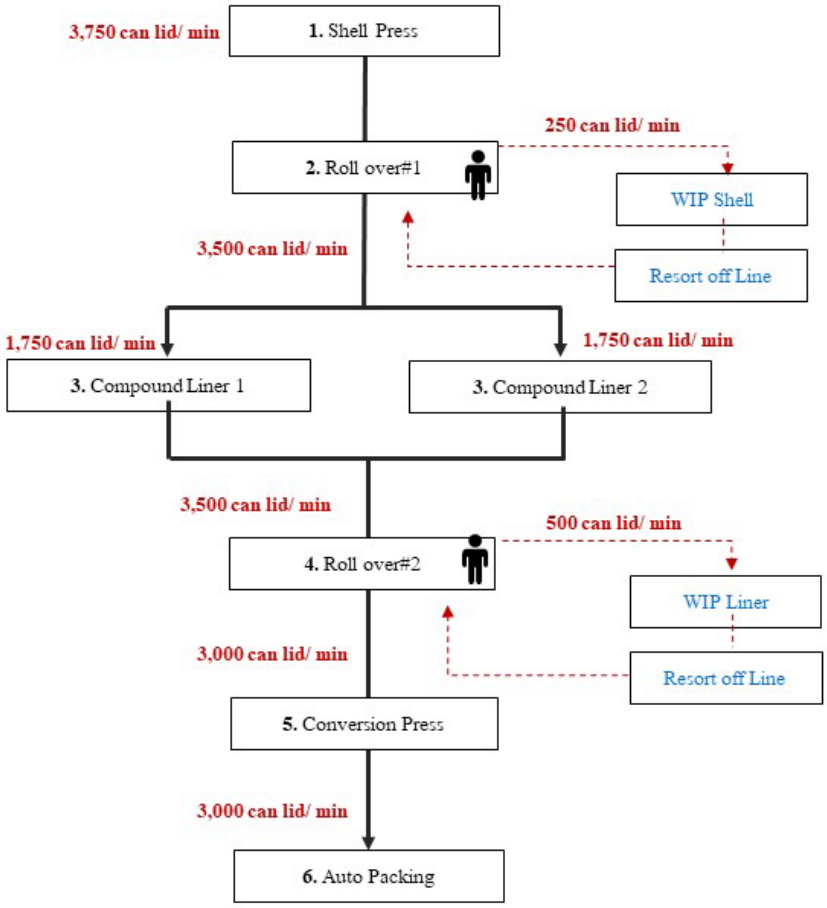


Fig. 1 Process flow aluminium can lid line 4

จากการศึกษาขั้นตอนการทำงานของสายการผลิตฝาที่ 4 นั้นเป็นการทำงานที่ผู้ปฏิบัติงานจะต้องทำงานร่วมกับเครื่องจักร ซึ่งมีกำลังการผลิตของสายการผลิตเท่ากับ 3,000 ฝาต่อนาที โดยเริ่มจากขั้นตอนการขึ้นรูปและม้วนขอบฝา (Shell Press) ที่มีกำลังการผลิต 3,750 ฝาต่อนาที จากนั้นฝาจะถูกลำเลียงผ่านรางลำเลียงไปยังขั้นตอนการใส่ซองและป้อนฝาที่ 1 (Roll over 1) พนักงานจะทำการย้ายฝาเข้าสู่ขั้นตอนการฉีดน้ำยางคอมพาวด์ (Compound Liner) 2 เครื่อง ที่มีกำลังการผลิตรวม 3,300 ฝาต่อนาที ส่วนฝาที่เหลือจะถูกเก็บใส่ซองไว้ป้อนเข้าสู่การผลิตในกรณีที่เครื่องจักรผลิตหยุดทำงาน จากนั้นฝาที่ผ่านการฉีดน้ำยางคอมพาวด์จะถูกลำเลียงผ่านรางลำเลียงไปยังขั้นตอนการใส่ซองและป้อนฝาจุดที่ 2 (Roll over 2) พนักงานจะทำการย้ายฝาเข้าสู่ขั้นตอนการขึ้นรูปและติดห่วงดึง (Conversion Press) ที่มีกำลังการผลิต 3,000 ฝาต่อนาที ส่วนฝาที่เหลือจากการป้อนเข้าเครื่องจะถูกเก็บใส่ซองไว้ป้อนเข้าสู่การผลิตในกรณีที่เครื่องจักรผลิตหยุดทำงาน เพื่อให้การผลิตสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรกลุ่มตัวอย่าง คือ พนักงานที่ปฏิบัติงานในสายการผลิตที่ 4 แผนกผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม จำนวน 36 คน

วิธีการวิจัย

1. สังเกตวิธีการทำงานของพนักงานในสายการผลิตฝาที่ 4 และประเมินสภาพปัญหาทางด้านการยศาสตร์ โดยการใช้แบบสอบถามข้อมูลความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อ (Kuorinka and Andersson, 1987)
2. บันทึกภาพเคลื่อนไหวของพนักงานในระหว่างการทำงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ให้คะแนนลักษณะท่าทางการทำงานของพนักงาน ตามบริเวณส่วนต่างๆของร่างกายที่กำหนดไว้ในแบบประเมิน REBA (Hignett and McAtamney, 2000)
3. นำผลที่ได้จากการตอบแบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อ และผลจากการประเมิน REBA มาวิเคราะห์สภาพปัญหาด้านการยศาสตร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและปรับปรุงสถานีงาน
4. ออกแบบและปรับปรุงสถานีงาน เพื่อช่วยให้การทำงานเป็นไปตามหลักการยศาสตร์
5. ประเมินผลหลังการปรับปรุง โดยการให้พนักงานกลุ่มตัวอย่างทดลองใช้งานและประเมินท่าทางการทำงานด้วยเทคนิค REBA เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงสถานีงาน
6. เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงสถานีงาน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากประชากรกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 36 คน ที่เป็นพนักงานในสายการผลิตฝาที่ 4 แผนกผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม ผลการวิจัยสามารถแยกอธิบายดังนี้

ผลจากแบบสอบถามข้อมูลความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อ

จากแบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อ ของประชากรกลุ่มตัวอย่างทั้ง 36 คน ส่วนใหญ่ระบุว่ามีอาการปวดบริเวณหลังส่วนล่าง (Lower Back) คิดเป็นร้อยละ 80.6 รองลงมา คือ บริเวณไหล่ (Shoulder) คิดเป็นร้อยละ 63.9 ซึ่งได้ผลจากแบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อแสดงดัง Fig. 2

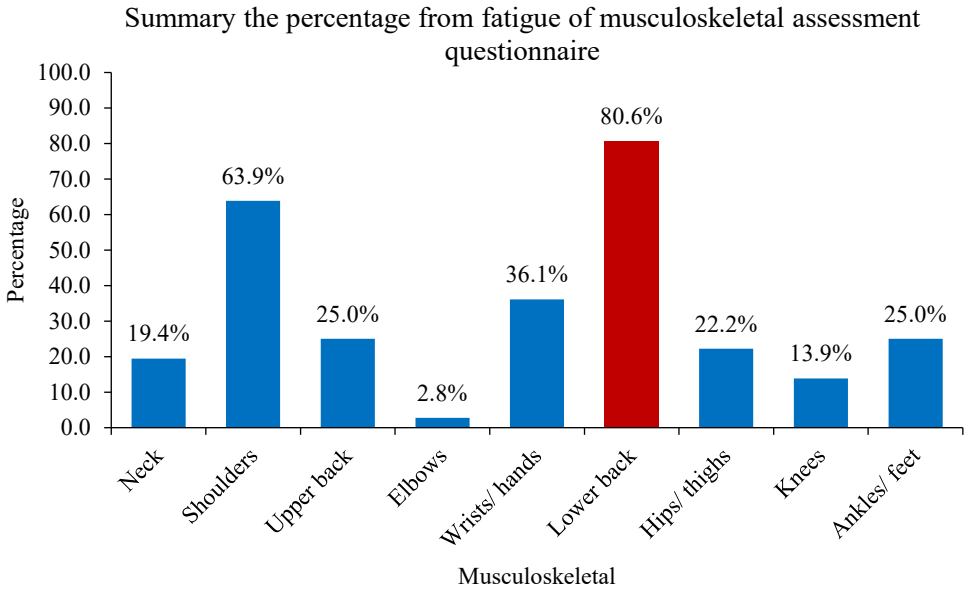


Fig. 2 Summary the percentage from fatigue of musculoskeletal assessment questionnaire

จากการสังเกตวิธีการทำงานในสายการผลิตฝาที่ 4 พบว่า ที่ขั้นตอนการใส่ซองและป้อนฝา ประชากรกลุ่มตัวอย่างมีลักษณะการทำงานที่ต้องยกเคลื่อนย้ายโดยทำงานในท่าทางเดิมซ้ำ ๆ เป็นเวลานานมากกว่า 10 ชั่วโมงต่อวัน จากการสังเกตพบว่า ท่าทางการทำงานที่ส่งผลทำให้เกิดอาการบาดเจ็บหรือเกิดความเมื่อยล้าของกล้ามเนื้อเกิดจาก 3 ท่าทาง คือ 1) การจับฝาย้ายเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป 2) การก้มวางซองใส่ฝาเรียงลงบนพาเลท 3) การก้มยกซองใส่ฝาขึ้นจากพาเลท แสดงดัง Fig. 3



Fig. 3 Working movement at Roll over station

ระดับความเสี่ยงทางด้านการยศาสตร์จากการประเมินด้วยเทคนิค REBA

จากการสันนิษฐานด้วยการสังเกต ผู้วิจัยจึงยืนยันด้วยการประเมินความเสี่ยงทางด้านการยศาสตร์ ซึ่งผลจากการประเมินความเสี่ยงด้วย REBA ของท่าทางการทำงานในขั้นตอนการใส่ซองและป้อนฝา พบว่าท่าทางที่มีความเสี่ยงสูงสุด มากจากท่าทางการก้มยกซองใส่ฝาขึ้นจากพาเลท คะแนน REBA ที่ประเมินได้ คือ 11 คะแนน ซึ่งจัดอยู่ในระดับความเสี่ยงสูงมาก ต้องปรับปรุงทันที

วิเคราะห์สภาพปัญหาและแนวทางการออกแบบและปรับปรุงสถานีงาน

จากรายละเอียดในการประเมิน REBA ของท่าทางการทำงานในขั้นตอนการใส่ซองและป้อนฝา ได้ชี้ให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดจากบริเวณลำตัวแสดงดัง Fig. 4 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำแบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อ ที่ประชากรกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ระบุว่ามีอาการปวดที่บริเวณหลังส่วนล่าง ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุง คือการปรับให้มีการก้มให้น้อยลงโดยจะใช้อุปกรณ์ที่สามารถปรับระดับความสูงได้ ซึ่งพิจารณาระดับความสูงของชั้นวางพาเลทที่เหมาะสมกับประชากรกลุ่มตัวอย่าง รวมทั้งการจัดตำแหน่งการวางพาเลทใหม่เพื่อลดการหมุนตัวขณะปฏิบัติงาน(Waters et al., 1993)

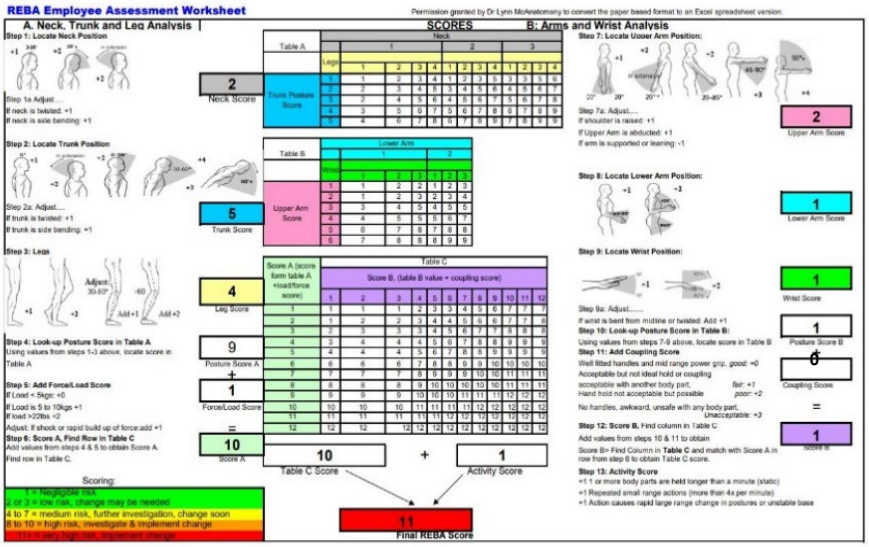


Fig. 4 REBA Score at Roll over station

การออกแบบและปรับปรุงสถานีงาน

1) ออกแบบเครื่องมือที่สามารถปรับระดับขึ้นลงได้ เพื่อลดการก้มตัวของพนักงาน แสดงดัง Fig. 5

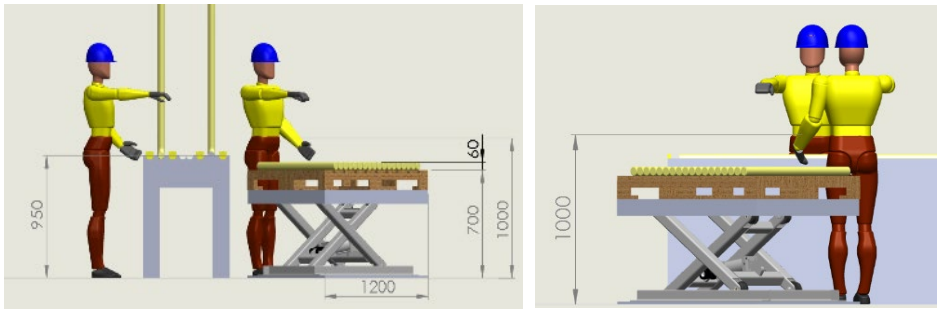


Fig. 5 Designer implements tool for easily height adjustment

2) จัดตำแหน่งการวางพาเลทใหม่ เพื่อให้สามารถลดการหมุนตัวขณะปฏิบัติงาน แสดงดัง Fig. 6

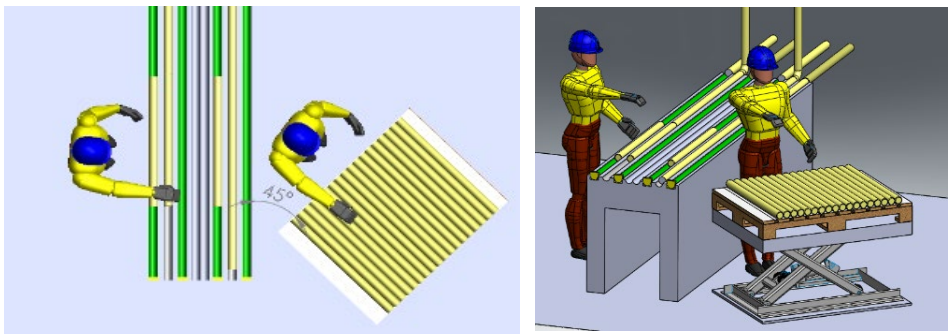


Fig. 6 Rearranged pallets to minimize body movement during operation

จากการออกแบบและปรับปรุงสถานีงาน (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2560) ผู้วิจัยได้ดำเนินการเพิ่มเครื่องมือ X-Lift มาประยุกต์ใช้โดยให้สามารถปรับประดับความสูงขึ้นลงได้ เพื่อลดการก้มของลำตัว และจัดตำแหน่งการวางพาเลทโดยปรับลดมุมเพื่อลดการหมุนตัวขณะปฏิบัติงาน (หงษ์ทอง, 2562) โดยใช้งบประมาณในการลงทุนทั้งหมด 75,000 บาท หลังจากนั้นให้ประชากรกลุ่มตัวอย่างทดลองใช้งานและสังเกตวิธีการการทำงานหลังการปรับปรุง แสดงดัง Fig. 7



Fig. 7 X-Lift tool after implementation

ผลการประเมินด้วยเทคนิค REBA หลังการปรับปรุงสถานีงาน

หลังการปรับปรุงสถานีงาน ผู้วิจัยได้ดำเนินการประเมินคะแนนท่าทางการทำงานด้วยเทคนิค REBA พบว่าส่วนของบริเวณ คอ ลำตัวและขา มีผลคะแนนลดลงดังแสดง Fig. 8 จึงทำให้คะแนนความเสี่ยงรวมจาก 11 คะแนนลดลงเหลือ 4 คะแนน ซึ่งจัดอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลาง และยืนยันผลด้วยแบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อหลังการออกแบบและปรับปรุงอีกครั้ง พบว่าอาการปวดหลังส่วนล่างลดลงจากร้อยละ 80.6 เหลือเพียงร้อยละ 33.33

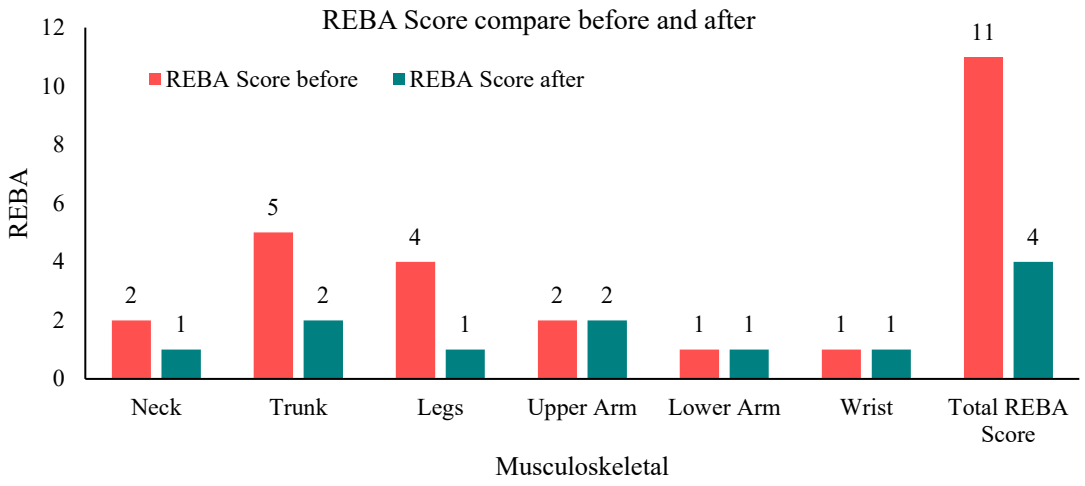


Fig. 8 REBA Score compare before and after of workstation improvement

ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง

ผลการเปรียบเทียบหลังการปรับปรุงสถานีงาน โดยการติดตั้ง X-Lift ที่สามารถปรับขึ้นลงได้ และจัดตำแหน่งการวางพาเลท พบว่าก่อนการปรับปรุงพนักงานจะต้องก้มยกซองใส่ฝาในตำแหน่งล่างสุด ที่มีความสูงจากพื้น 15 เซนติเมตร แต่หลังการปรับปรุงทำให้พนักงานไม่ต้องก้มยกซองใส่ฝาเนื่องจากเครื่องมือสามารถปรับระดับขึ้นลงได้จึงทำให้ลดอาการปวดหลังส่วนล่าง และในการติดตั้ง X-Lift ทำให้พนักงานสามารถป้อนฝาเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตได้เพียงพอและต่อเนื่องตามกำลังการผลิตที่ 3,000 ฝาต่อนาที ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิตที่ต้องการตามขั้นตอนวิกฤติ และจากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายห้องพยาบาลที่เกิดจากการรักษาพยาบาลด้วยโรคระบบกล้ามเนื้อและกระดูกของพนักงานแผนกผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม ประจำปี 2562 มีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น 9,576 บาท และหลังการปรับปรุงพบว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการเข้ารับการรักษาลดลงเหลือ 3,180 บาท ซึ่งลดลงคิดเป็นร้อยละ 33.21 ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนครั้งของการเข้าใช้บริการห้องพยาบาลด้วยโรคระบบกล้ามเนื้อและกระดูกของพนักงานแผนกผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียมลดลงอย่างเห็นได้ชัด

สรุป

จากการดำเนินงานวิจัยเพื่อลดปัญหาการยศาสตร์ของพนักงานในกระบวนการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม โดยการใช้ผลคะแนนจากการประเมิน REBA ที่มีความเสี่ยงสูงสุดจากท่าทางที่เป็นปัญหาคือบริเวณหลังส่วนล่างมาทำการออกแบบและปรับปรุงสถานีงาน พบว่าผลการประเมิน REBA หลังการปรับปรุงลดลงจาก 11 คะแนน เหลือ 4คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลาง และหลังจากที่ประชากรกลุ่มตัวอย่างทั้ง 36 คน ได้ทดลองใช้งาน ผลจากการทำแบบสอบถามความเมื่อยล้าของระบบกล้ามเนื้อ พบว่า มีอาการปวดบริเวณหลังส่วนล่างลดลงจากร้อยละ 80.6เหลือเพียงร้อยละ 33.33 ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบข้างต้นสรุปได้ว่า สถานีงานหลังการปรับปรุงสามารถช่วยลดปัญหาทางด้านการยศาสตร์ของประชากรกลุ่มตัวอย่าง และการปรับปรุงสถานีงานครั้งนี้ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตฝากระป๋องอะลูมิเนียม

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีด้วยความกรุณาชี้แนะและช่วยเหลืออย่างดี จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ รมิดายุ อยู่สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์จเร เลิศสุดวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องมาโดยตลอดจนเสร็จเรียบร้อย

ขอบพระคุณสถานประกอบกิจการที่เอื้ออำนวยสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ งบประมาณ และทรัพยากร รวมถึงข้อมูล ทำให้การดำเนินการวิจัยสำเร็จด้วยความราบรื่นและลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

ปีณา มีประดิษฐ์. 2559. การประเมินความเสี่ยงทางด้านการยศาสตร์. กรุงเทพฯ บริษัท โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์ จำกัด.

สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. 2560. แนวทางการจัดการบริการอาชีวอนามัยให้กับแรงงานในชุมชน. กรุงเทพฯ: สำนักโรคจากการประกบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค.

อรรถพล แก้วนวล, บรรพต โลหะพูนตระกูล, กลางเดือน โพชนา. 2560. ความชุกของความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกโครงร่างที่เกี่ยวเนื่องจากการทำงานในอาชีพต่าง ๆ วารสารสาธารณสุขมหาวิทยาลัยบูรพา 12: 54–64.

Hignett, S., McAtamney, L. 2000. Rapid Entire Body Assessment (REBA). Appl. Ergon. 31: 201–205.

Waters, T.R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Fine, L.J. 1993. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. Ergonomics 36: 749–776.

Kuorinka, I., Andersson, G. 1987. Standardised Nordic questionnaires for the analysis. Appl. Ergon. 18: 233–237.

หงษ์ทอง ขันลุน. 2562. การออกแบบและปรับปรุงสถานีงานเพื่อลดความเมื่อยล้าของกล้ามเนื้อจากการยกเคลื่อนย้ายแผ่นธาตุแบตเตอรี่รถยนต์. วารสารวิชาการเกษตรศาสตร์. 2: 490–498.

การปรับปรุงตำแหน่งการวางชิ้นส่วนเครื่องพิมพ์ในคลังสินค้า

Improvement of printer parts location and layout in the warehouse

บงกช เศวตไพศาลกุล*, คเณศ พันธุ์สวาสดิ์

Bongkoch Sawetpaisankul*, Kanate Puntusavase

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: sawetpaisankul_b@su.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงตำแหน่งและผังการวางของชิ้นส่วนในคลังสินค้า การปรับปรุงนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคกฎความสัมพันธ์ (Association Rule) ในการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) เพื่อลดระยะทางการหยิบชิ้นส่วน บริษัทกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตเครื่องพิมพ์อิ๊งค์เจ็ทที่มีมากกว่า 17 รุ่น ตำแหน่งการวางชิ้นส่วนในคลังสินค้าเป็นตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมและไม่คำนึงถึงความถี่ในการหยิบชิ้นส่วน ด้วยเหตุนี้ระยะทางและเวลาจึงสูงสำหรับกระบวนการหยิบ งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิค Association Rule ใน Data Mining เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนที่ใช้ร่วมกันบ่อยๆ จากนั้นจัดตำแหน่งและผังการวางใหม่เพื่อให้ชิ้นส่วนที่สัมพันธ์กันอยู่ใกล้กัน ผลการวิจัยแสดงข้อมูลความแตกต่างก่อนและหลังการจัดเรียงตำแหน่งและผังการวางชิ้นส่วนใหม่ดังนี้ ระยะทางรวมในการหยิบชิ้นส่วนลดลงจาก 2,176,266 เมตร เป็น 1,316,109 เมตร รวมระยะทางลดลง 860,157 เมตร คิดเป็น 39.52%

คำสำคัญ: กฎความสัมพันธ์, การหยิบ, เหมืองข้อมูล

Abstract

This research aims to improve the location and layout of parts in the warehouse. This improvement applies the Association Rule technique in the Data Mining to reduce travel distance of picking the parts. The company in this case study produces inkjet printers with more than 17 different models. The parts locations in the warehouse are inappropriately placed regardless of the frequency of picking up the parts. For this reason, travel distance and time are high for picking operation. The research applies the Association Rule technique in the Data Mining to find the relation of parts that are frequently used together. After that the location and layout are rearranging to be closer. The result shows the difference before and after data of rearrangement of the parts locations and layout. The distance to pick up the parts decrease from 2,176,266 meters to 1,316,109 meters. Total distance decrease 860,157 meters around 39.52%.

Keywords: association rule, data mining, picking operation

คำนำ

ในปัจจุบันการจัดการคลังสินค้าเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพการดำเนินงานในคลังสินค้าให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและลดการสูญเสียจากการดำเนินงาน โดยวัตถุประสงค์หลักอย่างหนึ่งของการจัดการคลังสินค้า คือการลดระยะทางในการปฏิบัติงานหรือการเคลื่อนย้ายในคลังสินค้า การจัดวางตำแหน่งวัตถุดิบในคลังสินค้าเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งมีผลต่อระยะทางในการหยิบวัตถุดิบ (Riverplus, 2554) ข้อมูลจากการศึกษาพบว่า 63% ของค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งหมดในคลังสินค้าเป็นค่าใช้จ่ายในการหยิบสินค้า (Frazelle, 2002) เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่มีความสัมพันธ์กับแรงงานมนุษย์มากที่สุด มีการประมาณการไว้ว่าต้องใช้แรงงานมากถึง 60% (Roodbergen and De Koster, 2001) ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนเราควรมีแนวทางในการปรับปรุงการทำงานในคลังสินค้าให้มีประสิทธิภาพเพื่อทำให้องค์กรมีศักยภาพในการแข่งขันทางธุรกิจได้มากขึ้น

Association Rule เป็นกระบวนการหนึ่งใน Data mining เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ที่มักเกิดขึ้นพร้อมๆกัน โดยเป็นเหตุการณ์ที่เกิดพร้อมกันภายในรายการ (Transaction) ความสัมพันธ์ที่ได้จะช่วยในการจัดวางสินค้าที่มีการหยิบบ่อยๆให้อยู่ใกล้ๆกัน เพื่อความสะดวกในการค้นหา นอกจากนี้ยังสามารถแนะนำสินค้าที่มักซื้อพร้อมกันบ่อยๆเพื่อเพิ่มโอกาสให้ลูกค้าซื้อสินค้าเหล่านี้ (วิภาวรรณ, 2557) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคลังสินค้าโดยการจัดวางตำแหน่งชิ้นส่วนใหม่

บริษัทกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตเครื่องพิมพ์อิ๊งค์เจ็ทที่มีการผลิตมากกว่า 17 รุ่น และมีชิ้นส่วนที่ใช้ 626 ชนิด มีการจัดเก็บชิ้นส่วนแบ่งเป็นคลังสินค้าหลักและคลังสินค้าย่อย โดยคลังสินค้าย่อยจัดวางชิ้นส่วนในปริมาณไม่มากและจัดวางบนชั้นวางที่ไม่สูงทำให้สามารถเดินหยิบได้ ในปัจจุบันพบว่ามีการจัดวางชิ้นส่วนการผลิตที่ไม่เหมาะสม โดยไม่คำนึงถึงความถี่หรือความสัมพันธ์ในการใช้ร่วมกัน ส่งผลทำให้ระยะทางในการหยิบไกลและใช้เวลานาน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาปัญหาจากการจัดวางชิ้นส่วน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการบริหารจัดการคลังสินค้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการประยุกต์ใช้เทคนิค Association Rule เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนที่ถูกหยิบใช้ร่วมกันบ่อยๆ นำไปจัดวางไว้ใกล้กัน ผลลัพธ์จากการจัดวางตำแหน่งชิ้นส่วนใหม่จะทำระยะทางการหยิบลดลง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการจัดการในคลังสินค้าโดยการออกแบบการจัดวางสินค้าใหม่ ให้ผลิตภัณฑ์กลุ่มเดียวกันจัดวางใกล้กันและจัดวางที่มีความถี่สูงอยู่ใกล้ประตูโดยประยุกต์ใช้หลักการ Multi-level association rule ผลการปรับปรุงพบว่าสามารถลดเวลาในการจัดเก็บสินค้าได้ประมาณ 41 นาทีต่อเที่ยวการขนและลดเวลาในการนำสินค้าออกได้ 18 นาทีต่อเที่ยวการขน (นันทนา และปิยะนุช, 2548)

สำหรับการทำเหมืองข้อมูลเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ฐานข้อมูลขนาดใหญ่มักจะถูกนำไปประยุกต์กับงานวิจัยประเภทการตลาดและการขายในการศึกษาพฤติกรรมผู้บริโภคเพื่อเพิ่มยอดขาย และใช้กฎความสัมพันธ์ในการจัดวางสินค้าตามชั้นต่างๆโดยจะเลือกสินค้าที่มักมีการซื้อร่วมกันมาวางไว้ใกล้กันเพื่อให้ลูกค้าสะดุดตาและเลือกสินค้าได้ง่าย (หนึ่งฤทัย, 2559) ส่วนในงานวิจัยประเภทการปรับปรุงคลังสินค้ายังไม่มีงานวิจัยที่นำเทคนิคกฎความสัมพันธ์ไปใช้ในการจัดวางตำแหน่งชิ้นส่วนสำหรับการผลิตเครื่องพิมพ์อิ๊งค์เจ็ทดังงานวิจัยฉบับนี้

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยฉบับนี้มีขั้นตอนในการดำเนินงานแสดงดัง Fig. 1

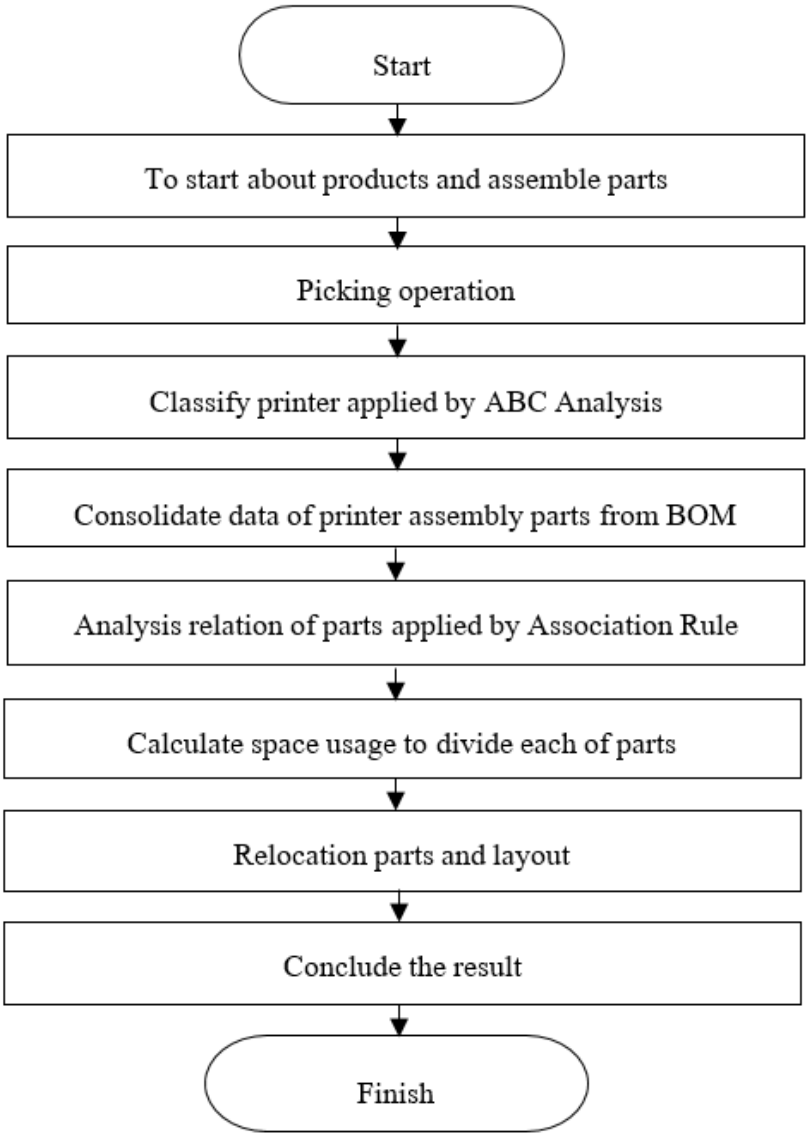


Fig. 1 Research operation flow

ข้อมูลผลิตภัณฑ์และชิ้นส่วน

บริษัทกรณีศึกษาผลิตเครื่องพิมพ์อิ๊งค์เจ็ทแบบ wide-format ที่มีทั้งฟังก์ชั่นการพิมพ์และการตัดโดยผลิตทั้งหมด 17 รุ่น ใช้ชิ้นส่วนทั้งหมด 626 ชนิด และใช้พื้นที่จัดวางชิ้นส่วนสำหรับหยิบไปประกอบ 289.71 ตารางเมตร ซึ่งเป็นพื้นที่คลังสินค้าย่อยอยู่ระหว่างไลน์ผลิตกับคลังสินค้าหลัก แสดงตัวอย่างเครื่องพิมพ์และชิ้นส่วนดัง Fig 2.

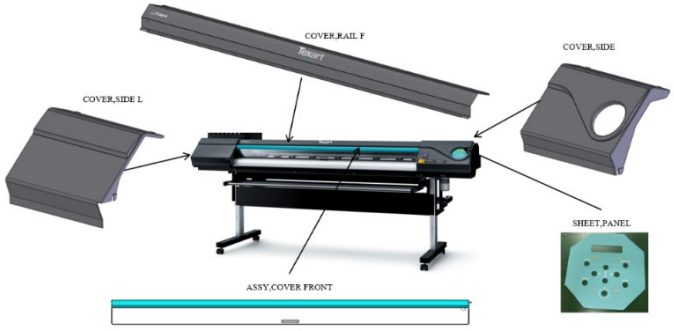


Fig. 2 Examples of printers and assembly parts

ขั้นตอนการทำงานในการหยิบชิ้นส่วน (Picking operation)

การหยิบชิ้นส่วนเพื่อผลิตจะนำรถเข็นไปหยิบชิ้นส่วนในพื้นที่คลังสินค้าย่อย ทำการหยิบจนครบสำหรับการประกอบเครื่องพิมพ์ 1 เครื่อง จากนั้นนำรถเข็นไปจอดรอการประกอบในพื้นที่กำหนดต่อไป โดยมีขั้นตอนการทำงานแสดงดัง Fig. 3 และใช้อุปกรณ์ช่วยแนะนำการหยิบชิ้นส่วนเพื่อแสดง Item code เรียกว่า PDA (Personal Digital Assistants).

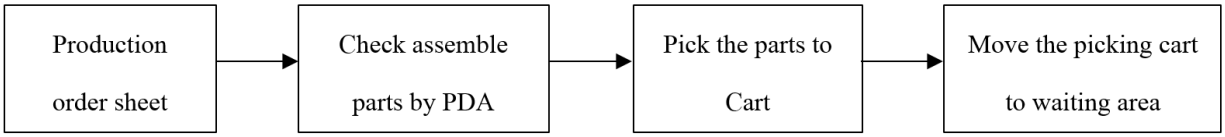


Fig. 3 Picking operation

แบ่งกลุ่มเครื่องพิมพ์โดยใช้ ABC Analysis

ทำการแบ่งกลุ่มเครื่องพิมพ์ตามหลักเกณฑ์การวิเคราะห์แบบเอบีซี ซึ่งได้ประยุกต์มาจากหลักการของพาเรโต คือสิ่งที่สำคัญจะมีอยู่เป็นจำนวนที่น้อยกว่า สิ่งที่ไม่สำคัญซึ่งมักจะมีจำนวนที่มากกว่าในอัตราส่วน 20 ต่อ 80 (Stock and Lambert, 2001) เพื่อนำไปพิจารณาว่าชิ้นส่วนที่ประกอบเครื่องพิมพ์รุ่นไหนจะถูกจัดวางก่อน โดยปัจจัยในการจัดกลุ่มคือ สัดส่วนจำนวนรุ่นและสัดส่วนปริมาณการผลิต ซึ่งเป็นข้อมูลแผนการผลิตในช่วงเดือน มีนาคม 2563–มีนาคม 2564 โดยกลุ่ม A มีปริมาณการผลิตมาก กลุ่ม B การผลิตปานกลาง และกลุ่ม C มีการผลิตน้อย ผลลัพธ์แสดงดัง Table 1.

Table 1 Show group of printer after classify by ABC analysis

Group	Model	Model amount	Product volume
A	VG2-54, VG2-64, SG2-54, RF-64 (4)	23.5%	80.3%
B	SG2-30, VF2-64, LEC2-30, SG2-64, VS-30, LEC2-33 (6)	35.2%	16.1%
C	VS-64, LEC2-64, RT-64, SP-54, SP-30, RT-64M, VS-54 (7)	41.1%	3.6%

ข้อมูลชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์จาก BOM (Bill of Material)

ดึงข้อมูลชิ้นส่วนที่ใช้ผลิตเครื่องพิมพ์ทั้งหมด (BOM) จากระบบการผลิตของโรงงานโดยข้อมูลที่ได้เป็น CSV ไฟล์จากนั้นทำการแปลงข้อมูลให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้นโดยให้อยู่ในรูปของเอ็กเซลไฟล์ โดยข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลชิ้นส่วนที่ใช้ผลิตสำหรับเครื่องพิมพ์แต่ละรุ่น ซึ่งจะแสดงเป็นรหัสชิ้นส่วน (item code) และจำนวนที่ใช้ (usage) จากนั้นจะนำข้อมูลชิ้นส่วนที่ใช้ผลิตสำหรับเครื่องพิมพ์กลุ่ม A คือ VG2-54, VG2-64, SG0-54 และ RF-64 มี 300 ชนิดจากทั้งหมด 626 ชนิด นำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในการหยิบใช้ร่วมกันเป็นคู่ต่อไป

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิคกฎความสัมพันธ์ (Association Rule)

นำข้อมูลจาก BOM มาทำการหาความสัมพันธ์ในการหยิบใช้ร่วมกันโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเตรียมข้อมูล

ทำการเตรียมและแปลงข้อมูลเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ในการหากฎความสัมพันธ์ โดยใช้ฟังก์ชั่นเอ็กเซล IF(logical_test, [value_if_true], [value_if_false]) ในการเปลี่ยนจำนวนการใช้ชิ้นส่วนแต่ละชนิด แสดงดังนี้เลข 1 แสดงการใช้ชิ้นส่วนนั้น และเลข 0 แสดงการไม่ใช้ชิ้นส่วนนั้น เพื่อทำให้ข้อมูลแสดงว่าเครื่องพิมพ์แต่ละรุ่นใช้ชิ้นส่วนชนิดใดบ้าง แสดงตัวอย่างข้อมูลดัง Fig 4.

2. คำนวณหาค่าการหยิบใช้ (Support)

ทำการคำนวณหาค่า Support ของชิ้นส่วนแต่ละชนิด เพื่อดูโอกาสในการหยิบชิ้นส่วนนั้นๆ วิธีการคำนวณค่า Support ตาม Equation 1 และตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการคำนวณแสดงดัง Fig 5. (สุรพงค์, 2561)

$$\text{Support (A)} = \frac{\text{Frequency (F)}}{\text{All of transaction (N)}} \quad (1)$$

F คือ จำนวนรุ่นที่มีการหยิบใช้ชิ้นส่วน

N คือ จำนวนรุ่นการผลิตทั้งหมด

No.	Item code	VG2-54	VG2-64	SG2-54	RF-64	SG2-30	VF2-64	LEC2-30	SG2-64	VS-30	LEC2-33	VS-64	LEC2-64	RT-64	SP-54	SP-30	RT-64M	VS-54	Frequency (Times)	Support
1	18833	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	9	52.94%
2	12971	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	64.71%
3	12982	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	64.71%
4	12989	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	100.00%
5	15596	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	6	35.29%
295	11894	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	3	17.65%
296	06779	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	6	35.29%
297	12009	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	6	35.29%
298	19679	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	35.29%
299	19755	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	35.29%
300	20260	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	35.29%

Fig. 4 Show the data of parts picking frequency and Support

ผลจากการคำนวณอ้างอิงข้อมูลจากใน Fig. 4 พบว่า

1. มีชิ้นส่วนทั้งหมด 12 ชนิด ที่หยิบใช้ร่วมกันทุก Transaction หรือทุกรุ่น ค่า Support 100% คือหยิบใช้ทั้งหมด 17 รุ่น
2. มีชิ้นส่วนทั้งหมด 248 ชนิด ที่หยิบใช้ร่วมกันน้อยกว่าค่า Support 50% คือหยิบใช้น้อยกว่า 9 รุ่น
3. ชิ้นส่วนทั้งหมด 259 ชนิดมีการหยิบใช้ร่วมกับรุ่นอื่นๆในกลุ่ม B และC ด้วย

3. หาความสัมพันธ์ในการหยิบใช้พร้อมกันเป็นคู่

เมื่อได้ค่าการหยิบใช้แต่ละชิ้นส่วนนำข้อมูลมาจัดเรียงจากมากไปน้อย จากนั้นประยุกต์ใช้หลัก Association rule ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในการทำ Data mining หาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ที่มักเกิดขึ้นพร้อมๆกันเสมอ เมื่อทราบความสัมพันธ์เช่นนี้แล้วจะช่วยในการจัดวางสินค้าที่มีการซื้อพร้อมกันบ่อยๆให้อยู่ใกล้ๆกัน โดยการประยุกต์ใช้ในงานวิจัย คือทำการหาความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนที่มีความถี่ในการหยิบพร้อมกันทีละคู่ ใช้ข้อมูลปริมาณการผลิตมาทำการหาความถี่ในการหยิบ โดยใช้ฟังก์ชั่นเอ็กเซล SUMPRODUCT (array1,[array2], [array3]) ชิ้นส่วนคู่ใดมีความสัมพันธ์กันมากที่สุดหรือหยิบใช้ร่วมกันบ่อยที่สุดจะนำมาจัดวางตำแหน่งใกล้ๆ แสดงตัวอย่างคำนวน Fig 5.

No.	Item code	VG2-54	VG2-64	SG2-54	RF-64	SG2-30	VF2-64	LEC2-30	SG2-64	VS-30	LEC2-33	VS-64	LEC2-64	RT-64	SP-54	SP-30	RT-64M	VS-54	Frequency (Times)	Support	ASSOCIATION (Times)
4	12989	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	=SUMPRODUCT($G$3:$W$3,G4:W4,$G$303:$W$303)	
7	12959	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SUMPRODUCT(**array1**, [array2], [array3], [array4], [array5], ...)	
12	12945	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	100.00%	15483
13	12954	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	100.00%	15483
16	12985	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	100.00%	15483
223	19732	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	2206
240	19734	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	2206
2	19734	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	2206
3	19734	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	4215
246	19734	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	4215
247	19730	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	2813
261	20770	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	2813
278	20775	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	4215
289	19894	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.88%	
	ปริมาณผลิต	4215	3200	2813	2206	680	562	393	375	258	225	188	125	107	61	31	30	14			

ชิ้นส่วนที่ 1-4

Fig. 5 Shows how often each pair is picked up

จาก Fig. 5 พบว่าความถี่มากที่สุดในการหยิบชิ้นส่วนใช้ร่วมกัน คือ 15,483 ครั้ง คือมีการหยิบใช้ทุกรุ่น ซึ่งชิ้นส่วนที่ 1 และ 2 ถูกหยิบใช้ร่วมกันบ่อยที่สุดจะถูกวางใกล้กัน และยังมีชิ้นส่วนที่ 3 และ4 ที่มีการหยิบใช้ร่วมกันบ่อยๆด้วย ดังนั้นจะทำการวางชิ้นส่วนทั้งสองชนิดนี้วางไว้ใกล้กับชิ้นที่ 2 ด้วย

คำนวณการใช้พื้นที่เพื่อจัดแบ่งพื้นที่ของชิ้นส่วน

ทำการจัดแบ่งพื้นที่คลังสินค้าในการวางแต่ละชิ้นส่วนว่าสามารถวางได้เท่าไหร่ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตหรือความถี่ในการหยิบใช้ ผู้วิจัยใช้ข้อมูลในเดือนที่มีแผนผลิตมากที่สุดมาคำนวณตาม Equation 2

$$\text{พื้นที่ของชิ้นส่วนที่วางได้} = \left(\frac{\text{พื้นที่ของชิ้นส่วนที่ใช้วางต่อหนึ่งหน่วย} \times \text{ปริมาณการผลิต} \times \text{พื้นที่มีทั้งหมด}}{\text{พื้นที่วางชิ้นส่วนที่ต้องการวางทั้งหมด}} \right) \quad (2)$$

จากการคำนวณจะได้ส่วนแบ่งพื้นที่ในการวางชิ้นส่วนตามปริมาณการผลิตหรือความถี่ในการหยิบใช้

จัดวางชิ้นส่วนใหม่

ทำการจัดวางตำแหน่งชิ้นส่วนและผังการวางใหม่โดยจัดวางชิ้นส่วนที่หยิบใช้ร่วมกันบ่อยๆไว้ใกล้กัน ซึ่งจะทำการวางชิ้นส่วนที่ใช้ประกอบเครื่องพิมพ์ในกลุ่ม A จนครบก่อนโดนจะเลือกวางติดทางเดินก่อน ลำดับถัดไปเลือกวางชิ้นส่วนที่ผลิตเครื่องพิมพ์กลุ่ม B และ C ตามลำดับ โดยวางที่มีความถี่สูงก่อน กำหนดลำดับการหยิบเรียงตามรหัสพื้นที่จากเลขน้อยไปเลขมากคือ 001 ถึง 1212

สรุป

ผลการปรับปรุงจะพิจารณาตำแหน่งการจัดวางชิ้นส่วนใหม่ และระยะทางการหยิบชิ้นส่วนไปประกอบเครื่องพิมพ์แต่ละรุ่น โดยเมื่อจัดวางชิ้นส่วนใหม่ตามความสัมพันธ์ในการใช้ร่วมกันแล้วจะได้เส้นทางที่หยิบชิ้นส่วนแต่ละรุ่นมาทำการหาระยะทางโดยใช้แผนภูมิจาก ไป-(From-To Chart) แสดงตัวอย่างดัง Table 2 ซึ่งจะทำการประมาณระยะทางจาก ขนาดพื้น ขนาดช่องทางเดินและขนาดของชั้นวางจากนั้นหาผลรวมของระยะทางคำนวณตาม Equation 3

$$\text{ระยะทางรวมของการหยิบชิ้นส่วน} = \sum_{i=1}^{n} f_i d_i \quad (3)$$

f = ความถี่ในการหยิบชิ้นส่วน (ปริมาณการผลิต)

d = ระยะทางในการเดินหยิบชิ้นส่วน

n = จำนวนรุ่นเครื่องพิมพ์

Table 2 The sample of From-To-Chart show travel distance of product group A

To / From	VG2-54	VG2-64	SG2-54	RF-64
Distance (d)	86.5	81.47	75.56	73.3
Parts picking frequency (f)	4215	3200	2813	2206
Total distance (f × d)	364,598	260,704	212,550	161,700

จากแผนภูมิจาก - ไป แสดงข้อมูลระยะทาง ความถี่การหยิบ และระยะทางรวมของการหยิบชิ้นส่วนที่ใช้หยิบสำหรับนำมาประกอบเครื่องพิมพ์กลุ่ม A ทั้ง 4 รุ่น

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงตำแหน่งการจัดวางชิ้นส่วนในคลังสินค้า เพื่อลดระยะทางในการหยิบชิ้นส่วน โดยประยุกต์ใช้ Association Rule เพื่อหาความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนที่ถูกหยิบใช้ร่วมกันบ่อยๆ จากนั้นทำการจัดวางชิ้นส่วนใหม่ให้ชิ้นส่วนที่ถูกหยิบใช้ร่วมกันบ่อยๆ วางไว้ใกล้กัน ซึ่งผลการวิจัยพบว่าเส้นทางการหยิบชิ้นส่วนมาประกอบมีเส้นทางที่หยิบง่ายขึ้นไม่ข้ามไป-มา โดยจะแสดงตัวอย่างเส้นทางการหยิบก่อนและหลังปรับปรุงของเครื่องพิมพ์รุ่น VG2-54 ซึ่งเป็นรุ่นที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุด ดัง Fig. 6 และ Fig. 7 โดยกำหนดสัญลักษณ์ คือ

1. ▭ หมายถึง ตำแหน่งที่หยิบชิ้นส่วน

2.  หมายถึง เส้นทางการหยิบชิ้นส่วน

3.  หมายถึง จุดอ้างอิงในการวัดระยะทาง start – finish เป็นจุดที่เริ่มหยิบไปจนครบสำหรับประกอบเครื่องพิมพ์ 1 เครื่อง

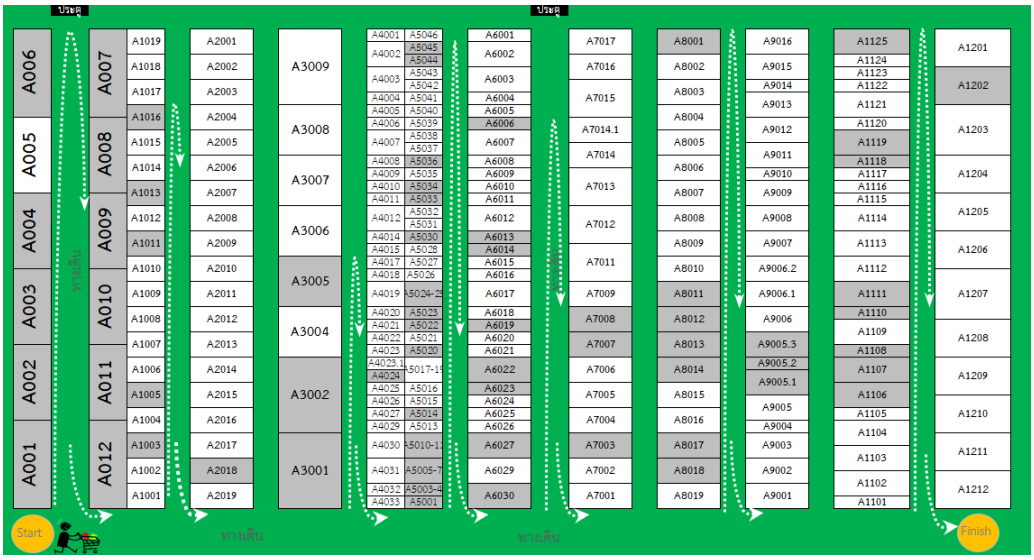


Fig. 6 The layout and pick-up route of the VG2-54 model before improvement

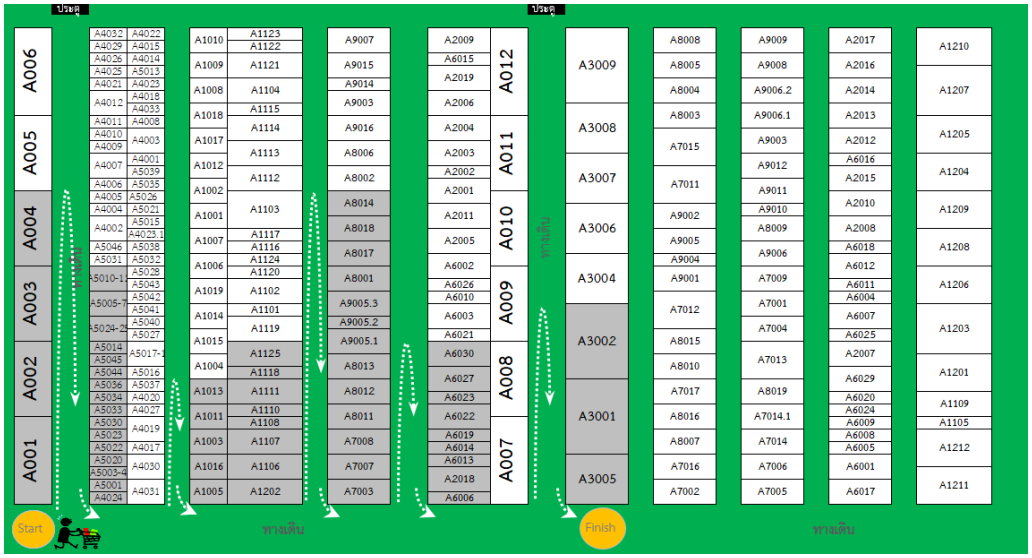


Fig. 7 The layout and pick-up route of the VG2-54 model after improvement

โดยเส้นทางการหยิบจะส่งผลโดยตรงให้ระยะทางของการหยิบชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์แต่ละรุ่นลดลง การวัดระยะทางที่ได้จวัดจากจุดอ้างอิง start ในการเริ่มเดินหยิบชิ้นส่วนจนครบถึงจุด finish สำหรับการประกอบเครื่องพิมพ์ 1เครื่อง ผลของระยะทางการหยิบจะแบ่งเป็นกลุ่มตาม ABC analysis ซึ่งแสดงระยะทางก่อน-หลังปรับปรุงดัง Table 3

Table 3 The result of travel distance before and after improvement

Product Group	Before (m)	After (m)	Difference	Reduce Ratio %
A	1,753,589	999,552	754,037	42.29%
B	363,716	248,189	115,527	31.76%
C	58,960	68,368	(9,408)	-15.95%
Total	2,176,266	1,316,109	860,157	39.52%

จากการวิจัยได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นคือระยะทางรวมการหยิบชิ้นส่วนลดลง สำหรับงานวิจัยนี้ในกรณีที่มีข้อมูลมากขึ้นอาจต้องใช้เทคนิคนี้ร่วมกับโปรแกรมการคำนวณอื่นๆ และในการจัดวางชิ้นส่วนมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดอาจจะไม่สามารถจัดวางให้มีระยะทางที่ลดลงทุกรุ่นได้ อีกทั้งในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลการผลิตในปัจจุบันจึงเป็นเพียงแนวทางเพื่อเตรียมความพร้อมในการเปลี่ยนแปลงและทำการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและส่งผลต่อกำไรในด้านธุรกิจ

สรุป

จากการศึกษาและวิจัยครั้งนี้เพื่อปรับปรุงการจัดวางชิ้นส่วนและผังการวางในพื้นที่คลังสินค้าของโรงงานผลิตเครื่องพิมพ์อิ๊งเจ็ทให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นโดยประยุกต์ใช้เทคนิค Association rule ใน Dada mining ในการหาความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนที่หยิบใช้ร่วมกันบ่อยๆ นำมาจัดวางไว้ใกล้กัน ซึ่งพิจารณาวางชิ้นส่วนที่มีความถี่ในการใช้สูงคือ ชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์กลุ่ม A ที่เป็นกลุ่มที่มีปริมาณการผลิตสูง 80.3% จากการใช้เทคนิคแบ่งกลุ่มแบบ ABC analysis โดยเริ่มวางใกล้ทางเดินและกำหนดเส้นทางการเดินเพื่อให้ระยะทางการหยิบลดลง ซึ่งส่งผลโดยตรงกับเวลาและต้นทุนการผลิต จากนั้นพิจารณาวางกลุ่ม B และ C ตามลำดับ ผลการปรับปรุงพบว่าระยะทางการหยิบชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์ทั้งหมดลดลงจาก 2,176,266 เมตร เป็น 1,316,109 เมตร คิดเป็น 39.52%

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท โรแลนด์ ดิจิตอล กรุ๊ป (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ได้ให้ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

นันทนา ธรรมาวุฒิ, ปิยะนุช เปรมปรีดิ์. 2548. การจัดการพัสดุคงคลัง กรณีศึกษาโรงงานผลิตโคมไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วิภาวรรณ บัวทอง. 2557. Association Rule. http://wipawanblog.files.wordpress.com/2014/06chapter-4-association-rule.pdf, 13 กรกฎาคม 2563

หนึ่งฤทัย ชัยอาภร. 2559. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดาต้าไมน์นิ่ง. http://epr.mju.ac.th/acticleDetail/, 25 กรกฎาคม 2563.

สุรพงค์ เอื้อวัฒนามงคล. 2561. การทำเหมืองข้อมูล, พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์สถาบันฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพฯ

เมธินี ศรีกาญจน์, ชุมพล มณฑาทิพย์กุล. 2555. การปรับปรุงประสิทธิภาพตำแหน่งการจัดวางสินค้าในคลังสินค้า

กรณีศึกษาบริษัทศรีไทยซุปเปอร์แวร์จำกัดสาขาสุขสวัสดิ์. WMS Journal of Management 2: 8–20

Frazelle. E. 2002. World-Class Warehousing and Material Handling. 1st ed. New York McGraw-Hill, NY, USA.

James R. Stock, Douglas M. Lambert. 2001. Strategic logistics management. 4th ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin

Riverplus Success Industrial Solutions. Warehouse Management (การจัดการคลังสินค้า) Basic Knowledge. https://riverplus.com/2011-08-18-warehouse-management-basic-knowledge/, 25 กรกฎาคม 2563

Roodbergen, K.J., De Koster, René B.M. 2001. Routing methods for warehouse with multiple cross aisles. Int. J. Prod. Res. 39: 1865–1883. doi:10.1080/00207540110028128

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม

A study of asphalt concrete with aluminium dross and aluminium white powder sludge

ภานุวัฒน์ รัตนอุดม, วีระเกษตร สวนผกา*, วัชรินทร์ วิทยกุล

Panuwat Rattana-U-Dom, Weerakaset Suanpaga*, Watcharin Witayakul

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยปัจจุบันอลูมิเนียมเป็นโลหะที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย มีคุณสมบัติเด่นหลายประการจึงถูกนำมาใช้งานทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ดีกระบวนการหลอมอลูมิเนียมนั้นทำให้เกิดเป็นขยะตามมา ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการนำตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมาผสมกับแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกกับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมในอัตราส่วน 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม และยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้เป็นเกรด AC 60/70 สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อศึกษาช่องว่างของตัวอย่าง ค่าเสถียรภาพ และค่าการไหล ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงกลในแต่ละอัตราส่วนผสมของตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมและพบว่าตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต, ตะกรันอลูมิเนียม, ผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม, ค่าเสถียรภาพ

Abstract

In the present aluminum is a widely used material which has several outstanding properties. It is used in both the household and industrial sectors. However, the aluminium melting process generates a waste called aluminium dross. The objective of this study is to investigate the use of aluminium dross and aluminium white powder sludge as an asphalt concrete modifier. The study aimed to compare the physical properties of base asphalt binder AC 60/70 and modified asphalt binders with different percentage of aluminium dross and aluminium white powder sludge 2.5%, 5%, 7.5% and 10% by weight of aggregates. The conventional tests were conducted including Physical Properties Test and Engineering Properties Test to determine the properties of asphalt binders modified by aluminium dross and aluminium white powder sludge. The performance of the asphaltic concrete specimens was then evaluated in terms of its Stability and Flow. The results demonstrated that the various amounts of aluminium dross and aluminium white powder sludge affect the physical properties of asphalt binders and the addition of aluminium dross and aluminium white powder sludge improved the stability significantly.

Keywords: aluminium dross, aluminium white powder sludge, asphalt concrete, stability

คำนำ

ปัจจุบันปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ผิวจราจรรับน้ำหนักกระทำซ้ำเกินกว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ เป็นสาเหตุให้ผิวจราจรเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานสั้นลง จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีต ที่สามารถรองรับปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้าง และพัฒนาส่วนผสม เช่น การเติมวัสดุผสมแทรก การเปลี่ยนขนาดคละที่ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลง การเปลี่ยนชนิดยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ หรือการเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เป็นต้น ตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงของอนุภาคสูง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมแทรกในแอสฟัลต์คอนกรีตได้

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก มีความหนาแน่นต่ำจึงทำให้มีน้ำหนักเบา รับน้ำหนักได้ดีทนต่อการกัดกร่อนและไม่เป็นสนิม แต่อย่างไรก็ดีกระบวนการหลอมอลูมิเนียมนั้นจะทำให้เกิดของเสียตามมา เรียกว่าตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม โดยข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2549–2553 มีปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียมประมาณ 30,000 ตันต่อปี (ดิษยพงษ์, 2555) จึงทำให้ของเสียจากเตาหลอมอลูมิเนียมมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงปัญหาการลักลอบทิ้งของเสียอย่างผิดกฎหมาย ดังนั้นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและการลักลอบทิ้งของเสียจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการแก้ไข สิ่งหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาลักลอบทิ้งได้ คือ การนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีหรือการนำเอาของเสียไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมกับตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม โดยทำการทดสอบตามกระบวนการผสมร้อนด้วยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Test) วัสดุเชื่อมประสานคือแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 และนำผลมาเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสมกับตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัสดุที่ใช้ในออกแบบ

1. ตะกรันอลูมิเนียม (Aluminium Dross) จากโรงงานหลอมอลูมิเนียม ดังแสดงใน Fig. 1 และผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม (Aluminium White Powder Sludge) จากโรงงานอโนไดซ์ ดังแสดงใน Fig. 2 และมีคุณสมบัติดังแสดงใน Table 1



Fig. 1 Aluminium Dross

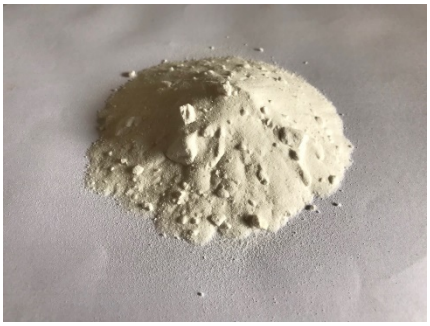


Fig. 2 Aluminium White Powder Sludge

Table 1 Properties of Mineral Fillers for Bituminous Paving Mixture

Sieve size	Percent Passing (%)
0.600mm (No.30)	100
0.300mm (No.50)	75–100
0.075mm (No.200)	55–100

2. แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.851-2561 : มาตรฐานแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง

3. มวลรวม (Aggregates) จากแหล่งโรงโม่หินสมบูรณ์ศิลาทอง ต.นากระตาม อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร โดยให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช.209-2545 : มาตรฐานวัสดุมวลรวมสำหรับงานแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเป็นส่วนผสมที่จะใช้ในการเตรียมก้อนตัวอย่าง ในการศึกษานี้จะออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์สำหรับถนนที่มีการจราจรหนาแน่น (Heavy Traffic) โดยการผสมวัสดุมวลรวมที่ได้จากการจัดขนาดคละกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 และ 6.0 โดยน้ำหนักของมวลรวม และทำการบดอัดก้อนตัวอย่างจำนวน 75 ครั้ง ทั้งสองด้าน จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติเพื่อหาค่าที่เหมาะสมเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทช.230-2545 : มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

การเตรียมก้อนตัวอย่าง

การเตรียมก้อนตัวอย่างจะนำตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมาผสมเพิ่มเข้าไปในวัสดุมวลรวมที่ได้จากการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงใน Table 2 โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

Table 2 Mineral Filler Content (percent by aggregate weight)

Mixed sample	Mineral Filler Content (percent by aggregate weight)	
	Aluminium Dross	Aluminium White Powder Sludge
HMA	-	-
D2.5	2.5	-
W2.5	-	2.5
D5.0	5.0	-
W5.0	-	5.0
D7.5	7.5	-

Table 2 (continued).

Mixed sample	Mineral Filler Content (percent by aggregate weight)	
	Aluminium Dross	Aluminium White Powder Sludge
W7.5	-	7.5
D10.0	10.0	-
W10.0	-	10.0

การทดสอบคุณสมบัติ

ภายหลังจากการเตรียมก้อนตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ช่องว่างอากาศ (Air Voids; AV) ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate; VMA) ช่องว่างที่ถูกปกคลุมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Voids Filled with Bitumen; VFB) เสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) โดยทำการทดสอบตามกระบวนการผสมร้อนด้วยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Test) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดลองของกรมทางหลวงชนบท มทช.(ท) 607-2545 : มาตรฐานการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม และการจัดขนาดคละ

ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม จากแหล่งวัสดุ โรงโม่หินสมบูรณ์ศิลาทอง ต.นากระตาม อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท ดังแสดงใน Table 3 และเมื่อนำวัสดุมวลรวมมาจัดขนาดคละให้อยู่ในขอบแขตบนและขอบเขตล่างของข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท จะได้อัตราส่วนผสม คือ Bin 1 : Bin 2 : Bin 3 : Bin 4 = 42 : 20 : 18 : 20 ดังแสดงใน Table 4

Table 3 The test results of aggregate properties

Properties	Desired	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4
Percentage of wear	< 40 %	-	24.88	25.34	27.96
Sand Equivalent	> 50 %	71.05	-	-	-
Soundness Test	< 9 %	-	-	-	-
Flakiness Index	< 30 %	-	21.88	19.60	17.01
Elongation lndex	< 30 %	-	16.48	17.96	19.45

Table 4 Grading of aggregates

Sieve Size	% Passing				Combined	Desired	Tolerance Limit
	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4			
1"	100	100	100	100	100	100	100-100
3/4"	100	100	100	100	100	90-100	90-100
1/2”	100	100	100	100	89.56	-	80-100
3/8”	100	100	99.22	48.51	66.76	56-80	56-80
#4	100	98.39	25.33	2.62	42.44	35-65	35-65
#8	98.37	5.13	0.37	0.15	33.36	23-49	23-49
#30	31.80	0.56	0.00	0.00	13.47	-	8-35
#50	19.99	0.00	0.00	0.00	8.39	5-19	5-19
#100	13.19	0.00	0.00	0.00	5.54		4-15
#200	10.65	0.00	0.00	0.00	4.47	2-8	2-8
Mix Proportion	42	20	18	20			

ผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

จากการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์สำหรับถนนที่มีการจราจรหนาแน่น (Heavy Traffic) โดยใช้วัสดุมวลรวมตาม Table 4 ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ จากนั้นทำการทดสอบเพื่อหาค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท จากผลการทดสอบจึงได้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 4.9 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม ซึ่งมีปริมาตรช่องว่างอากาศอยู่ที่ 4.5 % (ตามข้อกำหนดระบุให้มีปริมาตรช่องว่างอากาศอยู่ระหว่าง 3–6%) โดยมีคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงใน Fig. 3

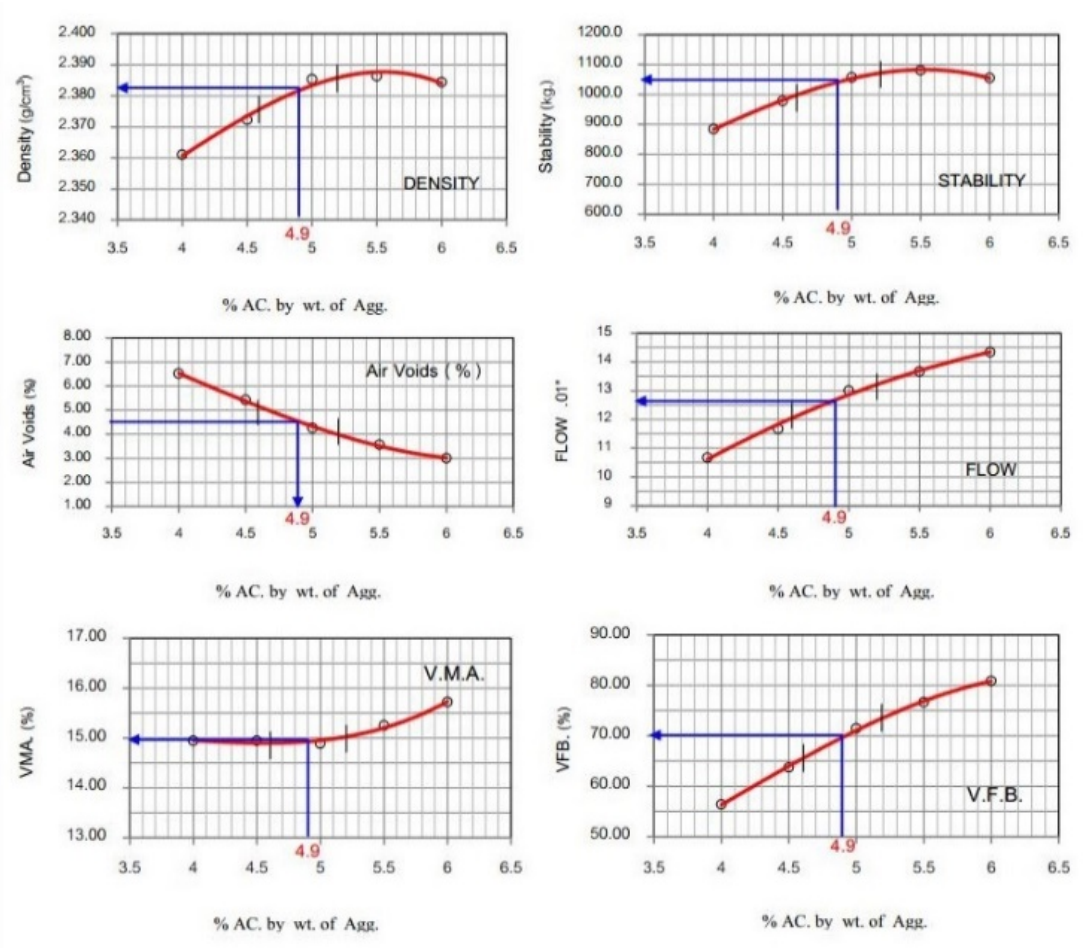


Fig. 3 Design of Asphalt Concrete Mixed Ratio by Using Marshall Method

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรม

1. ผลการวิเคราะห์ช่องว่างของก้อนตัวอย่าง

จากผลการเปรียบเทียบช่องว่างอากาศ (Air Voids; AV) ของก้อนตัวอย่างพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมีปริมาณช่องว่าอากาศมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนผสมในก้อนตัวอย่าง ดังแสดงใน Fig. 4 อาจเนื่องมาจากปริมาณของตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างได้หมด และกระจัดกระจายตัวอยู่ตามผิวของวัสดุมวลรวม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่มีค่าต่ำลงในขณะที่ปริมาณอัตราส่วนเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท ที่ระบุให้มีปริมาตรช่องว่างอากาศที่ 3–6% พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมในอัตราส่วน 2.5%, 5.0% และ 7.5% และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมในอัตราส่วน 10% ผ่านตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท

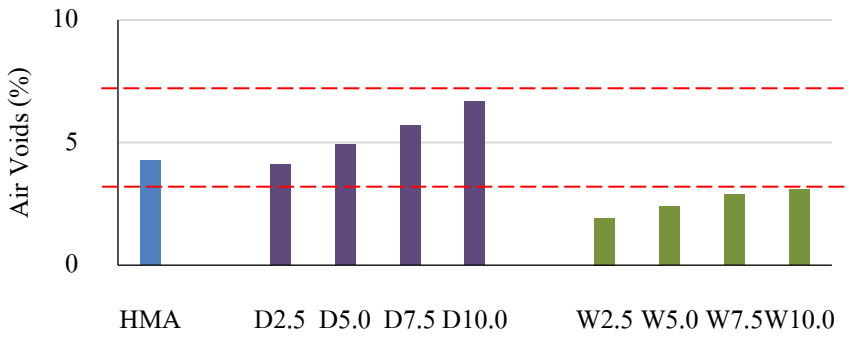


Fig. 4 The comparison of air void contents for specimens

จากผลการวิเคราะห์ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate; VMA) และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Voids Filled with Bitumen; VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมีปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนผสมในก้อนตัวอย่าง และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนผสมในก้อนตัวอย่าง ดังแสดงใน Fig. 5

เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก จะสังเกตได้ว่าตะกรันอลูมิเนียมทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดลง อาจเนื่องมากจากเมื่อตะกรันอลูมิเนียมผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์จะดูดซึมและจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม อีกทั้งยังทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้ แตกต่างกันกับผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างช่องว่างของอนุภาคมวลรวมได้ และไม่จับตัวกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ยังคงสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้อีกด้วย

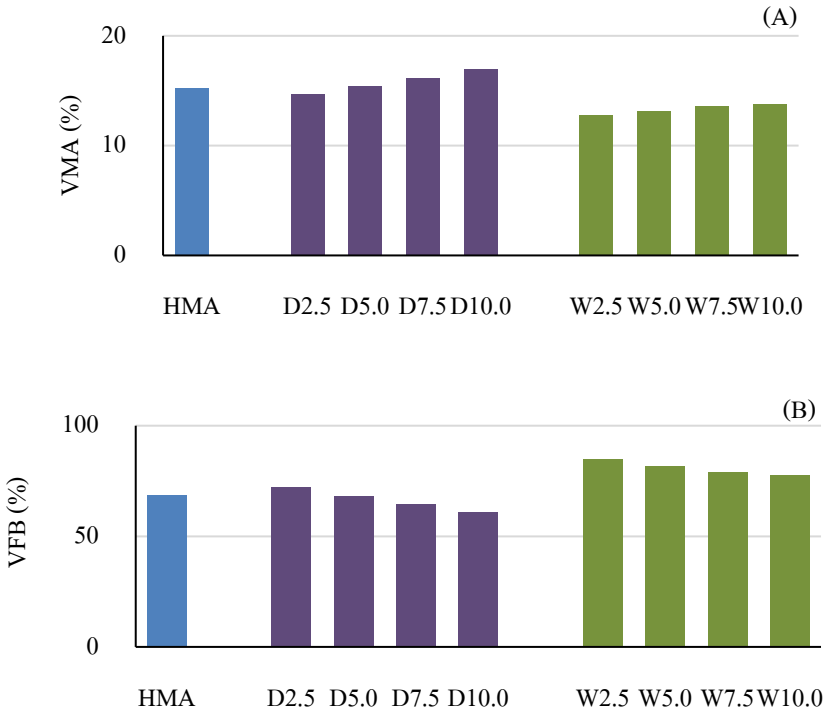


Fig. 5 The comparison of Voids in Mineral Aggregate (A) and Voids Filled with Bitumen (B) for specimens

2. ผลการหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

จากการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมีค่าเสถียรภาพน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนผสมในก้อนตัวอย่างและเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมีค่าเสถียรภาพมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกในทุกอัตราส่วน โดยอัตราส่วนที่มีค่าเสถียรมากที่สุดคือ 2.5% มีค่าเท่ากับ 2,652 ปอนด์ ในส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมที่มีค่าเสถียรภาพมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก อยู่ที่อัตราส่วน 2.5% และ 5% มีค่าเท่ากับ 2,282 ปอนด์ และ 2,325 ปอนด์ ตามลำดับ ซึ่งแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมในทุกอัตราส่วนมีค่าเสถียรภาพผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท ที่ระบุให้มีค่าเสถียรภาพมากกว่า 1,800 ปอนด์ ดังแสดงใน Fig. 6A

ในส่วนของการเปรียบเทียบค่าการไหล (Flow) ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมีค่าการไหลน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกในทุกอัตราส่วน และในส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียม พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก อยู่ในช่วง 12–13 โดยค่าการไหลจะขึ้นอยู่กับการออกแบบขนาดคละ การจัดเรียงตัวของมวลรวม และการบดอัดก้อนตัวอย่าง ซึ่งแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมในทุกอัตราส่วนมีค่าการไหลผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ระบุให้มีค่าการไหลอยู่ในช่วง 8–16 ดังแสดงใน Fig. 6B

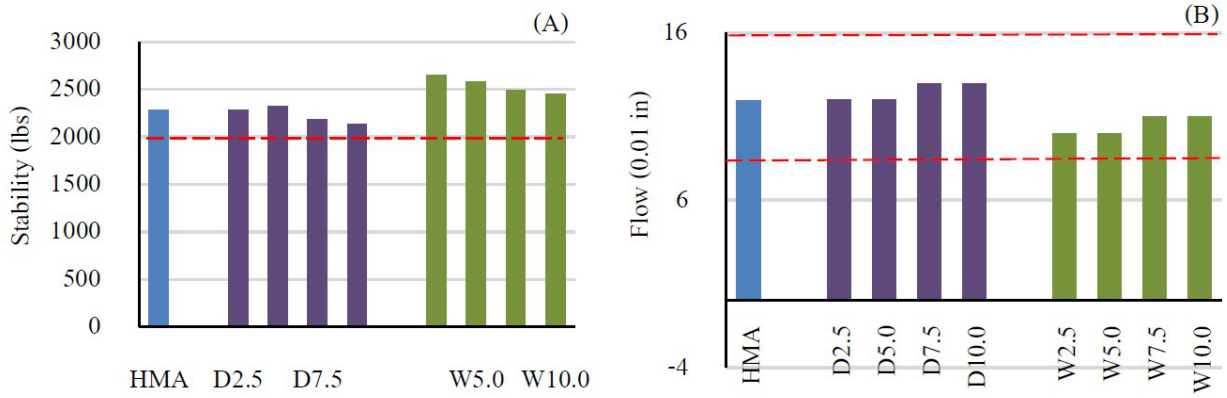


Fig. 6 The comparison of stability (A) and Flow (B) for specimens

อัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต จากการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหล (Stability/Flow) ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมมีค่าเสถียรภาพต่อการไหลน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนในก้อนตัวอย่าง โดยอัตราส่วนที่มีค่ามากที่สุดคือ 2.5% และในส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียม อัตราส่วนที่มีค่ามากที่สุดคือ 5% ซึ่งแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาว

อลูมิเนียมในทุกอัตราส่วนมีค่าเสถียรภาพต่อการไหลผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท ที่ระบุให้มีค่าเสถียรภาพต่อการไหลมากกว่า 160 ปอนด์/0.01 นิ้ว ดังแสดงใน Fig. 7

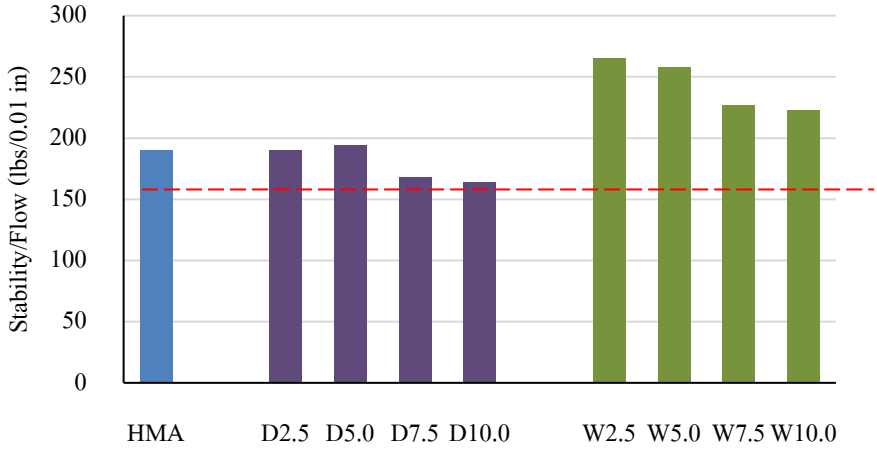


Fig. 7 The comparison of stability/Flow for specimens

สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงฝุ่นขาวอลูมิเนียมเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันอลูมิเนียม ทำให้ช่องว่างอากาศและช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดลง ส่วนค่าเสถียรภาพและค่าการไหลมีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก โดยอัตราส่วนที่มีค่าเสถียรภาพสูงที่สุดและมีคุณสมบัติผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท สามารถนำไปใช้ในงานทางได้ ก็คือ 5% โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม ซึ่งมีค่าเสถียรภาพเท่ากับ 2,325 ปอนด์

2. แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยผงฝุ่นขาวอลูมิเนียม ทำให้ช่องว่างอากาศและช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมลดลง แต่ทำให้ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น ในส่วนของค่าเสถียรภาพมีค่ามากขึ้นและมีค่าการไหลน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก โดยอัตราส่วนที่มีค่าเสถียรภาพสูงที่สุดและมีคุณสมบัติผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท สามารถนำไปใช้ในงานทางได้ ก็คือ 10% โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม ซึ่งมีค่าเสถียรภาพเท่ากับ 2,448 ปอนด์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเกษตร สวนผกา รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โรจนโรวรรณ และนายเกริกเกียรติ นุตาลัย ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการดำเนินงานงานวิจัย และขอขอบพระคุณ โครงการก่อสร้างถนนสายแยกทางหลวงหมายเลข 4198 – เทศบาลปากน้ำหลังสวน อ.ทุ่งตะโก, หลังสวน จ.ชุมพร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่คอยให้ความช่วยเหลือทำให้งานวิจัยนี้บรรลุวัตุประสงค์และสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวงชนบท. 2545. มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท หมวดงานทาง มทช. 209-2545 มาตรฐานวัสดุมวลรวมสำหรับงานแอสฟัลต์คอนกรีต, กรุงเทพฯ.

กรมทางหลวงชนบท. 2545. มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท หมวดงานทาง มทช. 230-2545 มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต, กรุงเทพฯ.

กรมทางหลวงชนบท. 2545. มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท หมวดงานทดสอบงานทาง มทช.(ท) 607-2545 มาตรฐานวิธีการทดสอบแอสฟัลต์ติกคอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์, กรุงเทพฯ.

ดิษยพงษ์ หกสุวรรณ. 2555. การบำบัดผงตะกรันอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2561. หลักเกณฑ์เฉพาะในการตรวจสอบเพื่อการอนุญาตสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์โดยการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราสำหรับวัสดุงานทาง

Improving properties of soil cement by replacing cement with para rubber wood ash for highway materials

ติณห์ สกุลเวช, ก่อโชค จันทวรางกูร*, วีระเกษตร สวนผกา

Tin Sakunwacth, 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

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าไม้ยางพาราผสมกับดินซีเมนต์ โดยเถ้าไม้ยางพาราเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้ปริมาณเถ้าไม้ยางพารามีมากขึ้น แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ส่งผลให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บรวมถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา วิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปริมาณและอัตราส่วนเถ้าไม้ยางพาราต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพื่อจำแนกลักษณะ การทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน และบ่มที่ระยะเวลา 1, 7 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว ผลของการศึกษาพบว่าเถ้าไม้ยางพาราสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในการผสมดินซีเมนต์ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมงานทางได้

คำสำคัญ: เถ้าไม้ยางพารา, ดินซีเมนต์, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

Abstract

The purpose of this study was to investigate the potential use of Para rubber wood ash for producing the soil-cement composite. Recently, a large amount of Para rubber wood ash, waste material generated by electricity generation, has increased but rarely been utilized, making it difficult to manage and prone to environmental problems. This study, therefore, investigated proper amounts and proportions of Para rubber wood ash that could be used to produce as well as improve the cement composite whose properties were compared with those of the standard of soil-cement subbase and the standard of soil-cement base of the Department of Highways. To study the properties, the engineering properties of soil were tested to characterize soil. The modified compaction test was performed and curing methods taking 1 day, 7 days, and 28 days respectively were adopted. Finally, the unconfined compression test was performed. The experimental results present Para rubber wood ash's potentiality to produce the cement composite or pavement engineering materials that meets the standard of soil-cement base of the Department of Highways.

Keywords: para rubber wood ash, soil-cement, unconfined compressive strength

คำนำ

ปัจจุบันวัสดุที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานงานถนนในประเทศมีแนวโน้มลดน้อยลงไป จากการพัฒนาเมืองและความต้องการทรัพยากรธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสวนทางกับอัตราการเติบโตของอุตสาหกรรมและจำนวนประชากรที่ใช้ถนนเพิ่มมากขึ้น การใช้งานวัสดุในโครงการก่อสร้างจึงมีมากขึ้นตามมา จึงเป็นการดีที่ควรศึกษาหาการใช้วัสดุเหลือใช้เพื่อทดแทน โดยยังคงมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) ของกรมทางหลวงไว้ได้ อีกทั้งยังพัฒนาวัสดุทางที่แข็งแรงทนทานสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันภาคใต้ของประเทศไทยมีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจที่สำคัญนั่นคือไม้ยางพารา โดยมีผลผลิตประมาณ 3,109.144 ตัน/ปี คิดเป็นผลผลิตต่อปี 258 กิโลกรัม/ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) เป็นผลผลิตเกินกว่าครึ่งหนึ่งของประเทศ แสดงให้เห็นว่าพืชเศรษฐกิจดังกล่าวมีอยู่มากในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งเมื่อต้นยางพารามีอายุประมาณ 25 ปี ต้นไม้ยางพาราจะถูกโค่นและนำไปแปรรูปหรือนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน แต่ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าทำให้มีเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งเป็นผลพลอยได้ปริมาณมาก และโรงไฟฟ้ามักจะประสบปัญหาในการกำจัดเถ้าไม้ยางพาราที่มีปริมาณมาก ปริมาณเถ้าไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยมากส่งผลให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บและสิ่งแวดล้อมตามมา ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าไม้ยางพารามาศึกษาต่อยอดประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในดินซีเมนต์ให้สอดคล้องกับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม. 204/2556) และมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม. 206/2532) สำหรับใช้งานก่อสร้างโครงสร้างชั้นพื้นทาง และรองพื้นทางของถนน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์

เถ้าไม้ยางพารามีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยมีปริมาณของ CaO เท่ากับร้อยละ 41.19 ซึ่งประมาณ CaO ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติด้านกำลังอัด (Tonnayopas and Chaosincharoen, 2001) ส่วนองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) พบว่าในเถ้าไม้ยางพารา มีองค์ประกอบร้อยละ 2.57 และ 0.53 ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1 (อาบีเด็ง, 2551) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปอซโซลาน ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมออกไซด์กับน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารเชื่อมประสานขึ้น (สุวัฒนา, 2553)

Table 1 Comparing Chemical Composition of Cement and Para rubber wood ash

Chemical Composition	Cement (%)	Para rubber wood ash (%)	Chemical Composition	Cement (%)	Para rubber wood ash (%)
Silicon dioxide (SiO_2)	20.8	2.57	Potassium oxide (K_2O)	0.55	16.11
Aluminum oxide (Al_2O_3)	5.5	0.53	Sodium oxide (Na_2O)	0.08	-
Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.16	0.56	Sulfur trioxide (SO_3)	2.96	5.54
Calcium oxide (CaO)	64.97	41.19	Phosphorus pentoxide (P_2O_5)	-	3.06
Magnesium oxide (MgO)	1.06	4.52	Loss on ignition (L O I)	1.4	23.28

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และวางแผนการค้นคว้าโดยแบ่งเป็นการจัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง และการทดสอบแรงอัดแกนเดียวดังแสดงต่อไปนี้

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ดินลูกรังจากพื้นที่ อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15
3. เถ้าไม้ยางพาราจากบริษัท เอ.พี.เค. กรีนเอ็นเนอร์จี จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
4. น้ำสะอาด

วิธีการศึกษา

การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราสำหรับวัสดุงานทาง เป็นการศึกษาโดยนำดินตัวอย่าง , ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าไม้ยางพารา และน้ำ ผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงใน Table 2 เพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength : UCS) ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของงานถนน ซึ่งสิ่งที่ต้องดำเนินการขั้นแรกคือการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง และส่วนของเถ้าไม้ยางพาราทำการอบด้วยอุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น แล้วจึงคัดแยกให้เหลือเฉพาะส่วนที่ละเอียดโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ออก จากนั้นทำการผสมวัสดุแยกตามอัตราส่วนแล้วนำตัวอย่างที่ผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อทราบปริมาณน้ำที่มีความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุประสาน โดยทำการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน 3 ตัวอย่าง และจำแนกประเภทตัวอย่างทดสอบโดยแบ่งการทดสอบตามวัสดุประสานร้อยละ 2 และ 4 โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราที่ร้อยละ 0, 50 และ 100 ของซีเมนต์ เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาสูงกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าไม้ยางพารา จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1, 7 และ 28 วัน (ส่วนผสมละ 3 ตัวอย่าง) ตามแต่ละอัตราส่วนที่ทำการศึกษารวม 54 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างทั้งสิ้น 57 ตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวของแต่ละอัตราส่วน จากนั้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดแกนเดียว กับระยะเวลาบ่ม และอัตราส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบต่อไป

Table 2 Weight ratio and 7 sets of samples used for research with 57 samples in total

Series	Soil : Cement : Para Rubber Wood Ash	Replacement with Para Rubber Wood Ash (%)	Curing Time (day)		
			1	7	28
1	100: 0.00 : 0.00	-	-	3	-
2	100 : 2.00 : 0.00	0	3	3	3
3	100 : 1.00 : 1.00	50	3	3	3
4	100 : 0.00 : 2.00	100	3	3	3
5	100 : 4.00 : 0.00	0	3	3	3
6	100 : 2.00 : 2.00	50	3	3	3
7	100 : 0.00 : 4.00	100	3	3	3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษาได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุด้วยกันสองส่วนคือ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุ โดยผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

การทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้น

การทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดินและขีดจำกัดอัตเตอร์เบิร์กของดินลูกรังตัวอย่าง พบว่ามีการกระจายของขนาดเม็ดดินและผลการทดสอบดังแสดงใน Table 3

Table 3 Properties of Soil Sample

Soil Properties	Results	Soil Properties	Results
Gravel (%)	49.79	Liquid Limit (%)	29.3
Sand (%)	47.22	Plastic Limit (%)	21.1
Silt, Clay (%)	2.99	Plastic Index	8.2
C_c	29.35	C_u	3.56

เมื่อพิจารณาผลทดสอบดินลูกรัง จากแหล่งวัสดุที่ อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา พบว่ามีร้อยละการผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับร้อยละ 2.99 และมีค่าขีดจำกัดเหลว (L.L.) ขีดจำกัดพลาสติก (P.L.) และดัชนีพลาสติก (P.I.) เท่ากับร้อยละ 29.3, 21.1 และ 8.2 ตามลำดับ ส่วนของค่า C_u (Uniformity Coefficient) และ C_c (Coefficient of Gradation) เท่ากับ 29.35 และ 3.56 ตามลำดับ โดยมีค่า Percentage of Wear เท่ากับร้อยละ 58.07 เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของดินจากผลการทดสอบดังกล่าวแล้วสามารถจำแนกดินตัวอย่างที่นำมาศึกษาได้เป็นดิน A – 2 – 4 (0) ตามระบบ AASHTO และจำแนกดินตามระบบ USCS ได้เป็น SC หรือเป็นพวกกรวดและทรายปนตะกอนทรายหรือดินเหนียว ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการผสมกับเถ้าไม้ยางพาราเนื่องจากขนาดคละของดินที่เป็นเม็ดเล็กมี

อัตราส่วนน้อยจึงสามารถเติมส่วนของเถ้าไม้ยางพาราที่เป็นมวลรวมละเอียด จากคุณสมบัติข้างต้นดินตัวอย่างผ่านเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ตามที่กรมทางหลวงกำหนด สามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมในงานพื้นทางดินซีเมนต์ได้

การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ในการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) ของตัวอย่างทดสอบ พบว่าเมื่อนำวัสดุประสานเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลต่อการดูดซึมน้ำและความหนาแน่น ดังผลการทดสอบแสดงใน Fig.1

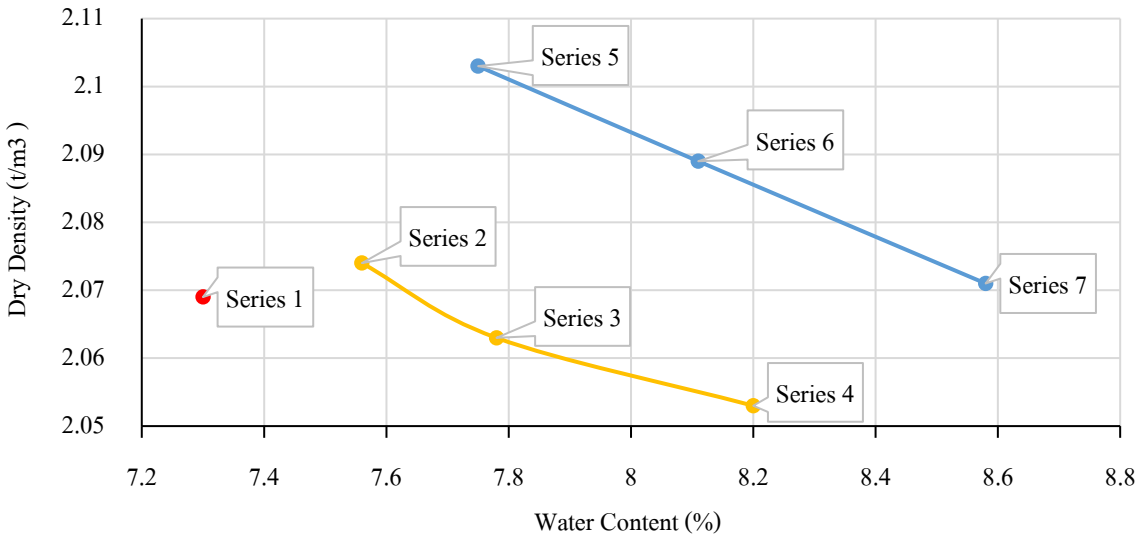


Fig.1 Relationship between Dry Density and Water Content at different Series

จากผลการทดสอบทุกตัวอย่างที่ทำการศึกษาจะมีแนวโน้มค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าไม้ยางพารา พิจารณาได้จาก Series 2 ที่ปริมาณปูนซีเมนต์เริ่มต้นร้อยละ 2 เถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 0 จากนั้นเมื่อปรับอัตราส่วนของเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นที่ Series 3 และ 4 ส่งผลให้ค่าชื้นเหมาะสมสูงสุดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.56 เป็น 7.78 และ 8.20 ตามลำดับ อีกทั้งยังส่งผลให้แนวโน้มค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง และพิจารณาได้จาก Series 5 ที่ปริมาณปูนซีเมนต์เริ่มต้นร้อยละ 4 เถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 0 จากนั้นเมื่อปรับอัตราส่วนของเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นที่ Series 6 และ 7 ส่งผลให้ค่าชื้นเหมาะสมสูงสุดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.75 เป็น 8.11 และ 8.58 ตามลำดับ อีกทั้งยังส่งผลให้แนวโน้มค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงเช่นกัน

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ต้องเตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดด้วยวิธีสูงกว่ามาตรฐานในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm. สูง 200 mm. โดยใช้

ซีเมนต์และเถ้าไม้ยางพารา (Fig. 2) ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ ทำการบดอัดและบ่มตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนด 1, 7 และ 28 วัน ยกเว้นตัวอย่างดินที่ไม่มีวัสดุประสาน ทำการบ่ม 7 วัน เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างแช่ในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพใกล้เคียงสภาวะอิ่มตัว แล้วนำขึ้นให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง จากนั้นเริ่มทำการทดสอบจนครบทุกอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่ม



Fig. 2 Comparing between Cement and Para Rubber Wood Ash

ผลการทดสอบสามารถสรุปผลแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพารา โดยพิจารณาที่วัสดุประสานร้อยละ 2 และ 4 ตามลำดับ (รายละเอียดดัง Fig. 3 และ Fig. 4) ทั้งนี้ผลทดสอบตัวอย่างดินที่ไม่มีวัสดุประสาน (Series 1) ไม่สามารถทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวได้เนื่องจากตัวอย่างเกิดการบวมตัวระหว่างการแช่น้ำจนไม่สามารถทดสอบได้

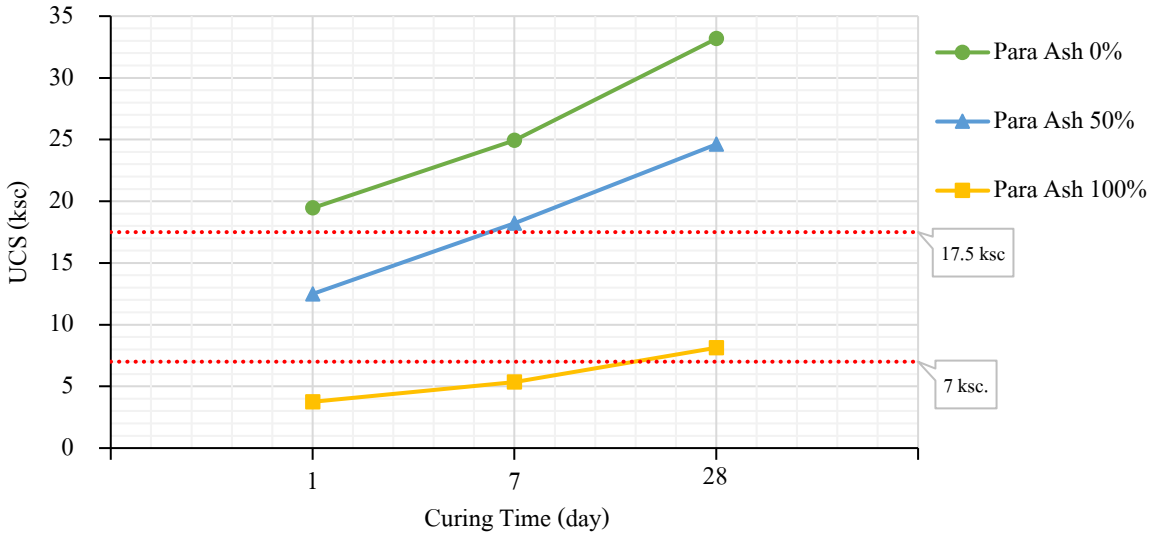


Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength and curing ages of 2% of cement at different replacement percentage of cement with para rubber wood ash

จาก Fig. 3 ผลการทดสอบของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 2 โดยทำการผสมกับเถ้าไม้ยางพาราที่ร้อยละ 0, 50 และ 100 ของปริมาณซีเมนต์ พบว่าการใช้อัตราส่วน ดิน : ซีเมนต์ : เถ้าไม้ยางพารา ที่ 100 : 1 : 1 เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าไม้ยางพาราแล้ว ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดต่ำลงจากเดิมที่ระยะเวลาการบ่มที่ 1 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวอยู่ที่ 12.49 ksc และเมื่อครบกำหนดที่ 7 วัน ดินตัวอย่างสามารถผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ได้โดยมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 18.22 ksc ทั้งนี้การใช้เถ้าไม้ยางพาราแทนที่ซีเมนต์ทั้งหมดนั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน เท่ากับ 5.34 ksc

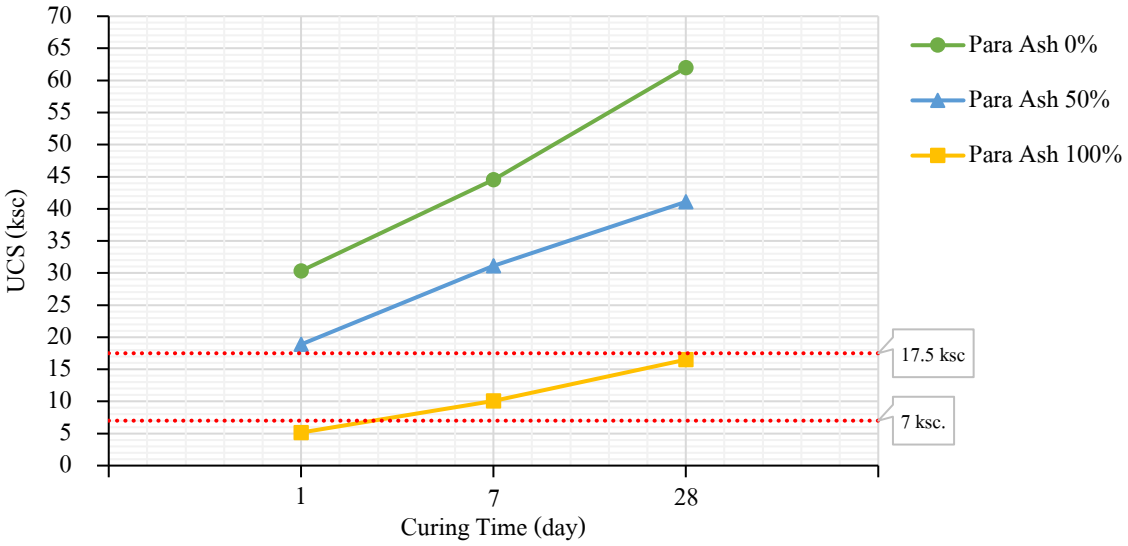


Fig. 4 Relationship between unconfined compressive strength and replacement percentage of cement with para rubber wood ash at different curing ages of 4% of adhesives

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่มตัวอย่าง (Fig.4) และพบว่าปริมาณเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น มีแนวโน้มค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวมีค่าลดลงแต่ยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานเมื่อใช้งานในปริมาณที่เหมาะสม โดยที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 4 สามารถใช้เถ้าไม้ยางพาร้อยละ 50 โดยลดซีเมนต์ลงเหลือร้อยละ 2 และเถ้าไม้ยางพาราอีกร้อยละ 2 โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างหลังจากระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน เท่ากับ 31.13 ksc ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

สรุป

การศึกษาการใช้เถ้าไม้ยางพาราซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการใช้งานไม้ยางพาราในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์สำหรับใช้ในงานก่อสร้างทางนั้น ผลการศึกษาพบว่าสามารถเมื่อผสมเถ้าไม้ยางพาราดับดินซีเมนต์มีผลให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และแนวโน้มค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง จากเดิมความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งของดินตัวอย่างผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 (Series 2) เท่ากับ ร้อยละ 7.56 และ 2.074 ก./ซม.^{3} เปลี่ยนแปลงเป็น

ความชื้นเหมาะสมร้อยละ 8.20 และความหนาแน่นแห้งที่ 2.053 ก./ซม.^{3} ที่การแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 100 (Series 4) และความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งของดินตัวอย่างผสมซีเมนต์ร้อยละ 4 (Series 5) ค่าความชื้นและความหนาแน่นแห้งเท่ากับ ร้อยละ 7.75 และ 2.103 ก./ซม.^{3} ตามลำดับ ซึ่งความชื้นเหมาะสมของตัวอย่างเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 100 (Series 7) จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 8 – 10 และความหนาแน่นแห้งลดลงประมาณร้อยละ 1 – 1.5

โดยค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเมื่อใช้เถ้าไม้ยางพาราผสมกับดินซีเมนต์ในอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณซีเมนต์เดิมที่ใช้คือ ร้อยละ 2 และ 4 โดยเมื่อทำการผสมเถ้าไม้ยางพารากับดินซีเมนต์จะทำให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 30 – 60 ขึ้นกับอัตราส่วนเถ้าไม้ยางพารา แต่ยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทางดินซีเมนต์เมื่อบ่มครบกำหนด (ยกเว้น Series 4 ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางซีเมนต์ที่การบ่ม 7 วัน) ซึ่งทำให้สามารถลดปริมาณการใช้งานซีเมนต์ลงและทดแทนด้วยเถ้าไม้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ อีกทั้งยังทำให้ความชื้นเหมาะสมสูงขึ้นโดยส่งผลกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดซึ่งควรมีการพิจารณาในการศึกษาต่อไป

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราของวัสดุประสานร้อยละ 2 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน เส้นกราฟส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราที่ระหว่างร้อยละ 0 – 50 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (17.5 ksc) ของกรมทางหลวง อีกทั้งร้อยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราของวัสดุประสานที่ร้อยละ 4 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราที่ร้อยละ 0 – 50 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ และที่อัตราส่วนการแทนที่ที่ร้อยละ 100 ยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ (7 ksc) ของกรมทางหลวง ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุทางและใช้งานเถ้าไม้ยางพาราสำหรับงานทางต่อไปในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ก่อโชค จันทวรางกูร รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเกษตร สวนผกา อาจารย์ที่ปรึกษา นายชินภพ ชัยมงคล และนายนิติภูมิ ทองรัตน์ ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดจนช่วยเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหาทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณบริษัท เอ.พี.เค. กรีนเอ็นเนอร์จี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ ขอขอบพระคุณ ฝ่ายวิเคราะห์และตรวจสอบ ศูนย์สร้างทางสงขลา กรมทางหลวง และส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 12 (สงขลา) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่คอยให้ความช่วยเหลือทำให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. 2556. มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. 2532. มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase). กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2563. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2563. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สุวัฒนา นิคม. 2553. คุณลักษณะของยิปซั่มเพสต์โดยใช้ยิปซั่มเทียมเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปร. วิทายานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อาบีเด็ง ฮาวา, ดนุพล ตันนโยภาส. 2551. ผลกระทบของเถ้าลอยไม้ยางพาราที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมพัมมิซ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

Tonnayopas, D., Chaosincharoen. J. 2001. Properties of mortar containing fly ash and parawood sawdust ash. Report to Proc of Regional Conf on Higher Engneering Education System. University of Malaya, Kualalamper Malaysia.

การศึกษาการใช้เศษพลาสติกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์

A study of the waste plastic to improve soil-cement engineering properties

รัชพล พฤฒิพฤกษ์, ก่อโชค จันทวรางกูร*, วีระเกษตร สวนผกา

Ratchapol Pruttipruk, 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

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ด้วยการใช้เศษพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) จากการที่ถนนเป็นรูปแบบการขนส่งที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย ประกอบกับปัญหาขยะพลาสติกที่ส่งผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเป็นอย่างยิ่ง โดยผู้วิจัยจะนำเสนอผลการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติดัชนีเบื้องต้นของดินตัวอย่าง จากนั้นทำการทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผสมกับพลาสติกที่ขนาดต่างกัน 2 ขนาด ที่ 5×5 และ 10×10 มม. โดยทำการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง การหาค่าขีดจำกัดอัตเตอร์เบิร์ก การทดสอบการบดอัดดิน และการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว จากผลการศึกษาทำให้ทราบคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้เศษพลาสติกขนาดและอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดิน เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการก่อสร้างทาง

คำสำคัญ: การปรับปรุงดิน, ดินซีเมนต์, วัสดุทาง, เศษพลาสติก

Abstract

This paper aims to study the improvement of soil-cement engineering properties mixed with Polyethylene Terephthalate waste plastic (PET), which is currently in use by road. Combined with the plastic waste is a problem affecting the environment. The researchers studied the index properties of soil sample and the bearing capacity of soil mixed with cement soil by 5% by weight, mixing the plastic mixture at 2 different sizes of waste plastic were prepared in 5×5 and 10x10 mm. by determining Sieve Analysis, Atterberg Limit, Compaction Test and Unconfined Compressive Stress. From which the test showed that improving engineering properties when utilizing waste plastic using the waste plastic mixture size and ratio differently for improve soil properties. Apply to highway constructions.

Keywords: highway material, soil-cement, soil improvement, waste plastic

คำนำ

การพัฒนาเมืองและคุณภาพชีวิตเกิดขึ้นได้จากระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพ สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมและทั่วถึง โดยถนนถือเป็นระบบการขนส่งที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งการขนส่งสินค้าและการเดินทางในชีวิตประจำวัน ส่งผลให้การใช้งานถนนในปัจจุบันมีปริมาณการจราจรที่คับคั่งส่งผลให้ถนนขาดเสถียรภาพในการใช้งานทั้งทางด้านการจราจร และความคงทนของถนน ก่อให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดอีกทั้งยังเกิดความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาโครงสร้างของระบบขนส่งทั้งระบบ โดยตัวโครงสร้างของถนนในปัจจุบันยังมีความจำเป็นที่ต้องได้รับการปรับปรุงอยู่เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งาน

อีกทั้งปัญหามลพิษถือเป็นวิกฤตที่มีผลกระทบต่อการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตที่รุนแรงในปัจจุบัน โดยขยะพลาสติกเป็นอีกหนึ่งสาเหตุหลักของมลพิษที่ยังคงทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อย ๆ จากความต้องการใช้งานพลาสติกที่เพิ่มขึ้น และการนำพลาสติกกลับมาใช้ซ้ำได้ไม่มากเท่าที่ควร จากการศึกษาพบว่าประเทศไทยมีขยะพลาสติกเฉลี่ยห้าพันสามร้อยตันต่อวัน อีกทั้งงานวิจัยล่าสุดเผยว่าพลาสติกขนาดเล็ก (Micro Plastic) ยังปนเปื้อนเข้าสู่ห้วงโซ่อาหาร และอาจมีโอกาสย้อนกลับมาสู่ร่างกายของมนุษย์ซึ่งเป็นต้นเหตุของสารก่อมะเร็งและโรคภัยอื่น ๆ จึงเป็นการดีหากสามารถเพิ่มหนทางการนำขยะพลาสติกที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ในการก่อสร้างเพื่อลดปริมาณขยะ โดยในปัจจุบันมีการศึกษาการนำพลาสติกมาผสมกับแอสฟัลต์เป็นโมดิฟายด์แอสฟัลต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซึ่งผลที่ได้คือโมดิฟายด์แอสฟัลต์มีค่าเสถียรภาพที่สูงขึ้น มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นทำสามารถให้ประหยัดงบประมาณที่ใช้สำหรับการซ่อมแซม หรือการนำผงพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตผสมกับซีเมนต์เพื่อใช้เป็นคอนกรีตสำหรับก่อสร้างโครงสร้างอาคาร ซึ่งทำให้คอนกรีตที่ได้มีกำลังมากขึ้นในอัตราส่วนการใช้ซีเมนต์ที่ลดลง เนื่องจากผงพลาสติกสามารถช่วยในการกระจายตัวของซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น

ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญของการใช้เศษพลาสติกนำมาผสมกับซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังในการก่อสร้างถนนชั้นรองพื้นทางหรือชั้นอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์พลาสติกให้เหมาะสมกับการก่อสร้างถนนที่มีเสถียรภาพต่อไป

ทบทวนวรรณกรรม

จากการตระหนักถึงที่มาและความสำคัญของการคมนาคมทางบกและปัญหามลพิษจากขยะพลาสติกที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ดินซีเมนต์

ในงานวิศวกรรมโยธาโดยทั่วไปงานฐานรากมักเป็นส่วนที่ต้องคำนึงถึงและให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง อีกทั้งฐานรากโดยมากจำเป็นต้องมีดินเป็นส่วนรับน้ำหนักรวมถึงงานถนน ซึ่งในบางครั้งการหาแหล่งดินเพื่อใช้ในการก่อสร้างชั้นทางที่มีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาจเป็นไปได้ยากทั้งจากปัจจัยด้านพื้นที่ที่ก่อสร้างหรือการขนส่ง การปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่มีอยู่เดิมจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่คุ้มค่าและได้รับความนิยม การใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มค่าความสามารถการรับน้ำหนักของดินเป็นวิธีที่กรมทางหลวงใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเป็นที่รู้จักทั่วไป คือ ดินซีเมนต์ (Soil-Cement) โดยมีข้อกำหนดในการออกแบบและใช้งานดินซีเมนต์ตามมาตรฐานของ

กรมทางหลวงโดยจะเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ทำให้แท่งตัวอย่างดินซีเมนต์รับกำลังรับแรงอัดได้เท่ากับ 1,724 kPa หรือ 17.50 ksc. โดยประมาณ

โมดูลัสยืดหยุ่นของดิน

โดยปกติแล้วในทางวิศวกรรมโยธาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินมักถูกนำมาใช้เพื่อประมาณการทรุดตัวของดินเมื่อรับน้ำหนักโดยสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ร่วมด้วย เช่น การทดสอบกำลังอัดสามแกน การทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินมักขึ้นกับความสม่ำเสมอและความหนาแน่นของดินโดย Obrzud and Truty (2012) ได้ทำการศึกษาและจำแนกดินตามระบบ USCS โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไว้ดังแสดงใน Table 1–2 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการใช้งานดินสำหรับฐานราก

Table 1 Typical values of Young's modulus for granular material (MPa)

USCS	Description	Loose	Medium	Dense
GW, SW	Gravels/Sand well-graded	30–80	80–160	160–320
SP	Sand, uniform	10–30	30–50	50–80
GM , SM	Sand/Gravel silty	7–12	12–20	20–30

พลาสติกรีไซเคิล

พลาสติก คือ สารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยธาตุ คอร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ถือว่าเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำจึงนิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง มีแนวโน้มการใช้งานในด้านอื่น ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลาสติกส่วนใหญ่เมื่อไม่ได้ใช้งานแล้วจะกลายเป็นขยะพลาสติกที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และการใช้งานพลาสติกไม่เหมาะสมกับประเภทอาจก่อให้เกิดโรคต่างๆ ได้ โดยเฉพาะขยะพลาสติกบางประเภทที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ และยากต่อการย่อยสลาย ส่งผลต่อระบบนิเวศได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการใช้วัสดุผสมเพิ่มในงานทางนั้น เป็นวิธีการจัดการกับปัญหาด้านการก่อสร้างทางและสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป

Agus Setyo Muntohar ร่วมคณะ ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของดินตะกอน (Silty Soil) กับหินปูนและเถ้าลอยเสริมกำลังด้วยขยะพลาสติก ผลการศึกษาพบว่าการใช้พลาสติกที่อัตราส่วนร้อยละ 0.4–0.8 โดยน้ำหนักแห้งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่จะเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงอัด แรงดัด และแรงเฉือนให้กับดินซึ่งได้จากการทดสอบหาค่าซีบีอาร์ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และการทดสอบการรับแรงเฉือน อีกทั้งยังมีอิทธิพลต่อการพิบัติของก้อนตัวอย่างอีกด้วย อีกทั้ง Sivakumar Babu and Chouksey (2011) ได้ตระหนักว่าขวดน้ำพลาสติกได้เป็นส่วนหนึ่ง

ของปัญหาขยะที่ขยายวงกว้างไปทั่วโลก จึงได้ทำการศึกษาการนำขยะพลาสติกมาใช้สำหรับเสริมกำลัง ผลสรุปจากการวิจัยพบว่าการใช้ขยะพลาสติกมีข้อดีในการใช้งานสำหรับการเสริมกำลังดินจากค่ากำลังรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและการทรุดตัวที่ลดลง และ Nilo Cesar Consoli และคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของทรายที่เสริมความแข็งแรงด้วยขยะพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต(Polyethylene terephthalate : PET) โดยอัตราส่วนพลาสติกที่ร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก ความยาวของเส้นใยพลาสติกที่ 36 มิลลิเมตร และเพิ่มอัตราส่วนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 0–7 ผลการทดสอบพบว่าเส้นใยพลาสติกสามารถเพิ่มกำลังอัดสูงสุดและกำลังอัดประลัยของตัวอย่างที่ผสมและไม่ผสมซีเมนต์

วิธีการศึกษา

การศึกษาการใช้เศษพลาสติกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ เป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนและขนาดของเศษพลาสติกที่ใช้ผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มกำลังของดินและลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาแพง โดยการศึกษาครั้งนี้จะทำการกำหนดขนาดของเศษพลาสติกให้เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมที่ขนาดต่างกัน คือ 5×5 10×10 และ 20×20 มม.^{2} อัตราส่วนเศษพลาสติกร้อยละ 0, 0.4 และ 0.5 โดยน้ำหนักดินแห้ง หลังจากทำการเก็บรวบรวมดินตัวอย่างจากบ่อดินที่คัดเลือกแล้ว ผู้วิจัยจะทำการทดสอบคุณสมบัติดัชนีเบื้องต้นของดินเพื่อทราบค่าขนาดคละขีดจำกัดข้นเหลว ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าปริมาณน้ำเหมาะสมสูงสุดตามมาตรฐานกรมทางหลวง (Table 2) จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทดิน เมื่อทราบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่างแล้วจึงทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้โดยการบดอัดก้อนตัวอย่างตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้แล้วทำการบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 7 เพื่อป้องกันความชื้นเปลี่ยนแปลง เมื่อครบกำหนดจึงนำก้อนตัวอย่างแช่น้ำ 2 ชม. ก่อนกดทดสอบ โดยในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 เนื่องจากเป็นค่าสูงสุดตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์กรมทางหลวง (ทล.-ม. 204/2556) เพื่อจำกัดตัวแปรในการศึกษาแล้วทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและอัตราส่วนของพลาสติก เมื่อได้ผลการทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงทำการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดแกนเดียวค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเพื่อศึกษาผลการทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการใช้พลาสติกปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรัง

Table 2 Detail of data sample testing

Sample No.	Cement Content (%)	PET Content (by weight), (%)	PET Size, (mm. × mm.)	Sample No.	Cement Content (%)	PET Content (by weight), (%)	PET Size, (mm. × mm.)
1–1	0	0	0	3–3	5	0.4	10×10
1–2	5	0	0	3–4	5	0.5	10×10
2–3	5	0.4	5×5	4–3	5	0.4	20×20
2–4	5	0.5	5×5	4–4	5	0.5	20×20

ผลการทดลอง

จากการทดสอบวัสดุดินลูกรังตัวอย่างโดยทำการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบหาขีดจำกัดอัตเตอร์เบิร์ก การทดสอบการบดอัด และทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ให้ผลการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาแสดงใน Table 3 โดยดินตัวอย่างจำแนกได้เป็นดินประเภท SW หรือ A-2-4 ทรายมีขนาดคละกันดีปนกรวดมีเม็ดละเอียดปนเล็กน้อย มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ และ ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง เท่ากับ 7.813 และ 1.922 ตามลำดับ ค่า ขีดจำกัดเหลว, ขีดจำกัดพลาสติก และ ดัชนีพลาสติก เท่ากับร้อยละ 19.58 17.78 และ 1.80 ตามลำดับ จัดอยู่ในดินที่มีขนาดคละดีและผ่านเกณฑ์มาตรฐานดินลูกรังของกรมทางหลวงสามารถใช้เป็นพื้นทางดินซีเมนต์ได้

Table 3 Results of Testing the Index Properties of Soil Sample

Soil Properties	Results
GRAVEL (%)	37.92
SAND (%)	59.73
SILT, CLAY (%)	2.35
D10 (mm.)	0.32
D30 (mm.)	0.78
D60 (mm.)	2.30
C_u (mm.)	7.80
C_c (mm.)	1.90
Liquid Limit (%)	19.58
Plastic Limit (%)	17.78
Plastic Index	1.80
OMC (%)	10.80
MDD (t/m^3)	1.955

ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength

ผลการทดสอบกำลังของก้อนตัวอย่างดังแสดงใน Fig. 1 เมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกขนาด 5×5 มม. ที่อัตราส่วนพลาสติกร้อยละ 0.4 ทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของก้อนตัวอย่างยังคงอยู่ที่ 21.11 ksc. จากตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมพลาสติกเดิมของชุดการทดสอบที่ 1–2 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 21.50 ksc. โดยจากการทดสอบทั้งสิ้น 7 ส่วนผสม เป็นตัวอย่างที่ผสมพลาสติก 6 ส่วนผสม และดินซีเมนต์ 1 ส่วนผสม พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนอัตราส่วนของส่วนผสม โดยการทดสอบที่ให้กำลังสูงที่สุดคือการทดสอบที่ 3–1 PET ขนาด 10×10 มม.^{2} ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักดินที่ 38.19 ksc. โดยการผลการทดสอบในครั้งนี้ มีชุดการทดสอบที่ 2–1 และ 4–2 ที่ให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่ไม่ผสมพลาสติก แต่ยังคงสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นพื้นทางซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียว 17.50 ksc.

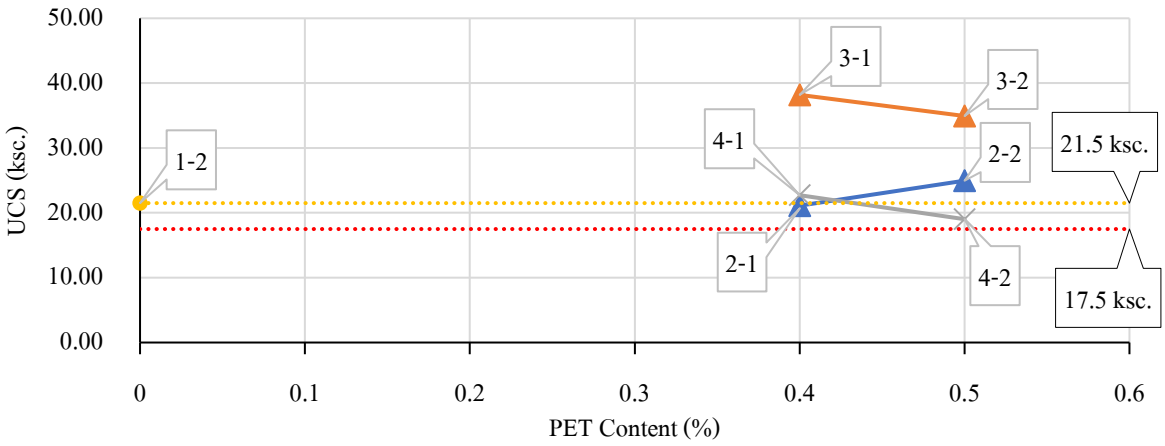


Fig. 1 Comparison results (UCS) of ratios from 5×5 10×10 20×20 and Non-Plastic

เมื่อทำการตรวจสอบค่าความหนาแน่นแห้งของก้อนตัวอย่างพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติก PET เข้าไปในดินซีเมนต์ ทำให้ความหนาแน่นที่ได้หลังการบดอัดมีค่าลดลงดังแสดงใน Fig. 2 จากเดิมที่ 1.952 t/m^3 1.955 t/m^3 ของชุดการทดสอบ 1–1 และ 1–2 ตามลำดับ ลดลงเหลือต่ำสุดที่ชุดการทดสอบ 4–2 ที่ความหนาแน่น 1.868 t/m^3 โดยก้อนตัวอย่างที่ให้กำลังสูงที่สุดที่ 38.19 ksc. ได้ค่าความหนาแน่นแห้งที่ 1.905 t/m^3 ซึ่งลดลงจากก้อนตัวอย่างปกติที่ไม่ผสมพลาสติก แต่ยังคงให้ค่ารับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงขึ้นด้วย

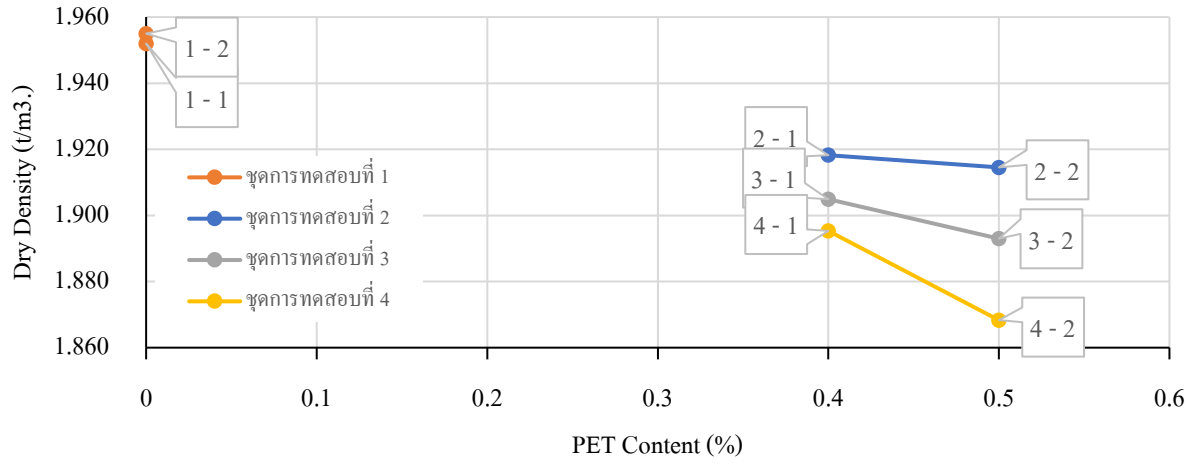


Fig. 2 Dry density results from UCS testing.

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength สามารถใช้เพื่อตรวจสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยค่า R^2 ของผลการทดสอบระหว่างความเค้นและความเครียด อยู่ระหว่าง 0.95–0.99 ซึ่งมากกว่า 0.80 ถือว่ามีความสัมพันธ์กันดีมาก และจาก Fig. 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) มีค่าสัมพันธ์กันกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น มีค่าสูงสุดที่ 128 MPa ที่ส่วนผสม 3–4 โดยจัดอยู่ในช่วงของทรายแน่นปานกลาง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 80 – 160 MPa ของชุดการทดสอบที่ 3 และ 4 โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนี้เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถการคืนสภาพอย่างสมบูรณ์ภายหลังการ

ถอนแรง โดยก้อนตัวอย่างผสมพลาสติกที่ทดสอบมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ระหว่างประมาณ 30 – 120 MPa อยู่ในช่วงทรายหลวมถึงแน่นปานกลาง

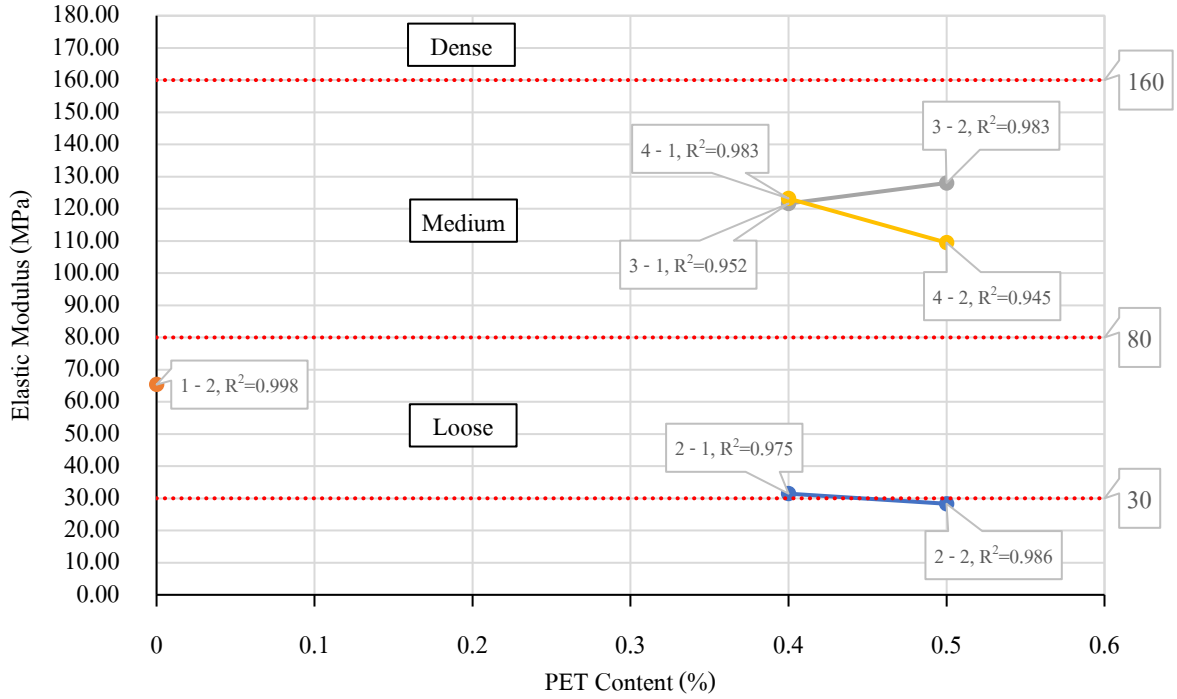


Fig. 3 Comparison results of Unconfined Compressive Stress and Elastic Modulus

สรุปและวิเคราะห์ผล

ตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์กรมทางหลวง ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 17.50 ksc. จึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทางได้ ซึ่งจากผลการศึกษาครั้งนี้ การผสมพลาสติก PET ขนาดต่าง ๆ สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างให้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุทาง โดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดร้อยละ 56 จากเดิมที่ 21.50 ksc. เป็น 38.19 ksc. ที่อัตราส่วนพลาสติกขนาด 10×10 มม. ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักดินแห้ง ได้ค่าความหนาแน่นแห้ง 1.905 t/m^3 โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 121.63 MPa ความชื้นเหมาะสมในการบดอัดร้อยละ 9.77 ซึ่งผลการศึกษาสามารถเป็นแนวทางทำให้ในการก่อสร้างทางจริงสามารถลดค่าใช้จ่ายได้โดยการใช้วัสดุในพื้นที่ผสมพลาสติก PET ในขนาดและปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ได้

เอกสารอ้างอิง

Muntohar, A.S., Widianti, A., Hartono, E., Diana, W. 2013. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber. J. Mater. Civ. Eng. 25: 1260–1270. doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000659.

Sivakumar Babu, G.L., Chouksey. S.K. 2011. Stress–strain response of plastic waste mixed soil. Waste Managemen 31: 481–488. doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.018

Consoli, N.C., Montardo, J.P., Marques Prietto, P.D., Pasa. G.S. 2002. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 128: doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462).

Teerachart: Ruenkrairergsa. 1982. Economic analysis of soil-cement base construction as compared to crushed rock base. In: The 3th International Conference on Low Volume Road, Arizona

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. 2556. มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

จิรพัฒน์ โชติกไกร. 2557. วิศวกรรมการทาง. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชินภพ ชัยมงคล. 2563. การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสำหรับทางหลวง. การค้นคว้าอิสระ, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณรงค์ ปานข่อยงาม, ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. โมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกปลายตะแกรงที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง

Strength and durability of soil-cement reinforced with plastic waste fiber for road construction materials

นิติภูมิ ทองรัตน์, ก่อโชค จันทวรางกูร*, วีระเกษตร สวนผกา

Nitipoom Thongrat, 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

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยจากขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรพีลีน โดยใช้การทดสอบ Unconfined Compression Test, Splitting Tensile Strength Test และ Los Angeles Abrasion Test เพื่อประเมินคุณสมบัติดังกล่าว การศึกษาทำโดยใช้ดินลูกรังผสมกับซีเมนต์คงที่ 4% โดยน้ำหนักดิน และใช้เส้นใยขนาดความยาว 10 mm, 20 mm และ 30 mm ผสมเพิ่มในปริมาณเท่ากับ 0%, 0.25%, 0.50% และ 1.00% โดยน้ำหนักดิน จากนั้นนำไปบดอัดด้วยวิธีสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 8% และบ่มเป็นระยะเวลา 7 วันก่อนนำไปทดสอบ ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญในขณะที่ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลง ส่วนค่ากำลังดึงผ่าซีกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางได้ ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความแตกต่างของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นระหว่างชั้นผิวทางและโครงสร้างทางลดลง อีกทั้งยังพบว่าค่าความสึกหรอของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยมีค่าลดลง ส่งผลให้คุณสมบัติด้านความคงทนดีขึ้น

คำสำคัญ: กำลังดึง, กำลังอัด, ดินซีเมนต์, เส้นใยขยะพลาสติก

Abstract

This study aimed to investigate the effects of waste plastic fiber “Polypropylene” obtained from plastic straw production on strength and durability of soil-cement by using conventional test including Unconfined Compression Test, Splitting Tensile Strength Test and Los Angeles Abrasion Test. In the study, the plastic waste fibers were prepared in 10 mm, 20 mm and 30 mm length and mixed with lateritic soil by 0%, 0.25%, 0.5% and 1.0% with the constant cement content at 4% by dry weight of soil. The mixed materials were compacted by using modified proctor test and cured for 7 days before testing. The result indicated that the compressive strength increased significantly and splitting tensile strength (STS) were slightly improved while the elastic modulus dropped moderately. Therefore, the material can be used as subbase and base of road structure. The fibers cause increase in strength and reduce the difference in elastic modulus between surface course and base course. Moreover, the soil cement is resistant to abrasion resulted in durability improvement.

Keywords: compressive strength, soil-cement, tensile strength, waste plastic fiber

คำนำ

การก่อสร้างทางในพื้นที่ห่างไกลจากแหล่งวัสดุที่มีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดของงานทางนั้น วิศวกรจะใช้วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติแก่วัสดุด้อยคุณภาพในบริเวณใกล้เคียง เช่น การผสมซีเมนต์ ปูนขาวหรือเถ้าลอย เป็นต้น โดยวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้ซีเมนต์ผสมหินคลุก (Modified Crushed Rocks) หรือวัสดุมวลรวม (Soil-cement) ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถนำมาใช้ก่อสร้างเป็นชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course) และชั้นพื้นทาง (Base Course) ตามมาตรฐานชั้นทางได้ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโดยใช้ซีเมนต์ผสมนั้นส่งผลให้เพิ่มการเกิดรอยแตกร้าวจากการหดตัว (Shrinkage Crack) และเมื่อนำมาใช้เป็นชั้นพื้นทางจะส่งผลให้รอยแตกร้าวนั้นเกิดการสะท้อนกลับขึ้นสู่ชั้นผิวทาง (Reflection Crack) (Portland Cement Association, 2003) อีกทั้งยังทำให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบเปราะ และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) สูงขึ้น ซึ่งความแตกต่างระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นของชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางที่ต่างกันมากขึ้นนี้ ทำให้การเสียรูปของโครงสร้างชั้นทางไม่สัมพันธ์กันซึ่งอาจส่งผลเสียต่อความคงทนและอายุการใช้งานของถนน

การเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยกระจายตัวแบบสุ่ม (Randomly Distributed Fibers) ผสมในมวลดินเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดความเปราะและสามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดและกำลังรับแรงดึงให้กับวัสดุได้ โดยชั้นดินบดอัดใต้ถนนจะเกิดความเค้นอัดและความเค้นดึงขึ้นเมื่อมีน้ำหนักจากล้อรถมากระทำ ซึ่งการกระทำซ้ำซากจากล้อรถอาจทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรในชั้นโครงสร้างทางหรือเรียกว่าร่องล้อ (Structural Rutting) (White et al., 2002) Gupta and Kumar (2016) พบว่าการใช้เส้นใยโพลีโพรพีลีนสังเคราะห์ผสมกับดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าถ่านหินทำให้กำลังอัดและกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นตามขนาดความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น Consoli et al. (2005) ได้อธิบายถึงกลไกการปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยเส้นใยจากวิธีการทดสอบ High-Pressure Triaxial Cell ว่าเมื่อมีแรงอัดกระทำต่อดินเท่ากันทุกทิศทางส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของเม็ดดินนำไปสู่การเกิดความเค้นดึงในเส้นใยที่อยู่ระหว่างเม็ดดินนั้น ดังแสดงใน Fig. 1 และจากการทดสอบ Pull-out Test พบว่าปฏิสัมพันธ์การต้านแรงเฉือนระหว่างดินและเส้นใยขึ้นอยู่กับการต้านทานต่อการจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดดินดังแสดงใน Fig. 2 ทำให้เกิดเป็นแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับเม็ดดิน (Tang et al., 2010)

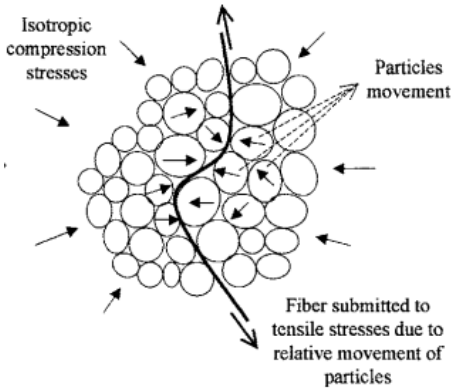


Fig. 1 Mechanism of Fiber-reinforced Soil Under Isotropic Loading (Source : Consoli et al., 2005)

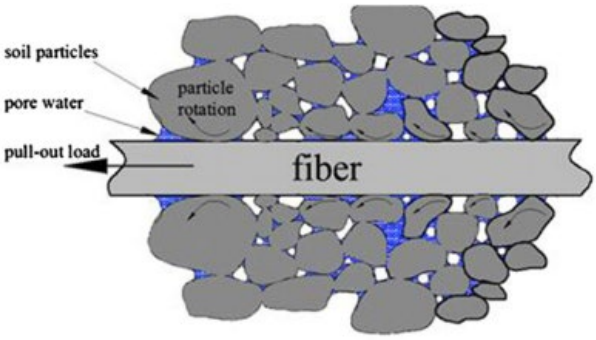


Fig. 2 Interaction between Soil Grain and Fiber (Source : Tang et al., 2010)

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยจากขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรพีลีน (Polypropylene) ที่มีผลต่อคุณสมบัติดินลูกรังผสมซีเมนต์ โดยใช้การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D1633 การทดสอบกำลังดึงผ่าซีก (Splitting Tensile Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM C496 และศึกษาเพิ่มเติมถึงความคงทนต่อการขัดสีด้วยเครื่องลอสแอนเจลีส (Los Angeles Abrasion Test) ตามมาตรฐาน ASTM C535 เส้นใยที่ใช้ในการศึกษาได้จากการตัดหลอดพลาสติกโพลีโพรพีลีนจากผู้ผลิตรายเดียวกันเพื่อควบคุมปัจจัยด้านคุณสมบัติของเส้นใยในการศึกษา ซึ่งหลอดพลาสติกถูกพบเป็นขยะในทะเลเป็นอันดับ 2 ของประเทศไทย คิดเป็นร้อยละ 10 ของขยะพลาสติกทั้งหมดหรือประมาณ 5,000 ตัน/ปี (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2560) และประเทศไทยถูกจัดเป็นอันดับ 6 ของโลกในด้านการทิ้งขยะพลาสติกลงสู่ทะเล (Jambeck et al., 2015) ซึ่งถือเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ และมีขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรพีลีนอีกจำนวนมากที่ถูกกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี การใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกโพลีโพรพีลีนถือเป็นกระบวนการ Waste Utilization ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่อาจช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมดังกล่าว

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ดินลูกรัง จากแหล่งวัสดุที่ อ.จะนะ จ.สงขลา มีค่า Uniformity Coefficient (C_u) และ Coefficient of Gradation (C_c) เท่ากับ 30.91 และ 3.54 ตามลำดับ และมีค่า Liquid Limit (LL) และ Plastic Index (PI) เท่ากับ 29.3 และ 8.2 ตามลำดับ โดยมีค่า Percentage of Wear เท่ากับ 58.07% สามารถจำแนกดินตามวิธี AASHTO ได้เป็น A-2-4(0)

2. เส้นใยขยะพลาสติกโพลีโพรพีลีน ดังแสดงใน Fig. 3 และมีคุณสมบัติดังแสดงใน Table 1

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำ

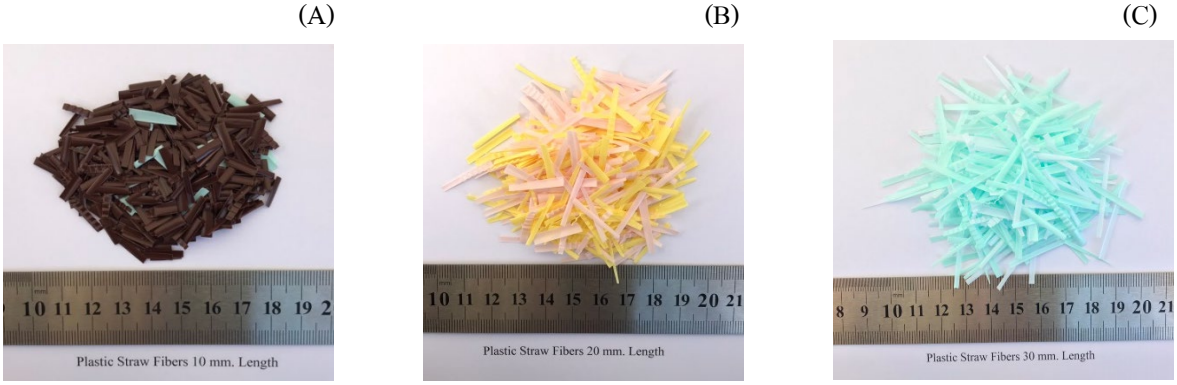


Fig. 3 Waste Plastic (Polypropylene) Fibers with (A) 10 mm. Length, (B) 20 mm. Length and (C) 30 mm. Length

Table 1 Properties of Waste Plastic (Polypropylene) Fibers Obtained from Plastic Straws

Properties	Values
Tensile Strength (ksc.)	270 – 400
Width (mm)	2.0 – 2.7
Fiber Length (mm)	10, 20, 30

การทดสอบ

1. การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบดอัดของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณและความยาวของเส้นใย โดยใช้ซีเมนต์คงที่ 4% ซึ่งเป็นปริมาณซีเมนต์เฉลี่ยสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติดินลูกรังเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทาง

2. การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

เตรียมตัวอย่างโดยการนำดินลูงรัง ซีเมนต์ และเส้นใยมาผสมในอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ คลุกตัวอย่างผสมให้เข้ากันจนกระทั่งวัสดุทั้งสามมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นเติมน้ำปริมาณ 8% ซึ่งเป็นค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินซีเมนต์เสริมเส้นใย จากนั้นทำการบดอัดด้วยวิธีสูงกว่ามาตรฐานในแม่พิมพ์โดยใช้พลังงานในการบดอัดเท่ากับ 56,250 ft-lb/ft^3 หลังจากถอดแม่พิมพ์ออก นำก้อนตัวอย่างมาเป็นรักษาโดยการห่อด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นระยะเวลา 7 วัน ตัวแปรควบคุมสำหรับการเตรียมตัวอย่างแสดงดัง Table 2 โดยขนาดตัวอย่างที่เตรียมทดสอบมีดังนี้

1) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว ใช้แม่พิมพ์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm. สูง 200 mm. เมื่อครบระยะเวลาการบ่มตัวอย่างจะถูกแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพใกล้เคียงสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

2) การทดสอบกำลังดึงผ่าซีก ใช้แม่พิมพ์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 mm. สูง 116.4 mm. เมื่อครบระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างจะถูกวางในแนวนอนเพื่อรับแรงกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นดึงตามแนวราบตั้งฉากกับระนาบแรงกด ทำให้ตัวอย่างผ่าออกเป็น 2 ซีก

3. การทดสอบหาความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion เตรียมโดยการนำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังในแต่ละอัตราส่วนผสมให้มีน้ำหนักรวมประมาณ 5,000 กรัม นำเข้าเครื่องทดสอบโดยใช้ลูกกลมเหล็กจำนวน 12 ลูก ตามมาตรฐานการทดสอบเกรด A

Table 2 Input Variables Factors Investigated and Range Tested (3 Specimens : 1 Mixed)

Input variables	Range investigated
	UC Test, STS Test, LAA Test
Fiber content, FC (%)	0, 0.25, 0.5, 1.0
Fiber length, FL (mm)	10, 20, 30
Cement content, CC (%)	4
Curing time (days)	7
Moisture content (%)	8

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ใช้ผสมกับดินซีเมนต์ที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มเส้นใยที่มีหน่วยน้ำหนักเบาไปแทนที่เม็ดดินที่มีหน่วยน้ำหนักมากกว่าตามปริมาตรของแม่พิมพ์ และพบว่าเมื่อใช้ความยาวเส้นใยคงที่จะไม่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดตัวอย่าง คาดว่าเนื่องจากขนาดและรูปร่างของเส้นใยที่ไม่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้น้ำซึ่งทำหน้าที่ในการหล่อลื่นวัสดุให้เบียดชิดกันไม่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังแสดงใน Fig. 4A อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าสูงขึ้นตามความยาวของเส้นใยที่มากขึ้น และพบว่าความยาวของเส้นใยนั้นยังส่งผลต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุ คาดว่าเนื่องจากความยาวของเส้นใยส่งผลต่อความสามารถในการแทรกตัวระหว่างเม็ดดิน ซึ่งอนุมานได้ว่าความยาวที่แทรกตัวดีที่สุดในการศึกษานี้คือ 20 mm. ดังแสดงใน Fig. 4B

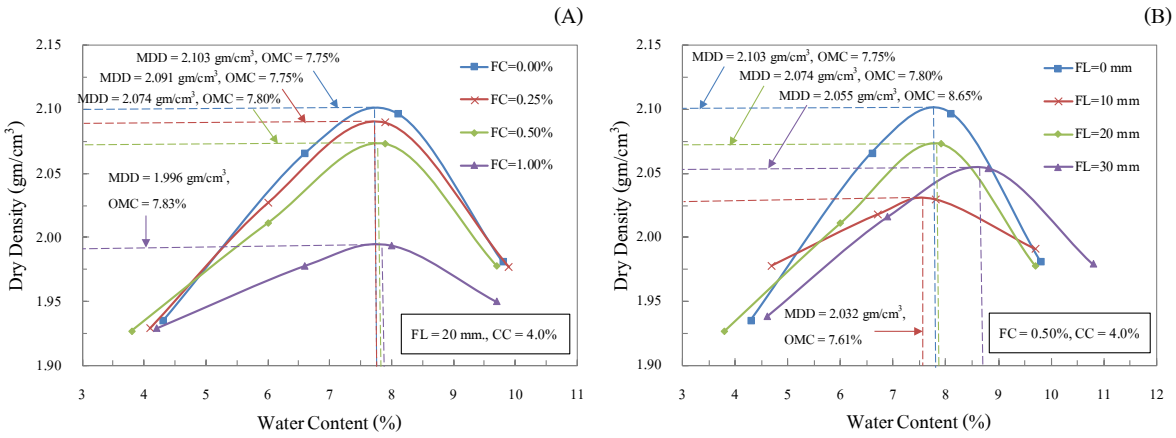


Fig. 4 Compaction Curves of Soil-cement Reinforced with Straw Fibers with (A) Constant FL and (B) Constant FC

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวพบว่าปริมาณและความยาวของเส้นใยหลอดพลาสติกส่งผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อผสมเส้นใยที่มีความยาวเท่ากับ 10 mm. และ 20 mm. ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Fig. 5A ในขณะที่การผสมเส้นใยที่ความยาว 30 mm. นั้น ค่ากำลังอัดจะสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งหลังจากปริมาณเส้นใยมีค่าเกินกว่า 0.50% โดยน้ำหนักดินแห้ง ค่ากำลังอัดจึงมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง คาดว่าเนื่องจากผลของความไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ที่มากขึ้น โดยเมื่อก้อนตัวอย่างรับแรงและเริ่มเกิดรอยแตกร้าว ส่งผลให้การเกิดรอยแตกร้าวเกิดง่ายขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของวัสดุ

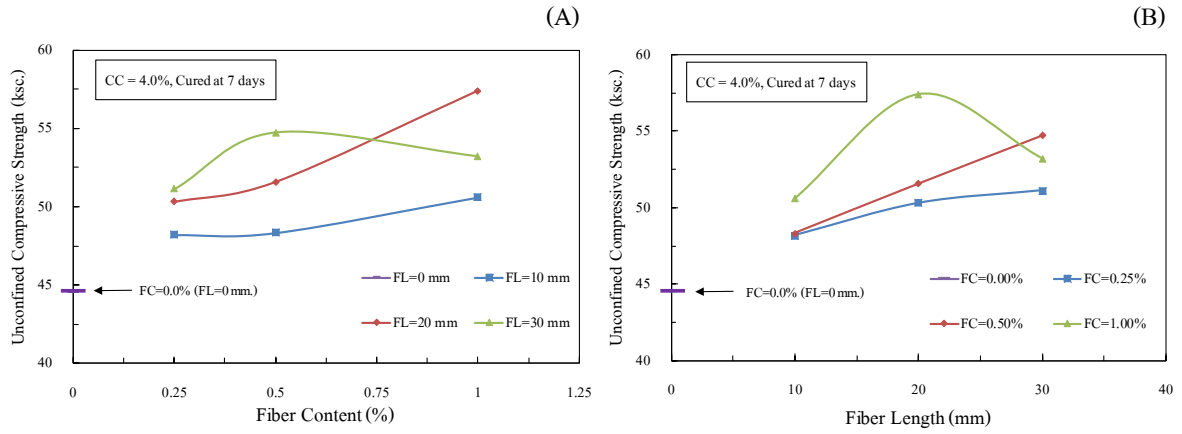


Fig. 5 Unconfined Compressive Strength Versus (A) Fiber Content and (B) Fiber Length

การผสมเส้นใยในปริมาณเท่ากับ 0.25% และ 0.50% พบว่า ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยมีค่าสูงขึ้นตามความยาวเส้นใยที่มากขึ้น ในขณะที่เมื่อผสมเส้นใยปริมาณเท่ากับ 1.0% โดยน้ำหนักดินแห้งนั้น ค่ากำลังอัดจะมีค่าสูงขึ้นตามความยาวเส้นใยจนกระทั่งเมื่อความยาวเส้นใยมีค่าเกิน 20 mm. ค่ากำลังอัดจะมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงใน Fig. 5B และพบว่าอัตราส่วนผสมที่ใช้ความยาวเส้นใยเท่ากับ 20 mm. ผสมในปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.00% โดยน้ำหนักดินแห้ง จะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ซึ่งเท่ากับ 57.39 ksc. เมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ได้เสริมเส้นใยที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 44.54 ksc. นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 28.85%

ผลจากการวิเคราะห์กราฟความเค้นและความเครียดของชุดข้อมูลที่เสริมเส้นใยปริมาณ 0.50% โดยน้ำหนักดินแห้ง และชุดข้อมูลที่เสริมเส้นใยยาวเท่ากับ 20 mm. จากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวพบว่า ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าต่ำลง โดยกราฟของดินซีเมนต์ที่เสริมเส้นใยจะเลื่อนไปทางขวาเมื่อเทียบกับกราฟของดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมเส้นใย ดังแสดงใน Fig. 6 และยังพบว่าช่วง Elastic Behavior และ Plastic Behavior ก่อนถึงค่ากำลังอัดสูงสุดมีช่วงความยาวมากขึ้นสำหรับดินซีเมนต์เสริมเส้นใย ซึ่งอนุมานได้ว่า เมื่อวัสดุรับแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมเส้นใยจะเกิดการแตกร้าวก่อนดินซีเมนต์ที่เสริมเส้นใย

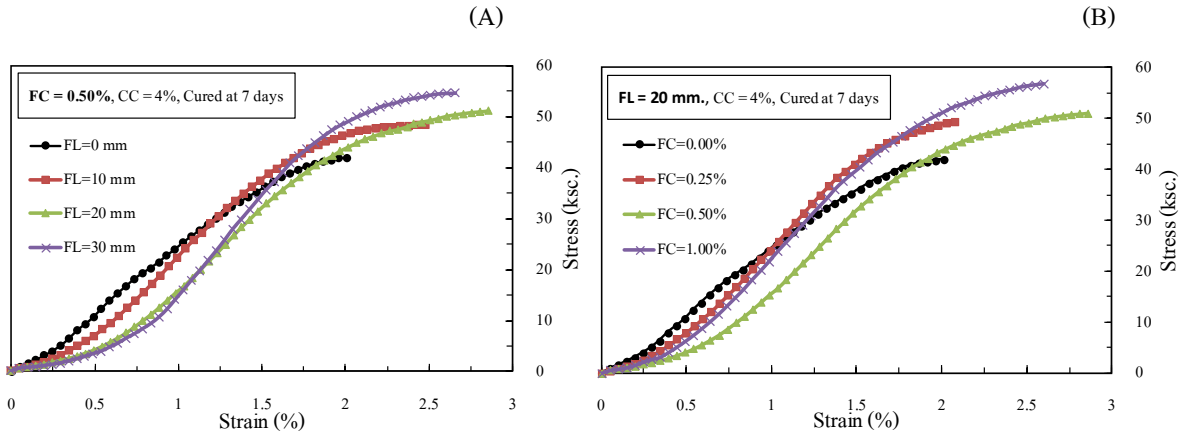


Fig. 6 Stress-Strain Curve of (A) Fixed Fiber Content = 0.50% and (B) Fixed Fiber Length = 20 mm.

ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีก

ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกพบว่า การเสริมเส้นใยหลอดพลาสติกแก่ดินซีเมนต์จะส่งผลต่อกำลังดึงผ่าซีกเพียงเล็กน้อย โดยเส้นใยที่ความยาวขนาด 20 mm. และ 30 mm. นั้น เมื่อทำการเสริมในดินซีเมนต์ที่ปริมาณเส้นใย

มากขึ้นส่งผลให้กำลังดึงผ่าซีกเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเสริมเส้นใยที่ขนาดความยาวเท่ากับ 20 mm. ในปริมาณ 0.25% โดยน้ำหนักแห้ง ทำให้กำลังดึงผ่าซีกน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใยเล็กน้อย ดังแสดงใน Fig. 7A ในขณะที่การใช้เส้นใยความยาวเท่ากับ 10 mm. ส่งผลให้กำลังดึงผ่าซีกลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น คาดว่าเนื่องจากระยะที่สร้างแรงเสียดทานระหว่างเนื้อดินซีเมนต์กับเส้นใยไม่เพียงพอ และเนื้อวัสดุที่ไม่ต่อเนื่องนี้เองทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมเส้นใย

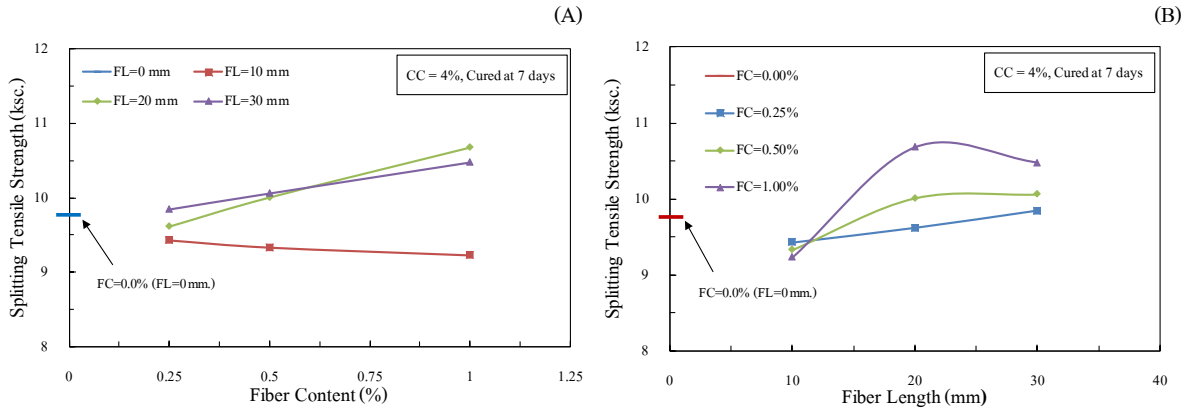


Fig. 7 Splitting Tensile Strength Versus (A) Fiber Content and (B) Fiber Length

ผลการทดสอบยังพบว่าการใช้เส้นใยขนาด 20 mm ส่งผลให้ค่ากำลังดึงผ่าซีกมีค่าสูงที่สุด สำหรับการเสริมในปริมาณเส้นใยเท่ากับ 0.50% และ 1.00% โดยน้ำหนักดินแห้ง หลังจากนั้นความยาวที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังดึงผ่าซีกมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงใน Fig. 7B การเสริมเส้นใยขนาดความยาวเท่ากับ 20 mm. ในปริมาณเท่ากับ 1.00% ทำให้ได้ค่ากำลังดึงผ่าซีกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.68 ksc. และเมื่อเทียบกับค่ากำลังดึงผ่าซีกของดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมเส้นใย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.76 ksc. พบว่าค่ากำลังดึงผ่าซีกเพิ่มขึ้น 9.43%

ผลการทดสอบหาความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion

ผลการทดสอบหาความสึกหรอ พบว่าการใช้เส้นใยหลอดพลาสติกในปริมาณที่มากกว่า 0.50% โดยน้ำหนักดินแห้ง ส่งผลให้ความสึกหรอมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมเส้นใย ดังแสดงใน Fig. 8A โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 0.50% ที่ความยาวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสึกหรอลดลงเป็นอัตราส่วนเส้นตรง ดังแสดงใน Fig. 8B และค่าความสึกหรอที่น้อยที่สุดคืออัตราส่วนผสมของเส้นใยขนาดความยาวเท่ากับ 30 mm ในปริมาณเท่ากับ 0.50% คาดว่าเนื่องจากการเสริมเส้นใยนั้นทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเปราะลดลง เนื่องจากการทดสอบวิธีนี้ วัสดุจะถูกขัดสีและกระแทกด้วยลูกเหล็กกลม ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุลดการแตกจากการขัดสีและกระแทกจากลูกเหล็กกลม

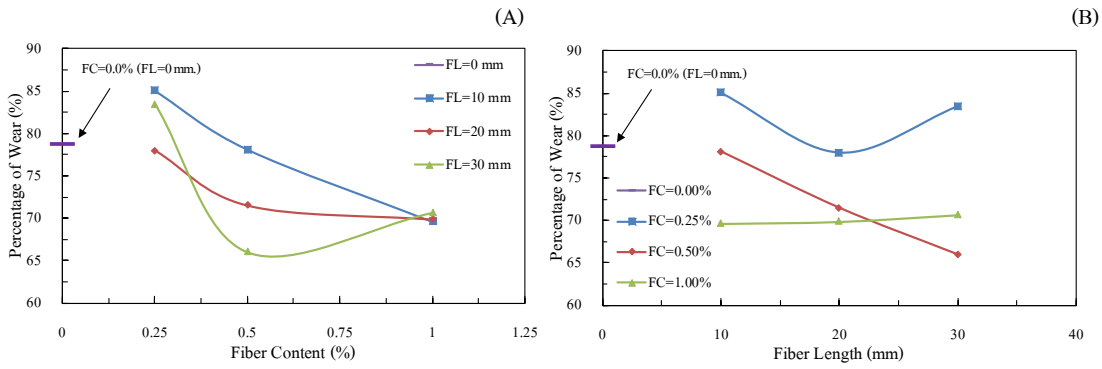


Fig. 8 Percentage of Wear Versus (A) Fiber Content and (B) Fiber Length

สรุป

1) การเสริมเส้นใยขยะพลาสติกโพลีโพรพีลีนในดินซีเมนต์ส่งผลให้กำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงขึ้น ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดคือ ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.00% ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 20 mm. ซึ่งมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 57.39 ksc เพิ่มขึ้นจากค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ไม่เสริมเส้นใยประมาณ 28.85%

2) การเสริมเส้นใยขยะพลาสติกโพลีโพรพีลีนในดินซีเมนต์สามารถนำมาใช้ก่อสร้างเป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนนได้ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งระบุค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 17.5 ksc และ 7.5 ksc ตามลำดับ และส่งผลให้คุณสมบัติด้านการรับกำลังต่อการเสียรูปลดน้อยลง ทำให้ความต่างระหว่างการเสียรูปของวัสดุชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทางมีค่าลดลงส่งผลให้ความคงทนของถนนสูงขึ้น

3) การเสริมเส้นใยหลอดพลาสติกในดินซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังดึงผ่าซีกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยค่าที่เพิ่มมากที่สุด คือ ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 1.00% โดยน้ำหนักดินแห้ง ที่ความยาว 20 mm. ซึ่งเพิ่มมากกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมเส้นใยประมาณ 9.43% ส่งผลให้ชั้นดินซีเมนต์มีการต้านทานต่อการเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น

4) ผลจากความเปราะที่ลดลง ทำให้ค่าความสึกหรอของดินซีเมนต์เสริมเส้นใยมีค่าลดลง ส่งผลให้ดินซีเมนต์มีคุณสมบัติด้านความคงทนสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางสงขลา กรมทางหลวง และส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 12 (สงขลา) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่คอยให้ความช่วยเหลือทำให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2560. 5 หมื่นตันต่อปีขยะทะเล วิกฤติพอหรือยัง. https://www.dmcr.go.th/detailAll/13479/nws/87/, 2 มีนาคม 2560.

Consoli, N.C., Casagrande, M.T.D., Coop, M.R. 2005. Effect of fiber reinforcement on the isotropic compression behavior of a sand. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 131: 1434–1436

Gupta, D., Kumar, A. 2016. Strength characterization of cement stabilized and fiber reinforced clay-pond ash mixes. Int. J. of Geosynth. and Ground Eng. 2: 1–11. doi.org/10.1007/s40891-016-0069-z

Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347: 768–771 doi: 10.1126/science.1260352

Portland Cement Association. 2003. Soil-Cement Information. www.cement.org, 12 January 2021

Tang, C., Shi, B. Zhao, L. 2010. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. Geotext. Geomembr. 28: 54–62. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.001

White, T.D., Haddock, J.E., Hand, A.J.T., Fang, H. 2002. Contributions of pavement structural layers to rutting of hot mix asphalt pavements. National Cooperative Highway Research Program. Washington DC., USA.

การศึกษาวางโครงการเบื้องต้น กรณีศึกษาโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์

The preliminary study of the Huai Bong Reservoir Project: A case study in Nam Ron Sub-district, Wichian Buri District, Phetchabun Province

ทศพร วิชัยพฤกษ์*, วัชรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ

Tossaporn Wichaiphruek*, Watcharin Witayakul, Deeboon Methakullachat

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

Corresponding author. E-mail address: tossaporn.wic@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการวางโครงการเบื้องต้นให้แก่อ่างเก็บน้ำห้วยบง ตั้งอยู่พื้นที่ ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ เพื่อกำหนดลักษณะเค้าโครงเบื้องต้น ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการสำรวจและออกแบบของโครงการ ผลการศึกษาพบว่า โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง มีพื้นที่รับน้ำลงอ่าง 15.15 ตร.กม. ปริมาณฝนเฉลี่ยในพื้นที่โครงการ 1,081.66 มม./ปี ปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่าง 3.24 ล้าน ลบ.ม./ปี ระดับท้องน้ำ +173.00 ม.(รทก.) ระดับ Dead Storage +179.00 ม.(รทก.) ระดับเก็บกัก +190.00 ม.(รทก.) พื้นที่ผิวอ่างที่ระดับเก็บกัก 264.54 ไร่ ความจุอ่างที่ระดับ Dead Storage 0.23 ล้าน ลบ.ม. ความจุอ่างที่ระดับเก็บกัก 2.9 ล้าน ลบ.ม. พื้นที่รับประโยชน์ฤดูฝน 3,000 ไร่ ฤดูแล้ง 590 ไร่ พื้นที่โครงการไม่เข้าเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ ไม่เข้าเขตพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 1 ทุกขนาด จึงไม่ต้องจัดทำรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการมีส่วนร่วมของประชาชนมีมติว่าต้องการให้มีโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง

คำสำคัญ: การมีส่วนร่วมของประชาชน, สิ่งแวดล้อม, อ่างเก็บน้ำ

Abstract

This study aims at project planning for Huai Bong reservoir, located in Nam Ron Sub-district, Wichian Buri District, Phetchabun Province, to define the basic layout as data for the survey and design of this project. The obtained result was found that the Huai Bong reservoir has 15.15 square kilometers of the storage area, 1,081.66 millimeters per year of the average rainfall, 3.24 million cubic meters per year of water flow rate, +173.00 meters (MSL) of the bottom level, +179.00 meters (MSL) of dead storage level, +190.00 meters (MSL) of normal storage level, 264.54 rai of the surface area at the storage level area, 0.23 million cubic meters of the capacity at the dead storage level, 2.9 million cubic meters of the capacity at the normal pool level, 3,000 rai of land use in the rainy season, and 590 rai in the dry season. Huai Bong reservoir area is not a forest conservation area and it is not classified as a watershed classification area level one. Therefore, the environmental Study report is not required. Furthermore, public participation shows that people wanted the Huai Bong reservoir project.

Keywords: environment, public participation, reservoir

คำนำ

การศึกษาวางโครงการเป็นขั้นตอนเริ่มแรก สำคัญต่อการกำหนดแนวทาง รูปแบบ และทิศทางในการพัฒนาแหล่งน้ำในพื้นที่ต่างๆ ของประเทศ เป็นการประยุกต์ใช้วิชาการที่หลากหลาย ทั้งด้านวิศวกรรม ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านเศรษฐกิจและสังคม เพื่อพัฒนาแหล่งน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ “ในปี พ.ศ. 2533 กลุ่ม กำนัน ผู้ใหญ่บ้าน และราษฎร บ้านถ้ำมงคลชัย หมู่ที่ 14 ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ ได้มีหนังสือถึงกรมชลประทาน ที่ พิเศษ/2533 ลงวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2533” (กรมชลประทาน, 2533) มีใจความว่า ราษฎรขาดแคลนน้ำเพื่อใช้อุปโภคบริโภคและทางด้านการเกษตร ประกอบกับ“เมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2547 และ 25สิงหาคม 2548 พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร ทรงห่วงใยการพัฒนาแหล่งน้ำเหนือเขื่อนป่าสักฯ ได้พระราชทานพระราชดำริสรุปความว่า ควรพิจารณาวางโครงการเก็บกักน้ำตอนบนของลำน้ำสาขาแม่น้ำป่าสักไว้ให้มาก เพื่อใช้ด้านการเกษตร และป้องกันอุทกภัย เนื่องจากน้ำเหนือเขื่อนป่าสักมีมาก ให้พิจารณาจัดเก็บกักให้เหมาะสม” (กรมชลประทาน, 2563) กรมชลประทานจึงได้ทบทวนแผนงานโครงการพัฒนาอ่างเก็บน้ำของลุ่มน้ำป่าสักจากเดิม และเสนอโครงการพัฒนาแหล่งน้ำที่มีศักยภาพ จำนวน 19 โครงการ ซึ่งโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง เป็นหนึ่งในแผนงานที่กรมชลประทานได้วางแผนการพัฒนาไว้ เนื่องจากโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบงตั้งอยู่บนลำน้ำสาขาเหนือเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ป้องกันการไหลของน้ำสมทบในเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ซึ่งทำให้มีปริมาณน้ำมากจนเกิดปัญหาอุทกภัย และช่วยกระตุ้นระบบเศรษฐกิจภาคการเกษตรของ อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ ต่อมาปีพ.ศ. 2563 กรมชลประทานได้รับมอบหมายให้ดำเนินการทบทวนการศึกษาโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง รวมทั้งศึกษารายละเอียดด้านต่าง ๆ เพิ่มเติมให้เพียงพอกับงานศึกษาในขั้นวางโครงการ Pre-Feasibility Study

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจนำมาเป็นกรณีศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดลักษณะเค้าโครงเบื้องต้นของโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ และเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับกระบวนการสำรวจและออกแบบโครงการ ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

โปรแกรมที่ใช้

ArcMap 10.5

- วิเคราะห์หาสถานีที่มีอิทธิพลต่อพื้นที่โครงการผ่านวิธี Thiessen Polygon
- วิเคราะห์หาความจุและพื้นที่อ่างเก็บน้ำในระดับความสูงต่าง ๆ
- จัดทำแผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง พื้นที่รับประโยชน์ และพื้นที่สำรวจ สำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

การเตรียมข้อมูล

สถานีวัดน้ำฝนที่ 360043 , 360122 และ 360082 อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ สถานีวัดน้ำท่าที่ S.10 ต.บ้านหินฮาว อ.หล่มเก่า จ.เพชรบูรณ์ กลุ่มสารสนเทศและพยากรณ์น้ำ ส่วนอุทกวิทยา สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา

กรมชลประทาน สอบถามข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและการจัดประชุมการมีส่วนร่วมของประชาชนผ่านที่ทำการองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำร้อน อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย

หาสถานีน้ำฝนที่มีอิทธิพลต่อพื้นที่โครงการ โดยวิธี Thiessen Polygon ผ่านโปรแกรม ArcMap 10.5 “ทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ตามสัดส่วนของพื้นที่กับสถานีที่มีอิทธิพล เพื่อใช้เป็นตัวแทนปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของพื้นที่โครงการ” (กรมชลประทาน, 2558)

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย

ใช้ตารางคำนวณปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยโดยการหาสัมประสิทธิ์การไหล (Runoff Coefficient) มีพื้นที่รับน้ำ 15.15 ตารางกิโลเมตร และใช้ข้อมูลจากปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ เลือกลักษณะภูมิประเทศประเภท TERRAIN C (Rolling area open forest , some peddy field) เพื่อหาปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยโดยวิธี Rational “นำปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยที่ได้โดยวิธี Rational มาแปลงค่าข้อมูลด้วยสัดส่วนของพื้นที่รับน้ำฝน (โครงการ/สถานีข้อมูล)” (กรมชลประทาน, 2558) โดยเทียบเคียงกับสถานีวัดน้ำท่า S.10 เพื่อให้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้ใกล้เคียงกับรูปร่างสัณฐานตามความเป็นจริงของลักษณะลุ่มน้ำ

การวิเคราะห์หาปริมาณตะกอน

ในการคำนวณใช้ C = 1.00 (ค่า Slope มากกว่า 1:200) อัตราการกัดเซาะผิวดินพิจารณาจากสภาพพื้นที่โดยมีองค์ประกอบหลักๆที่สำคัญคือ ขนาดพื้นที่รับน้ำลงอ่างฯและลักษณะป่าที่ปกคลุม พื้นที่รับน้ำของอ่างมีขนาดประมาณ A = 15.15 ตารางกิโลเมตร ใช้ประมาณ 0.25 มม./ปี/ตร.กม. (พื้นที่รับน้ำมีค่าน้อยกว่า 100 ตร.กม. และป่าไม้ถูกทำลายบางส่วน d = 0.25) ตามสภาพใช้งานของอ่างเก็บน้ำกำหนดอายุใช้งานไว้ที่ 50 ปี ดังนั้นใช้ N = 50 นำข้อมูลทั้งหมดมาหาปริมาณตะกอน ตาม Equation 1 (กรมชลประทาน, 2560)

$$V = C \times d \times A \times N \times 1{,}000 \quad (1)$$

การวิเคราะห์ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภค

การกำหนดวางโครงการเบื้องต้น ผู้ศึกษาต้องการส่งน้ำเพื่ออุปโภค-บริโภคให้ประชาชน 3 หมู่บ้าน ได้แก่ บ้านถ้ำมงคลชัย บ้านคลองบง และบ้านไทรงาม รวมจำนวนประชากร 2,427 คน คิดอัตราการใช้น้ำ 200 ลิตร/คน/วัน

การวิเคราะห์ความต้องการใช้น้ำเพื่อการเกษตร

การศึกษาความต้องการใช้น้ำชลประทานเพื่อนำไปออกแบบขนาดอ่างเก็บน้ำห้วยห้วยบง ทำการคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือน เพื่อหาความต้องการน้ำชลประทานต่อเดือนต่อไร่ โดยกำหนดแผนการเพาะปลูกของโครงการเป็นการปลูกข้าวนาปี และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยกำหนดข้าวนาปีเริ่มปลูกในเดือนเมษายนและเก็บเกี่ยวในเดือนกันยายน ส่วนข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เริ่มปลูกในเดือนตุลาคมและเก็บเกี่ยวในเดือนมีนาคม โดยความต้องการใช้น้ำ

เพื่อการเกษตรพิจารณาจากปริมาณฝนใช้การ อัตราการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ETo ค่า Kc ของพืช ประสิทธิภาพการชลประทาน อัตราการรั่วซึมในแปลงนา

การวิเคราะห์หาสมดุลน้ำ

วิธีจำลองการปฏิบัติงานของอ่างเก็บน้ำด้วย Reservoir Operation Study (ROS) ใช้หลักการสมดุลน้ำมาวิเคราะห์ “โดยพิจารณาศักยภาพการใช้น้ำ จากศักยภาพน้ำต้นทุนเทียบกับความสามารถการส่งน้ำในสภาพปัจจุบันกับในสภาพอนาคต โดยต้องพิจารณาเปรียบเทียบทั้ง 2 สภาพการณ์จากเงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเหตุการณ์ของความต้องการน้ำทางทฤษฎีและการสังเคราะห์ปริมาณน้ำต้นทุนย้อนหลัง เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพการพัฒนาโครงการ การใช้น้ำแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างการใช้น้ำกับปริมาณน้ำต้นทุน” (กรมชลประทาน, 2557) “ซึ่งปัจจุบันได้ใช้โปรแกรมช่วยคำนวณประเภท Spreadsheet เช่น Microsoft Excel มาประยุกต์ใช้เพื่อให้การคำนวณสะดวกรวดเร็ว โดยข้อมูลด้านอุทกวิทยาที่ใช้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการเก็บข้อมูลในอดีต ข้อมูลที่ต้องทราบได้แก่ปริมาณน้ำต้นทุนที่จะไหลลงอ่างเก็บน้ำ การสูญเสียน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำเนื่องจากการระเหยและรั่วซึม ปริมาณความต้องการใช้น้ำที่คาดว่าจะต้องใช้จากอ่างเก็บน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับพื้นที่อ่างเก็บน้ำ” (ปรัชญา ฉายวัฒนา, 2563)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

พื้นที่โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง ตั้งอยู่ที่ ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ พิกัดตามแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 47QNT 301-477 ระวาง 5240II Latitude 15° 38” 12.2’ เหนือ Longitude 101° 18” 41.1’ ตะวันออก

ปริมาณฝนเฉลี่ย

เมื่อทำการ Thiessen Polygon สถานีใกล้เคียง พบว่ามีเพียงสถานีวัดปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยเพียงสถานีเดียวที่มีอิทธิพลต่อพื้นที่โครงการ แสดงดัง Fig.1 จึงใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของสถานี 360122 ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ ช่วงปีข้อมูล 2513–2559 เป็นสถานีตัวแทนในการคิดปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย โดยมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปี คือ 1,098.60 มม./ปี

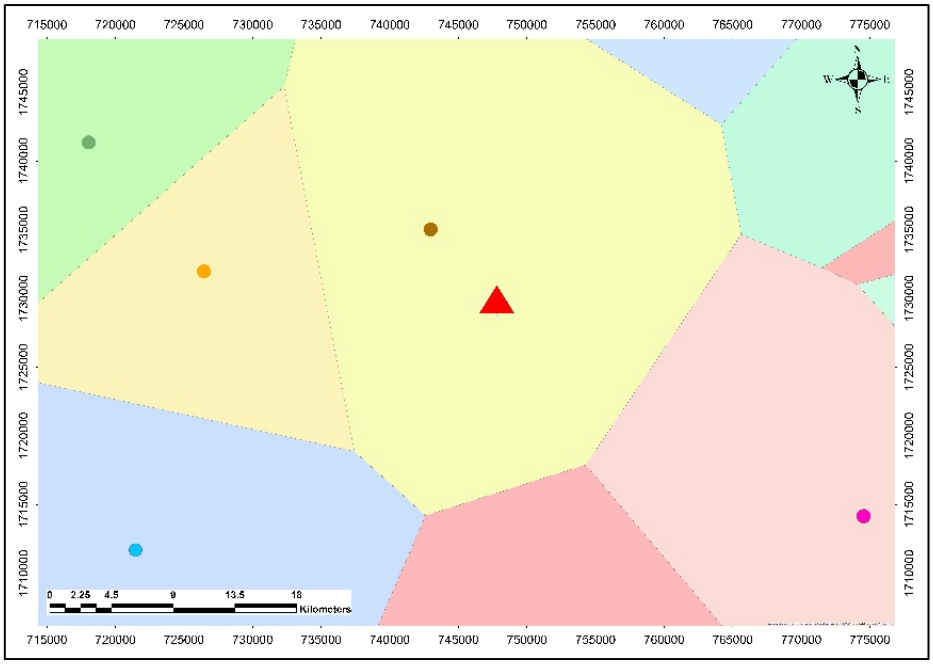


Fig. 1 The average rainfall of the station 360122 and Thiessen Polygon analysis results via ArcMap

ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย

โครงการมีพื้นที่รับน้ำฝน 15.15 ตร.กม. จากการนำปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาคำนวณหาปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยผ่านวิธี Rational Method ได้ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย แสดงดัง Table 1 เมื่อนำไปเทียบเคียงกับสถานีวัดน้ำท่า S.10 เพื่อปรับแก้ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนให้มีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง จึงได้ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย แสดงดัง Table 2 และการกำหนดระดับกักเก็บน้ำควรมีค่าไม่มากกว่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีที่ไหลผ่านบริเวณพื้นที่โครงการ

Table 1 The calculation table of an average runoff volume using Rational Method

Month	Rainfall (mm.)	D.A. (km^2)	R.O.coeft (%)	Runoff (m^3)
April	67.60	15.15	7.243	74,181
May	131.90	15.15	14.570	291,151
June	130.50	15.15	13.389	264,706
July	167.70	15.15	23.206	589,588
August	204.40	15.15	27.959	865,789
September	230.70	15.15	36.365	1,270,983
October	97.70	15.15	19.141	283,319
November	14.50	15.15	3.367	7,396
December	3.10	15.15	1.890	888
January	5.70	15.15	2.227	1,923
February	13.00	15.15	3.173	6,248
March	31.80	15.15	5.607	27,013
Total	1,098.60			3,683,184

Table 2 The calculation table of an average runoff volume for project area

Month	Average runoff (mm)
April	66,297
May	290,972
June	305,704
July	585,626
August	821,350
September	1,241,233
October	302,021
November	11,050
December	3,683
January	7,366
February	11,050
March	36,832
Total	3,683,184

ปริมาณตะกอน

จากการคำนวณปรากฏว่ามีปริมาณตะกอนที่กั้นอ่างเก็บน้ำ 189,375 ลูกบาศก์เมตร และการกำหนดระดับ Dead Storage ของอ่างเก็บน้ำควรมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าปริมาณตะกอนตกจมที่กั้นอ่างเก็บน้ำ

กำหนดระดับกักเก็บน้ำและระดับ Dead Storage

จากข้อมูลน้ำปริมาณน้ำท่าไหลผ่านหัวงานและปริมาณตะกอนสะสมในรอบ 50 ปี กำหนดระดับเก็บกักน้ำ คือ +190.00ม. (รทก.) และระดับ Dead Storage คือ +179.00 ม. (รทก.) โดยการพิจารณาโค้งความจุ แสดงดัง Fig. 2

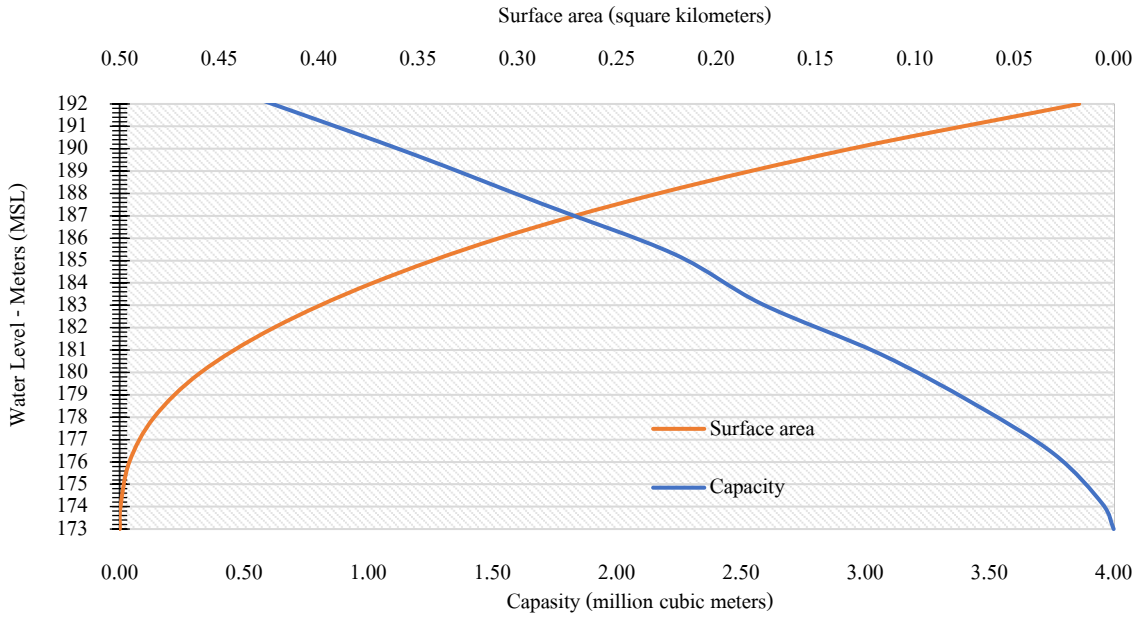


Fig. 2 The diagram of water surface area and water storage capacity at different levels in the project area

พื้นที่รับประโยชน์

โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง วิเคราะห์ผ่านวิธีจำลองการปฏิบัติงานของอ่างเก็บน้ำด้วย Reservoir Operation Study (ROS) สามารถส่งน้ำในฤดูแล้งได้ 3,000 ไร่ และส่งให้ฤดูฝนได้ 590 ไร่ แสดงดัง Table 2 และแผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่รับประโยชน์ แสดงดัง Fig. 3

Table 2 The calculation table of the Reservoir Operation Simulation (ROS)

RESERVOIR OPERATION STUDY

Project....Huai Bong.....
Tambol....Nam Ron.....
Amphur....Wichian Buri.....
Changwad....Phetchabun.....

Reservoir Capacity.....…… 2,943,253 .....$m.^3$
Dead Storage.....……..... 189,375 .....$m.^3$
Average Annual Runoff Volume....3,683,184.....MCM

Row No.	ITEM			PERIOD											
				OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP
1	Average rainfall		mm.	97.7	14.5	3.1	5.7	13.0	31.8	67.6	131.9	130.5	167.7	204.4	230.7
2	Evaporation and Seepage		mm.	109.4	104.7	101.1	102.6	114.0	141.4	141.9	126.5	109.2	111.0	90.8	96.6
3	Quantity in storage at start of period		1,000 $m.^3$	2,265.8	2,943.3	2,557.7	2,088.2	1,657.5	1,348.0	1,342.4	1,375.3	858.3	261.8	197.5	1,012.3
4	Inflow from runoff		1,000 $m.^3$	302.0	11.0	3.7	7.4	11.0	36.8	66.3	291.0	305.7	585.6	821.4	1,241.2
5	Average water surface area of lake		1,000 $m.^2$	352.8	423.3	388.0	320.1	287.4	254.3	254.3	254.3	199.1	93.7	70.0	199.1
6	Rainfall over water surface area		1,000 $m.^3$	34.5	6.1	1.2	1.8	3.7	8.1	17.2	33.5	26.0	15.7	14.3	45.9
7	Evaporation and Seepage		1,000 $m.^3$	38.6	44.3	39.2	32.8	32.8	35.9	36.1	32.2	21.7	10.4	6.4	19.2
8	Net total gain or loss		1,000 $m.^3$	297.9	-27.1	-34.3	-23.7	-18.0	9.0	47.4	292.3	309.9	590.9	829.3	1,267.9
9	Total quantity for period		1,000 $m.^3$	2,563.6	2,916.1	2,523.3	2,064.5	1,639.5	1,356.9	1,389.8	1,667.7	1,168.3	852.7	1,026.8	2,280.3
10	Requirement for rice per rai		$m.^3$								264.9	297.3	213.6	0.0	
11	Requirement for upland crop per rai		$m.^3$	213.3	583.0	712.9	665.4	469.6							
12	Quantity required for rice - rai	3,000 rai	1,000 $m.^3$								794.8	892.0	640.7	0.0	
13	Quantity required for upland crop - rai	590 rai	1,000 $m.^3$	125.8	344.0	420.6	392.6	277.0							
14	Quantity required for water supply		1,000 $m.^3$	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5
15	Quantity required for Pumping Station		1,000 $m.^3$												
16	Total Quantity required		1,000 $m.^3$	140.3	358.5	435.1	407.1	291.5	14.5	14.5	809.3	906.5	655.2	14.5	14.5
17	Shortage (If row 9-15 less than dead storage)		1,000 $m.^3$												
18	Excess or spill (In flow 9-16 more than res.cap		1,000 $m.^3$												
19	Caried over to next period		1,000 $m.^3$	2,423.3	2,557.7	2,088.2	1,657.5	1,348.0	1,342.4	1,375.3	858.3	261.8	197.5	1,012.3	2,265.8

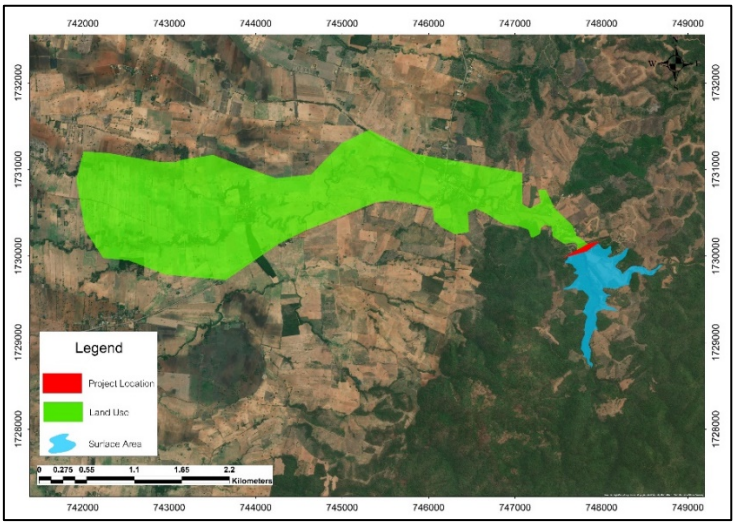
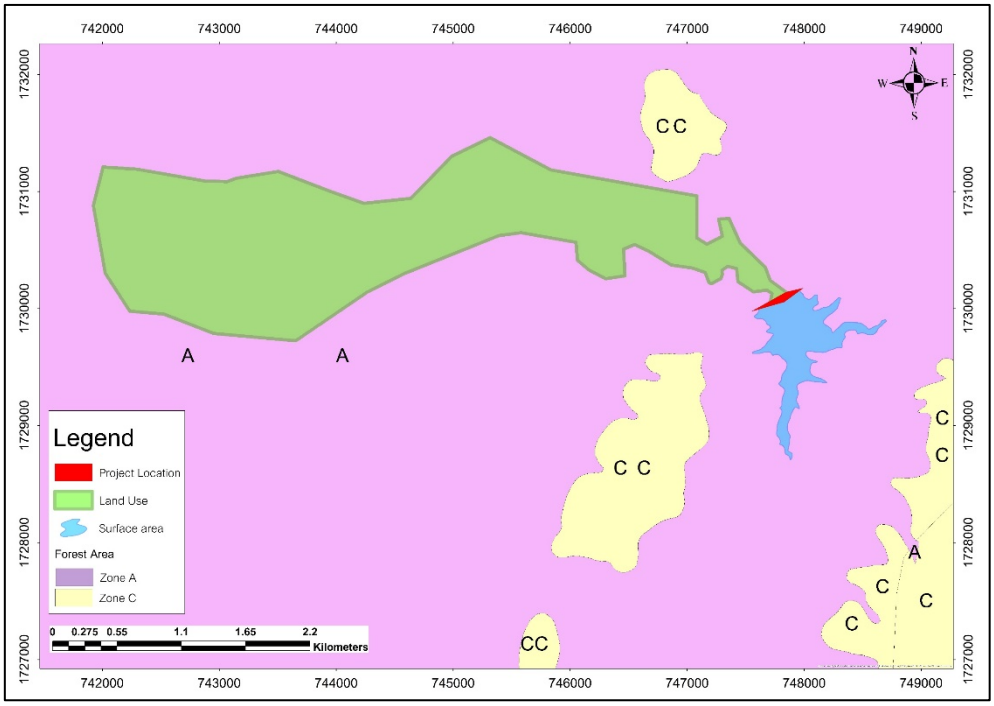


Fig. 3 The picture of storage area and land use of the project

ด้านสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น

จากการซ้อนทับแผนที่ด้วยโปรแกรม ArcGIS 10.5 พบว่าพื้นที่โครงการไม่เข้าเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์โซน C และไม่เข้าเขตพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 1 แสดงดัง Fig. 4 บริเวณโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบงไม่พบเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติและไม่พบพื้นที่เขตห้ามล่าพันธุ์สัตว์ป่า จึงไม่จำเป็นต้องจัดทำรายงานศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อม

(A)



(B)

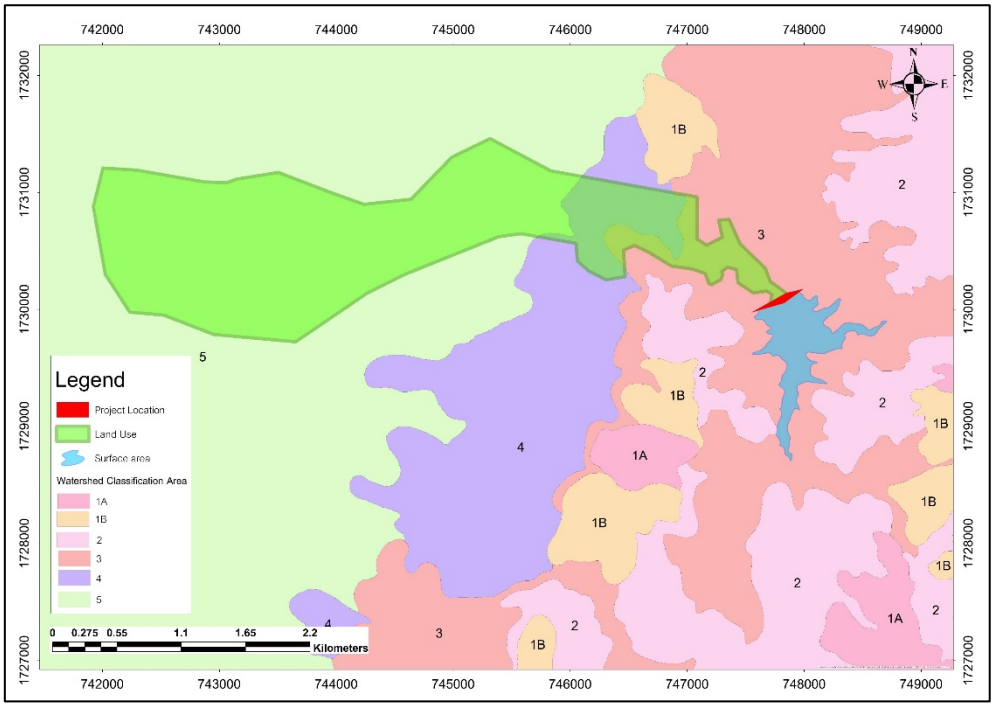


Fig. 4 The overlapping territory between the project area and forest boundaries (A), watershed classification area (B)

การประชาสัมพันธ์โครงการและการมีส่วนร่วมของประชาชน

เมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2563 ณ.ที่ทำการองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำร้อน อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยมีนางสาวนพรัตน์ สีสินลา ปลัดองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำร้อน ปฏิบัติหน้าที่ นายกองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำร้อน เป็นประธานในการประชุม โดยมีผู้ได้รับประโยชน์และผู้เสียผลประโยชน์จากโครงการ เข้าร่วมประชุมทั้งหมด 139 คน และมีผู้ตอบแบบสอบถาม 104 ชุด จากแบบสอบถามได้ผล แสดงดัง Fig. 5

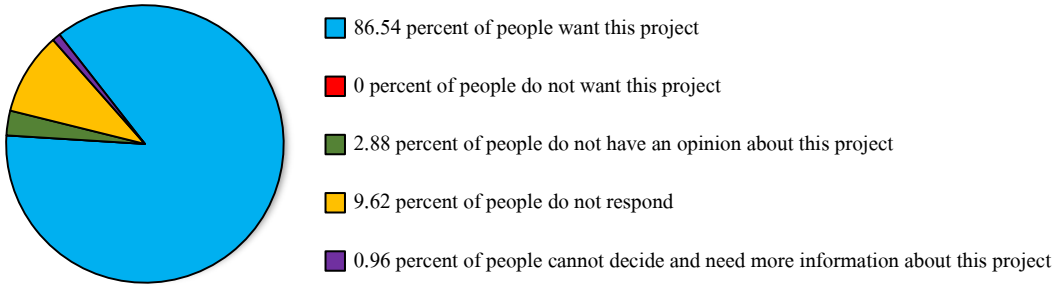


Fig. 5 The people's demand for Huai Bong Reservoir Project, Nam Ron Sub-District, Wichian Buri District, Phetchabun Province.

สรุป

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ตำแหน่งที่ตั้งหัวงานของโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง ตั้งอยู่ที่ ต.น้ำร้อน อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ พิกัดตามแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 ที่ 47 QNT 301-477 ระวาง 5240II Latitude ที่ 15° 38" 12.2' เหนือ longitude ที่ 101° 15" 41.11' ตะวันออก มีพื้นที่รับน้ำลงอ่าง 15.15 ตร.กม. ส่วนลาดเทของลำน้ำบริเวณที่ตั้งอ่างเก็บน้ำ 1:56 ปริมาณฝนเฉลี่ยในพื้นที่โครงการ 1,081.66 มม./ปี ปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่าง 3.24 ล้าน ลบ.ม./ปี ระดับท้องน้ำ +173.00 ม.(รทก.) ระดับ Dead Storage +179.00 ม.(รทก.) ระดับเก็บกัก +190.00 ม.(รทก.) พื้นที่ผิวอ่างที่ระดับเก็บกัก 264.54 ไร่ ความจุอ่างที่ระดับ Dead Storage 0.23 ล้าน ลบ.ม. ความจุอ่างที่ระดับเก็บกัก 2.9 ล้าน ลบ.ม. พื้นที่รับประโยชน์ฤดูฝน 3,000 ไร่ ฤดูแล้ง 590 ไร่ ระบบส่งน้ำแบบ Gravity ผ่าน River Outlet ลงสู่ลำน้ำเดิม พื้นที่โครงการไม่เข้าเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ ไม่เข้าเขตพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 1 ทุกขนาด ไม่เข้าเขตพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติ และไม่เข้าเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า จึงไม่เข้าข่ายต้องจัดทำรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อม และจากการมีส่วนร่วมของประชาชนมีความคิดเห็นว่าต้องการให้มีโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบงร้อยละ 86.54 ต้องการข้อมูลเพิ่มเติมร้อยละ 2.88 ไม่มีความคิดเห็นเกี่ยวกับโครงการร้อยละ 0.96 ไม่ระบุลงในแบบสอบถามร้อยละ 9.62 และไม่ต้องการโครงการร้อยละ 0 โดยมีขอบเขตการสำรวจ ดังนี้ 1) สำรวจแผนที่อ่างเก็บน้ำ 3.00 ตร.กม. สำรวจถึงระดับ +220.00 ม.(รทก.) โดยแสดงระดับทุก 1.00 ม. 2) สำรวจแผนที่หัวงานและอาคารประกอบเหนือน้ำและท้ายน้ำอย่างละ 1.00 ก.ม. 3) สำรวจรูปตัดลำน้ำบริเวณโครงการยาวประมาณ 2.00 กิโลเมตร โดยสำรวจเหนือน้ำ 1.00 กิโลเมตรและท้ายน้ำ 1.00 กิโลเมตร ทำรูปตัดทุก ๆ 100.00 เมตร ซ้ายและขวาข้างละ 100.00 เมตร พร้อมทั้งแสดงระดับน้ำขณะสำรวจ ระดับน้ำนองสูงสุดที่มีประวัติไว้ด้วย และให้แสดงรูปตัดบริเวณที่ตั้งของแนวเขื่อนด้วย 4) สำรวจบริเวณพื้นที่รับประโยชน์ด้านท้ายอ่างเก็บน้ำประมาณ 15 ตารางกิโลเมตร หรือสำรวจถึงระดับประมาณ +179 ม.(รทก.) โดยแสดงระดับทุกๆ 1.00 เมตร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายปรัชญา ฉายวัฒนา สำหรับคำแนะนำและตัวอย่างโครงการในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณสำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2557. มาตรฐานการศึกษาเพื่อจัดทำรายงานวางโครงการ. ฝ่ายวิศวกรรมบริหาร. กลุ่มวิศวกรรม. สำนักบริหารโครงการ. กรมชลประทาน(สามเสน), กรุงเทพฯ

กรมชลประทาน. 2563. รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 โครงการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมอ่างเก็บน้ำนางั่ว อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบูรณ์. กรมชลประทาน (สามเสน), กรุงเทพฯ

กรมชลประทาน. 2558. รายงานการศึกษาวางโครงการเบื้องต้น (Reconnaissance Study Report) โครงการอ่างเก็บน้ำน้ำงาว อันเนื่องมาจากพระราชดำริ. สำนักบริหารโครงการ. กรมชลประทาน (สามเสน), กรุงเทพฯ

กรมชลประทาน. 2533. รายงานเบื้องต้นโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยบง อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์. ฝ่ายวางโครงการ 3. กองวางโครงการ. กรมชลประทาน (สามเสน), กรุงเทพฯ

กรมชลประทาน. 2560. การศึกษาโครงการเบื้องต้น (Reconnaissance Study Report) โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยตาด อำเภอสุวรรณคูหา จังหวัดหนองบัวลำภู. ส่วนวางโครงการที่ 2. สำนักบริหารโครงการ. กรมชลประทาน (สามเสน), กรุงเทพฯ

ปรัชญา ฉายวัฒนา. 2563. การศึกษาทบทวนขนาดอ่างเก็บน้ำ: กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำห้วยท่าเคย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

การศึกษาความแปรปรวนของการจำลองสถานการณ์น้ำในอ่างเก็บน้ำ กรณีศึกษา เขื่อนขุนด่านปราการชล

Simulation variance of water storage level: Case study of Khundan Prakarnchon Dam

ณัฐวดี แย้มสาย, สุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี*

Nattawadee Yamsai, Suphawut Malaikrisanachalee*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

เขื่อนขุนด่านปราการชล ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำนครนายก ซึ่งในช่วงฤดูน้ำหลากสภาพน้ำหลากมีความผันแปรสูง ประกอบกับอ่างเก็บน้ำมีขนาดความจุเพียง 70 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย การบริหารจัดการน้ำของเขื่อนใช้วิธีการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำโดยใช้โปรแกรม Reservoir Operation Simulation ซึ่งช่วยจำลองสภาพปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ โดยใช้หลักสมดุลของน้ำในอ่างเก็บน้ำ เพื่อให้การบริหารจัดการน้ำเกิดประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความแปรปรวนของการจำลองสถานการณ์น้ำจากค่าความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจริง โดยแบ่งการเปรียบเทียบเป็นรายฤดูกาล และรายปี จำนวน 9 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2554 ถึง พ.ศ. 2562 โดยชุดข้อมูลนำเข้าคือข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวัน แบ่งออกเป็น 6 กรณีศึกษา ได้แก่กรณีค่าเฉลี่ย, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 20, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 50, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 80, กรณีค่าสูงสุด, และกรณีค่าต่ำสุด ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวสามารถจำแนกโอกาสที่เกิดค่าความคลาดเคลื่อนว่าอยู่ในช่วงใด ทำให้การประเมินสภาพปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่นยำมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: เขื่อนขุนด่านปราการชล, ความคลาดเคลื่อน, จำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ

Abstract

Khundan Prakanchon Dam is located in the Nakhon Nayok River Basin. The flood magnitude change highly in flood season. In addition, the reservoir has a capacity of only 70percent of the average annual runoff. The water management of the dam uses the Reservoir Operation Simulation program, which simulates the condition of the reservoir water volume from the happening of various activities using the water balance principle in the reservoir. In order to optimize water management, the variance of the water simulation was studied from the simulation results which compared with the actual water content. The comparison can be divided into seasonally and annually for 9 years between 2011 and 2019. Moreover, the data set was the daily flow into reservoirs, and it can be divided into 6 cases studies. For example, the mean case, the 20th percentile case, the 50th percentile case, the 80th percentile case, the maximum case, and the lowest case. From the study, it revealed that we can separated the oppotunities of the shift in the range when comparing these values which it can be identified. This makes the assessment of the condition of the water content in the reservoir more accurate.

Keywords: errors value, Khundan Prakanchon Dam, reservoir simulation

คำนำ

น้ำจัดเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทยที่มีความต้องการใช้น้ำเพื่อการเกษตรโดยถือว่าเป็นกลุ่มที่มีความต้องการใช้น้ำสูงสุด ตามมาด้วยการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค ภาคการท่องเที่ยว ภาคอุตสาหกรรม และการรักษาระบบนิเวศตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคมที่เติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากน้ำเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงจากเดิมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ฤดูกาลต่างๆแปรปรวนไปจากเดิม บางปีฝนตกมากเกินไปจนเกิดปัญหาน้ำท่วม บางปีตกน้อยจนเกิดปัญหาภัยแล้งกลายเป็นความเสี่ยงในการใช้ทรัพยากรน้ำ ดังนั้นการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ จึงสำคัญต่อการดำเนินการเพื่อให้มีความสอดคล้องกับสภาวะปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันและเป็นการเตรียมความพร้อมรับมือในอนาคต

การบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำของกรมชลประทาน ได้นำโปรแกรมการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Simulation) มาเป็นเครื่องมือช่วยในการวางแผนบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำ สิ่งสำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จหรือล้มเหลวของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ คือการคาดคะเนปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในช่วงระยะเวลาวางแผนล่วงหน้า เช่น ในช่วง 12 เดือนข้างหน้า ถ้าสามารถรับรู้ปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำในแต่ละเดือนในช่วง 12 เดือนข้างหน้า การวางแผนจะทำได้ง่าย โดยขั้นแรกจะสมมุติแผนการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำแล้วจึงทำการวิเคราะห์สมดุลน้ำในอ่างเก็บน้ำในแต่ละเดือนอย่างต่อเนื่อง 12 เดือน ผลการวิเคราะห์สมดุลของน้ำจะทำให้ทราบว่าควรเก็บกักน้ำแต่ละเดือนเท่าใด ควรส่งน้ำในแต่ละเดือนเท่าใด และเมื่อใดจะมีการขาดแคลนน้ำและการไหลล้นอ่างเก็บน้ำ เพื่อการปรับแผนในการบริการจัดการน้ำให้เกิดปัญหาน้อยที่สุด

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความแปรปรวนของการจำลองสถานการณ์น้ำจากค่าความคลาดเคลื่อนของการคาดคะเนปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำของอ่างเก็บน้ำขุนด่านปราการชล ซึ่งเป็นแหล่งน้ำต้นทุนหลักของจังหวัดนครนายก ที่ภารกิจหลักในการส่งน้ำเพื่อการเกษตร การอุปโภค-บริโภค การผลักดันน้ำเค็มของลุ่มน้ำบางปะกง การผลิตกระแสไฟฟ้าและสนับสนุนด้านการท่องเที่ยว โดยนำค่าข้อมูลสถิติต่างๆ ของอ่างเก็บน้ำมาใช้ในการคำนวณประเมินสถานการณ์น้ำในอ่างเก็บน้ำ และเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการวางแผนการจัดสรรน้ำโดยการจำลองปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาต่างๆ นำมาเป็นข้อมูลประกอบ ในการติดตามสถานการณ์น้ำในอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาต่างๆ ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

อ่างเก็บน้ำขุนด่านปราการชลเป็นโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อยู่ในความรับผิดชอบของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาขุนด่านปราการชล สำนักงานชลประทานที่ 9 กรมชลประทาน ตั้งอยู่ตำบลหินตั้ง อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เขื่อนคอนกรีตบดอัดและเขื่อนดินปิดช่องเขาต่ำ สามารถเก็บกักน้ำได้สูงสุด 224 ล้านลูกบาศก์เมตร จัดสรรน้ำให้พื้นที่ชลประทาน จำนวน 185,000 ไร่ โดยอ่างเก็บน้ำขุนด่านปราการชลอยู่ในลุ่มน้ำนครนายก ซึ่งเป็นลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำบางปะกง ลุ่มน้ำนครนายกครอบคลุมพื้นที่

อำเภอเมือง อำเภอบ้านนา อำเภอปากพลี และอำเภอองครักษ์ของจังหวัดนครนายก มีเนื้อที่ 2,433ตารางกิโลเมตร ต้นน้ำของแม่น้ำนครนายกเกิดจากเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ซึ่งติดทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ มียอดเขาสูงประมาณ 1,000–1,300 เมตร เนื่องจากพื้นที่ลุ่มน้ำมีเทือกเขาดงพญาเย็น (เขาใหญ่) อยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นแนวปะทะของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้มีฝนตกชุก โดยเฉลี่ยประมาณ 2,600 มม./ปี และมีน้ำท่าเฉลี่ยประมาณ 292.45 ล้าน ลบ.ม. (กรมชลประทาน, 2552)

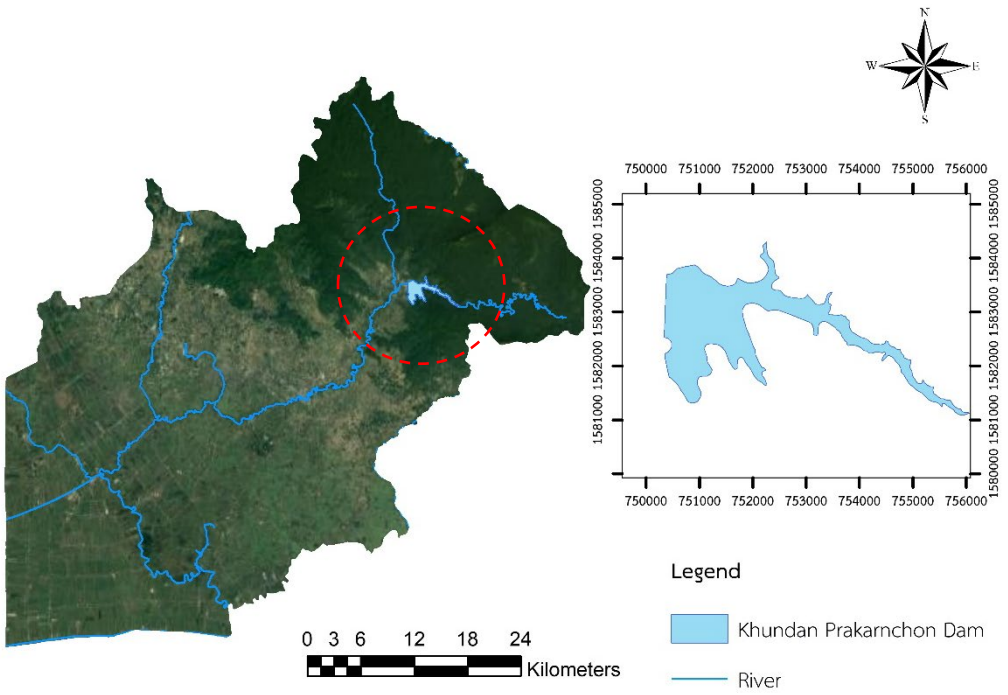


Fig. 1 Study area

การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

รวบรวมข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ รายละเอียดอ่างเก็บน้ำ แผนและผลการจัดสรรน้ำเฉลี่ยรายวัน อัตราการระเหยสะสมประจำเดือน ข้อมูลโค้งความจุ ข้อมูลปริมาณน้ำรายวัน โดยใช้ข้อมูลสถิติจำนวน 9 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2554 ถึง พ.ศ. 2562 โดยบันทึกค่าข้อมูลลงในโปรแกรมการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Simulation) ซึ่งเป็นโปรแกรมช่วยจำลองสภาพปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆโดยใช้หลักสมดุลของน้ำในอ่างเก็บน้ำ โดยหลักสมดุลของน้ำในอ่างเก็บน้ำ คือ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ – ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากอ่างเก็บน้ำทั้งหมด = ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เปลี่ยนไป

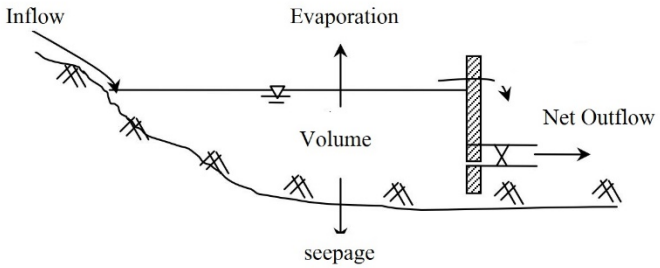


Fig. 2 Water Balance

ตัวโปรแกรมถูกเขียนขึ้นมาจาก Visual Basic for Applications ที่มีอยู่ใน Microsoft Excel โดยการทำงานของโปรแกรมแบ่งได้ 3 กรณี ดังนี้ กรณีรันโปรแกรมครั้งแรก กรณีอัพเดทรายสัปดาห์ กรณีขึ้นปีใหม่ (กรมชลประทาน, 2554) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กรณีขึ้นปีใหม่ โดยการบันทึกค่า Inflow คาดการณ์ แบ่งออกเป็น 6 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีค่าเฉลี่ย, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 20, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 50, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 80, กรณีค่าสูงสุด, และกรณีค่าต่ำสุด ลงในชีต Simulation แบบรายวัน จำนวน 365 วัน เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จแล้ว จะแสดงค่า Level, Storage, Inflow, Outflow, Spill ในชีต Simulation โดยทำการทำนายล่วงหน้าแบบรายปีย้อนหลังจำนวน 9 ปี (พ.ศ. 2554–2562) เพื่อนำค่า Inflow ที่ได้มาเปรียบเทียบ

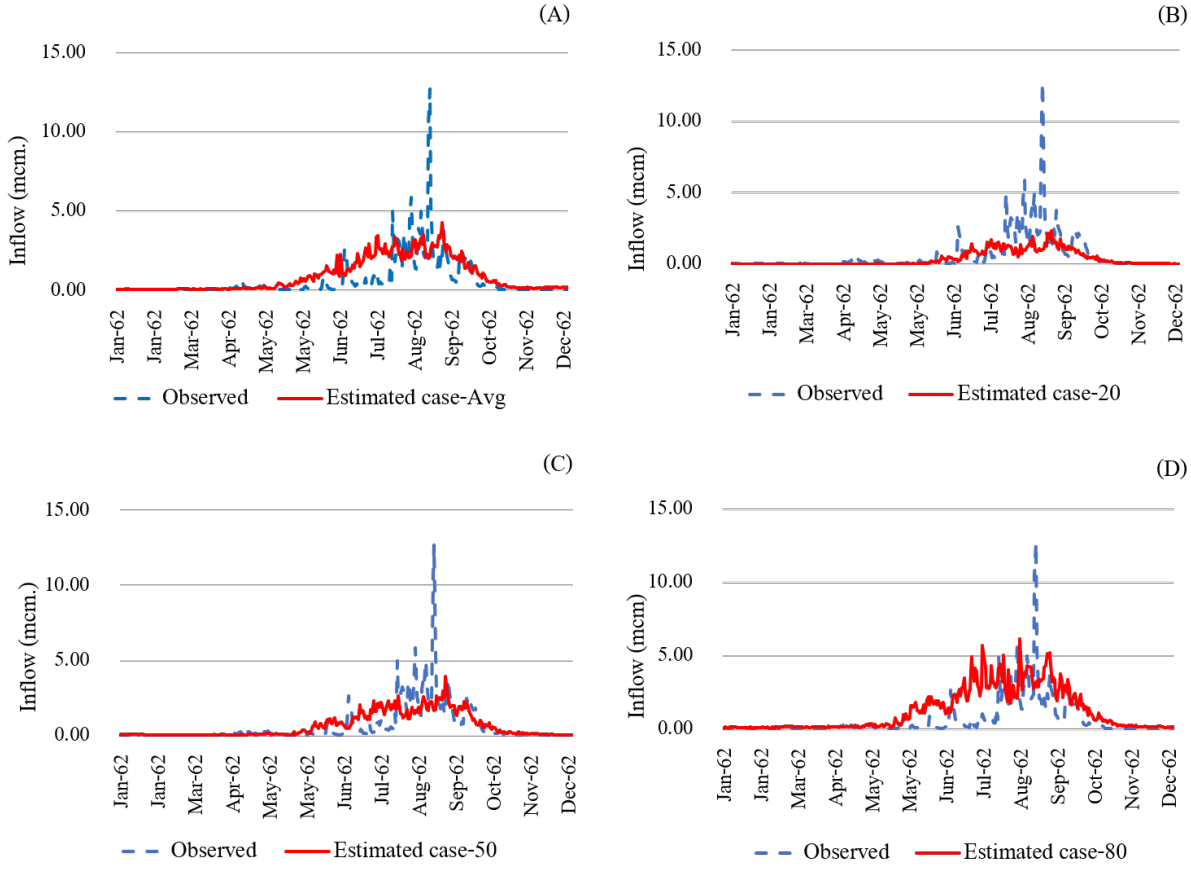


Fig. 3 Comparison of inflow between observed and estimated from simulation.

การแจกแจงข้อมูล

ในงานวิจัยนี้นำค่า Inflow ที่ได้จาก Simulation ของอ่างเก็บน้ำขุนด่านปราการชลที่เป็นข้อมูลรายวันมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงด้วยการจัดกลุ่มค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ด้วยวิธีการแจกแจงความถี่ของค่าความคลาดเคลื่อน (Error) โดยการแบ่งช่วงของข้อมูลช่วงละ 0.50 mcm ตั้งแต่ช่วง -20.00 ถึง 20.00 mcm สร้างเป็น category เพื่อดูว่าค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นช่วงไหนบ้าง ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Number of times in rank of error

Rank of Error	Number of Times					
	Case Avg	Case percentile 20	Case percentile50	Case percentile80	Case Maximum	Case Minimum
[-5.5,-5)	8	12	11	10	5	10
[-5,-4.5)	8	15	11	6	9	18
[-4.5,-4)	16	14	14	9	8	26
[-4,-3.5)	12	28	16	13	6	34
[-3.5,-3)	19	41	25	15	8	48
[-3,-2.5)	27	45	32	14	14	40
[-2.5,-2)	27	53	49	21	11	101
[-2,-1.5)	60	96	60	36	24	119
[-1.5,-1)	61	166	104	45	21	187
[-1,-0.5)	117	204	163	83	39	247
[-0.5,0)	479	1,089	628	348	207	1,524
[0,0.5)	1,672	1,342	1,697	1,617	1,298	842
[0.5,1)	345	114	238	306	297	27
[1,1.5)	213	13	128	219	247	3
[1.5,2)	102	3	43	215	168	0
[2,2.5)	54	0	18	123	173	0
[2.5,3)	17	0	5	72	113	0
[3,3.5)	7	0	2	41	117	0
[3.5,4)	3	0	0	22	100	0
[4,4.5)	1	0	0	25	89	0
[4.5,5)	0	0	0	7	77	0
[5,5.5)	0	0	0	4	49	0

สร้างกราฟ Histogram

เมื่อทราบกลุ่มข้อมูลของค่าความคลาดเคลื่อน (Error)ว่าเกิดขึ้นในช่วงไหนบ้างแล้วนั้น ผู้วิจัยจึงจัดทำกราฟ Histogram ของข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) เพื่อให้เห็นการกระจายตัวของข้อมูลได้ชัดเจนมากขึ้น ประโยชน์ประการสำคัญของการใช้ Histogram คือการใช้เพื่อวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลแล้วตัดสินใจว่า การแจกแจงหรือการกระจายข้อมูลแบบใด เพื่อใช้ตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลแสดงดัง Fig. 4

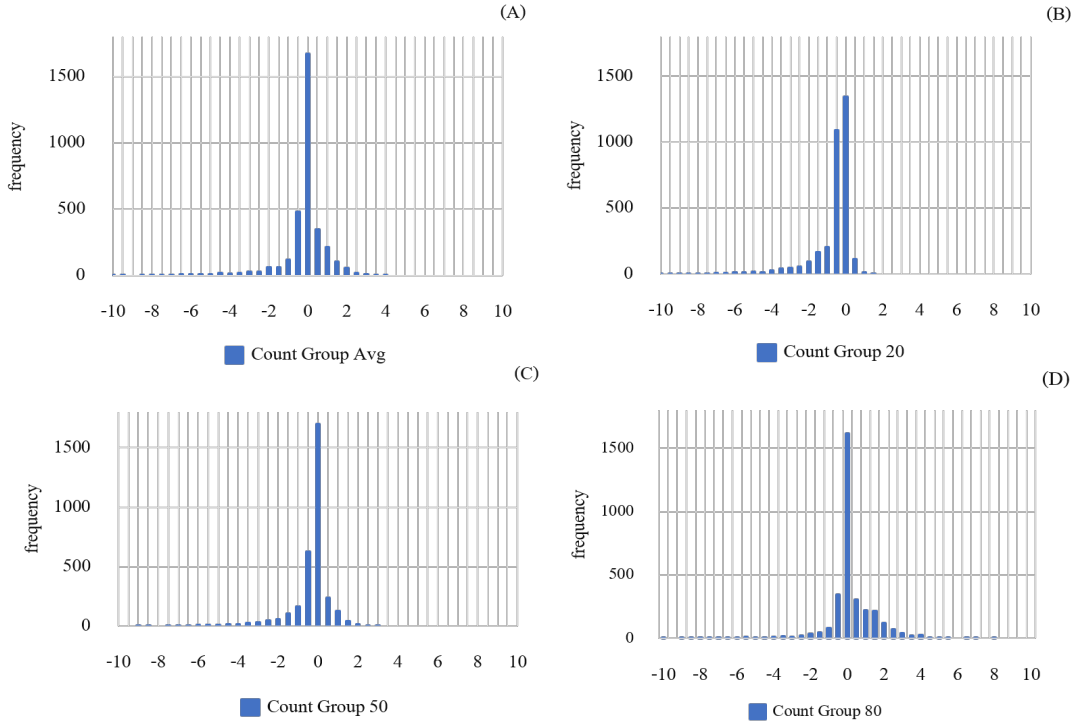


Fig. 4 Histogram Bar of times in rank of error

สร้างโค้งความถี่สะสม Cumulative Curve

จัดทำกราฟความถี่สะสมเพื่อหาความสัมพันธ์ของช่วงค่าความคลาดเคลื่อน (Error) กับความถี่สะสม โดยให้แกน x แทนช่วงความคลาดเคลื่อน (Error) และให้แกน y แทน ความถี่สะสม (จำนวนครั้งที่เกิดค่าความคลาดเคลื่อน)

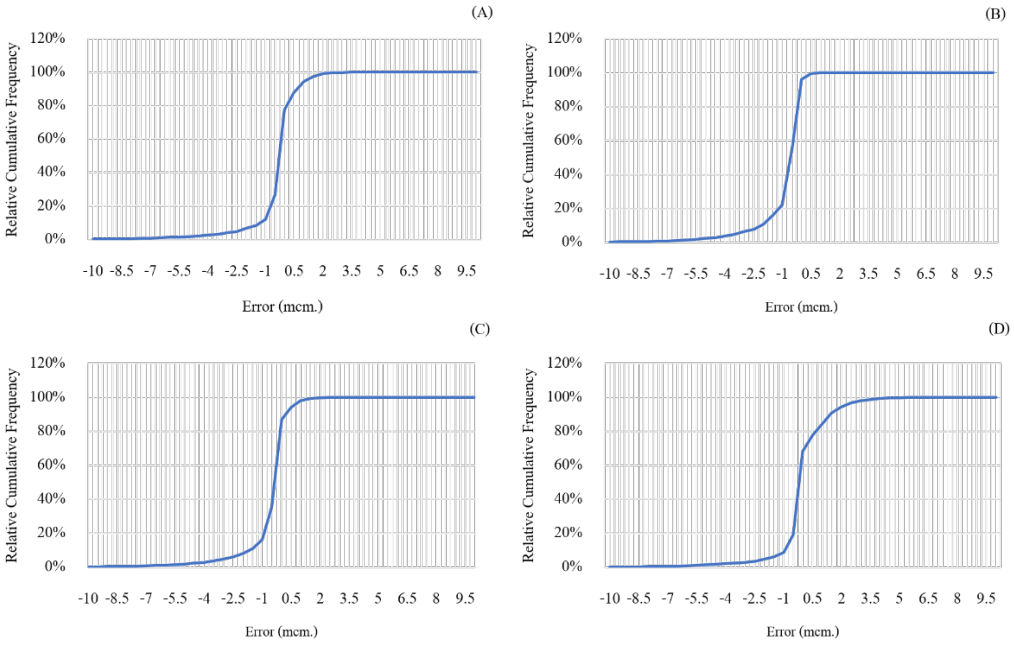


Fig. 5 Cumulative Curve

สร้าง Relative Cumulative Frequency Distribution

เพื่อหาว่าความถี่ของค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้ มีจำนวนมากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับความถี่ของค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Relative Cumulative Frequency in rank of error

Rank of Error	Relative Cumulative Frequency					
	Case Avg	Case percentile 20	Case percentile50	Case percentile80	Case Maximum	Case Minimum
[-5,-4.5)	2%	2%	2%	1%	1%	3%
[-4.5,-4)	2%	3%	2%	2%	1%	3%
[-4,-3.5)	3%	4%	3%	2%	1%	5%
[-3.5,-3)	3%	5%	4%	3%	2%	6%
[-3,-2.5)	4%	6%	5%	3%	2%	7%
[-2.5,-2)	5%	8%	6%	4%	2%	10%
[-2,-1.5)	7%	11%	8%	5%	3%	14%
[-1.5,-1)	8%	16%	11%	6%	4%	20%
[-1,-0.5)	12%	22%	16%	9%	5%	27%
[-0.5,0)	27%	55%	35%	19%	11%	73%
[0,0.5)	77%	96%	87%	68%	51%	99%
[0.5,1)	88%	100%	94%	78%	60%	100%
[1,1.5)	94%	100%	98%	84%	67%	100%
[1.5, 2)	98%	100%	99%	91%	72%	100%
[2,2.5)	99%	100%	100%	95%	78%	100%
[2.5,3)	100%	100%	100%	97%	81%	100%
[3,3.5)	100%	100%	100%	98%	85%	100%
[3.5,4)	100%	100%	100%	99%	88%	100%
[4,4.5)	100%	100%	100%	99%	90%	100%
[4.5,5)	100%	100%	100%	100%	93%	100%
[5,5.5)	100%	100%	100%	100%	94%	100%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิจัย เมื่อนำค่า Error ที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลอย่างละเอียดพบว่า ค่าการทำนายปริมาณน้ำไหลลงอ่าง กรณีเปอร์เซ็นต์ไทลที่ 50 มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด เมื่อเทียบจากข้อมูลจำนวน 9 ปีย้อนหลัง (พ.ศ. 2554–2562) ซึ่งส่วนใหญ่ค่าการทำนายมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าความเป็นจริง (underestimate) ยกเว้นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ.2561 เมื่อวิเคราะห์ความถี่ของการเกิดค่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะพบว่ามี 5 กรณีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.00 – 0.50 mcm ยกเว้นกรณีค่าต่ำสุด จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -0.50 – 0.00 mcm และเมื่อนำข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนของตารางแจกความถี่สะสมสัมพัทธ์ (Relative Cumulative Frequency Distribution) จะพบความเป็นไปได้ ที่ 90 % ที่จะเกิดความคลาดเคลื่อน(Error) ในแต่ละช่วงของ 6 กรณีได้ดังนี้ กรณีค่าเฉลี่ย จะอยู่ในช่วง 2.50–3.00 mcm, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 20 อยู่ในช่วง 1.50–2.00 mcm, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 50 อยู่ในช่วง 2.00–2.50 mcm, กรณีเปอร์เซ็นไทล์ที่ 80 อยู่ในช่วง 3.00–3.50 mcm, กรณีค่าสูงสุด อยู่ในช่วง 5.50–6.00 mcm, และกรณีค่าต่ำสุด อยู่ในช่วง 1.50–2.00 mcm

สรุป

จากผลการวิจัย พบว่า การนำโปรแกรมการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Simulation) มาช่วยในการวางแผนบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ที่มีความจุเกิน 100 ล้าน ลบ.ม.ความแม่นยำในการคาดคะเนข้อมูลปริมาณน้ำไหลลงอ่างมีความสำคัญอย่างมากที่จะได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง โดยควรเลือกนำค่าข้อมูลที่มีแนวโน้มใกล้เคียงที่สุดและมีความเสี่ยงต่ำที่สุดในการนำค่าข้อมูลมาใช้ ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องนำมาร่วมในการพิจารณาข้อมูลในการนำเข้าข้อมูลจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ เช่น กิจกรรมการใช้น้ำของอ่างเก็บน้ำ สภาพอากาศ ณ เวลานั้น ซึ่งควรมีการติดตามเพิ่มเติมเกี่ยวกับสภาพอากาศจากทางกรมอุตุนิยมวิทยา มาประกอบการตัดสินใจ จะเห็นได้จาก ปี พ.ศ. 2554 ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายสูง เนื่องจากอิทธิพลของปรากฏการณ์ลานีญา ส่งผลให้เกิดฝนตกหนักและทำให้เกิดอุทกภัยใหญ่ในประเทศไทย (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ. 2554)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ แนวคิดในการดำเนินงานวิจัยอย่างดียิ่ง และขอกราบขอบพระคุณ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาขุนด่านปราการชล กรมชลประทาน ในความอนุเคราะห์สนับสนุนข้อมูลในการทำโครงการวิทยานิพนธ์

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2552. โครงการพัฒนาแหล่งน้ำอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. กรุงเทพมหานคร : กลุ่มกิจกรรมพิเศษ กรมชลประทาน.

กรมชลประทาน. 2554. คู่มือการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ. กรุงเทพมหานคร : กระบวนการบริหารจัดการน้ำ กรมชลประทาน.

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2562. พายุหมุนเขตร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ครอบคลุมในปี พ.ศ. 2561. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์ภูมิอากาศ กองพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา.

สุวัฒน์ ศรีวิทยารักษ์. 2540. สถิติเบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 8. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.

สถาบันสารสนเทศสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์กรมหาชน). 2554 บันทึกเหตุการณ์มหาอุทกภัยปี 2554. https://tiwrm.hii.or.th/current/flood54.html/, 10 กุมภาพันธ์ 2564.

ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้าง กรณีศึกษา สำนักก่อสร้างทาง กรมทางหลวงชนบท

The factors affecting delays of construction projects: A case study of Bureau of road construction, department of Rural Roads

ก่อเกียรติ ศานติชาติศักดิ์*, วัชรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ

Korkiat Santichatsak*, Watcharin Witayakul, Deeboon Methakullachat

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: taam_noochang2@outlook.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้จัดทำขึ้นเพื่อระบุปัจจัยที่ทำให้การดำเนินงานโครงการก่อสร้างของกรมทางหลวงชนบท เกิดความล่าช้าในงานก่อสร้าง การวิเคราะห์สาเหตุและระดับความเสี่ยงดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการศึกษาจำนวน 122 คน รวมทั้งนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ในการทดสอบสมมติฐานวิเคราะห์ด้วยสถิติ Independent-Samples T Test โดยมีค่าเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ค่าความคาดเคลื่อน 0.05 จากการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการก่อสร้าง ประกอบด้วย บุคลากร การเงิน กระบวนการก่อสร้าง เครื่องมือเครื่องจักร ด้านวัสดุ และด้านอื่นๆ ทั้งหมด 6 ด้าน 68 ปัจจัย โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในงานก่อสร้าง 3 ลำดับแรก คือ 1. ด้านอื่นๆ 2. ด้านกระบวนการก่อสร้าง 3. ด้านการเงิน โดยในการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความคิดเห็นระหว่างกลุ่มผู้ควบคุมงาน กับกลุ่มผู้รับเหมา พบว่ามี 6 ปัจจัย จาก 68 ปัจจัย ที่มีความคิดเห็นความแตกต่างของคะแนนอย่างมีนัยยะสำคัญ ปัจจัยทั้ง 6 ด้าน มีระดับค่าดัชนีความเสี่ยงในระดับปานกลาง โดยปัจจัยด้านกระบวนการก่อสร้าง มีความถี่ของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้า (Frequency) มากที่สุด และด้านปัจจัยอื่นๆมีความรุนแรงของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้า (Impact level) มากที่สุด

คำสำคัญ: กรมทางหลวงชนบท, การบริหารความเสี่ยง, ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้าง, SPSS

Abstract

This research considered on the factors of construction delays on the Department of Rural Roads projects. The risk management analysis was applied by using 122 questionnaires as a tool. The data were analyzed for statistical results using the SPSS program for Independent-Samples T Test function with 95% of confidence or 0.05 expectation. The 6 factors affecting construction delays on transport sector are personal, financial, construction process, tools and machines, materials and other factors. According to the results, the first 3 factors affected on construction delays were other factors, construction process and financial, respectively. The opinion between staffs of employer (DRR) and staffs of contractors were difference significant score only 6 out of 68 factors. The 6 factors had a medium level of risk index. Construction process factors have the highest frequency. And other factors have the highest impact level.

Keywords: department of rural roads, factors of construction delays, risk management, SPSS

คำนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งเป็นสิ่งสำคัญบทบาทในการส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ในการพัฒนาแผนพัฒนาเครือข่ายของเส้นทางคมนาคมมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนเครือข่ายโลจิสติกส์ระดับประเทศ สนับสนุนเศรษฐกิจอาเซียนและปรับปรุงและบำรุงรักษาเครือข่ายงานทาง (อภิชัย, 2543; Thapanont et al, 2018) โดยเฉพาะการขนส่งทางถนนจะได้รับความนิยม เนื่องจากผู้คนสามารถเข้าถึงบริการ เหมาะสำหรับการขนส่งระยะไม่ไกล และมีค่าใช้จ่ายถูกกว่าระบบอื่น (อภิชัย, 2543) การปรับปรุงและการก่อสร้างถนนจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สนับสนุนต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ หน่วยราชการที่รับผิดชอบการสร้างงานทางโดยตรงประกอบด้วย 3 หน่วยงานหลัก ได้แก่ กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และหน่วยงานเทศบาล ซึ่งจะแบ่งหน้าที่และความรับผิดชอบกันตามลักษณะของการใช้งานของเส้นทางนั้นๆ (วรพันธ์, 2549)

โครงการก่อสร้างถนนจะใช้งบประมาณและเวลาในการก่อสร้างมากอีกทั้งยังเป็นการสร้างโอกาสเส้นทางการค้าใหม่ๆ และอาจส่งผลกระทบต่อประชาชนผู้ใช้ถนนต้องเสียเวลาสูญเสียทั้งทรัพยากรและโอกาสทางธุรกิจหากโครงการก่อสร้างเกิดความล่าช้า (อภิชัย, 2534; ทัต, 2555; เทพ และกองกูณฑ์, 2556) ผู้วิจัยจึงมีความสนใจถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างถนนภายใต้โครงการก่อสร้างของสำนักก่อสร้างทาง กรมทางหลวงชนบท โดยดำเนินการศึกษาถึงปัจจัย ความถี่และความรุนแรงของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในด้านต่างๆ โดยพิจารณาจากมุมมองของบุคลากรที่เป็นผู้ควบคุมงาน และผู้รับเหมางานก่อสร้าง เพื่อพัฒนาและแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดในอนาคตในการบริหารจัดการ และเสนอเป็นแนวทางแก้ไขเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความล่าช้าในอนาคตต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยล่าช้าและวิเคราะห์ระดับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในงานก่อสร้างของกรมทางหลวงชนบทที่มีการก่อสร้าง 36 โครงการในช่วง พ.ศ. 2559–2563โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ปัจจัยด้านลักษณะส่วนบุคคลทั่วไป ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา ตำแหน่ง และประสบการณ์การทำงาน ส่วนที่ 2 สอบถามปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความล่าช้าในการก่อสร้างของโครงการที่อยู่ภายใต้การดำเนินการก่อสร้างของกรมทางหลวงชนบท แบ่งออกเป็น 6 ด้าน ได้แก่ ด้านบุคลากร, ด้านการเงิน, ด้านกระบวนการก่อสร้าง, ด้านเครื่องมือ-เครื่องจักร, ด้านวัสดุก่อสร้าง และด้านปัจจัยอื่นๆ ซึ่งคัดเลือกให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างงานทางจากการศึกษาของ มารุต (2549), สุธนัย (2551), ทัต (2555) และ เทพ (2555)

ลักษณะแบบสอบถาม ให้ผู้ตอบแบสอบถามประเมินความถี่ของปัจจัยที่ทำให้ให้เกิดความล่าช้า (Frequency) 5 ระดับได้แก่ ระดับ 1 เกิดเหตุการณ์น้อยมากหรือไม่เกิดเหตุการณ์เลย, ระดับ 2 เกิดเหตุการณ์น้อยหรือนานๆ ถึงเกิดปัญหาในบางโครงการ , ระดับ 3 เกิดเหตุการณ์ปานกลางหรือเกิดขึ้นในบางโครงการ, ระดับ 4 เกิดเหตุการณ์มากหรือแทบจะทุกโครงการ, ระดับ 5 เกิดเหตุการณ์มากที่สุดหรือพบในทุกโครงการ และประเมินความรุนแรงของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้า (Impact level) 5 ระดับได้แก่ ระดับ 1 ส่งผลกระทบทำให้โครงการล่าช้าน้อยมาก, ระดับ 2 ส่งผลกระทบทำให้โครงการล่าช้าน้อย, ระดับ 3 ส่งผลกระทบทำให้โครงการล่าช้าปานกลาง, ระดับ 4 ส่งผลกระทบทำให้โครงการล่าช้ามาก, ระดับ 5 ส่งผลกระทบทำให้โครงการล่าช้ามากที่สุด

โดยการดำเนินการศึกษาตามกระบวนการบริหารความเสี่ยง ซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องมือทางกลยุทธ์ที่สำคัญในการสนับสนุนให้บรรลุตามแผนยุทธศาสตร์ มีส่วนช่วยในการลดหรือหลีกเลี่ยงปัจจัยเสี่ยงที่อาจสร้างความเสียหายหรือความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นกับองค์กรหรืองานก่อสร้าง การบริหารความเสี่ยงจึงมีส่วนในการสร้างความเชื่อมั่นให้แก่องค์กรว่าสามารถดำเนินงานได้ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ได้ (กรมทางหลวง, 2559) โดยกำหนดหลักเกณฑ์การพิจารณาความเสี่ยงแสดงดัง Fig. 1 และ Table 1

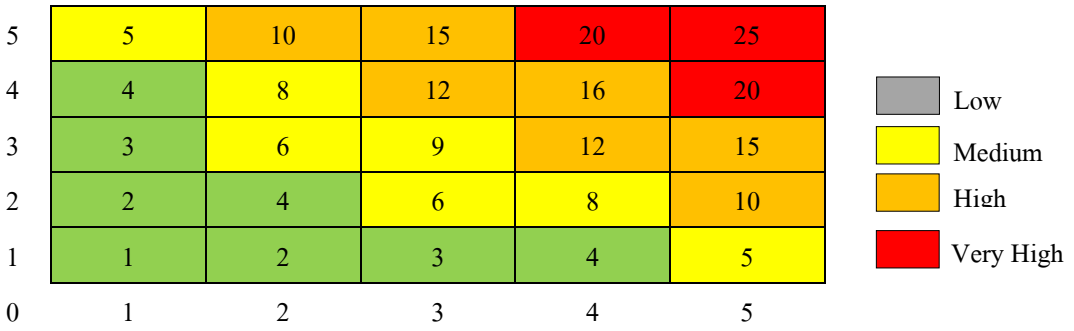


Fig. 1 Risk Assessment Matrix of Construction Delays

Table 1 Risk Management Index of Construction Delays

Index	Risk Management	Meaning
1–4	Low	Acceptable risk, but it should be additional risk control
5–9	Medium	Acceptable risk, but it needs additional risk control to prevent high risk.
10–16	High	Cannot acceptable risk, it need progress risk control to reduce risk management.
17–25	Very High	Cannot acceptable risk, it urgent to quantify progress risk control to reduce risk management.

การเก็บข้อมูล ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลวิจัย 2 ประเภท คือข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เป็นข้อมูลเชิงสำรวจการรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถาม โดยนำแบบสอบถามแจกให้กับผู้ควบคุมงาน และผู้รับเหมางานก่อสร้าง และข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) เป็นข้อมูลที่รวบรวมจากการทบทวนวรรณกรรมทั้งในประเทศและต่างประเทศ เอกสารทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ประกอบในการกำหนดกรอบความคิดในการวิจัยครั้งนี้

การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง ต้องมีการกำหนดประชากรให้เหมาะสม จำนวนกลุ่มตัวอย่างนั้นส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่างจึงต้องมีกระบวนการคัดสรรกลุ่มตัวอย่าง เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือและมีความถูกต้อง (มารยาท และปราณี, 2558) ในการศึกษานี้จะดำเนินการสุ่มกลุ่มตัวอย่างตามการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างด้วยตารางสำเร็จรูปของเครจซี่และเมอร์แกน เนื่องจากตารางสำเร็จรูปของเครจซี่และเมอร์แกนเป็นตารางสำเร็จรูปที่นิยมใช้กันในงานวิจัยเชิงสำรวจ และตารางนี้ใช้ในการประมาณค่าสัดส่วนของประชากรเช่นเดียวกัน และกำหนดให้สัดส่วนของลักษณะที่สนใจในประชากร เท่ากับ 0.05 ระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 5 เปอร์เซ็นต์ และระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างกับประชากรที่มีขนาดเล็กได้ ตั้งแต่ 10 คน ขึ้นไป (มารยาท และปราณี, 2553; ธานินทร์, 2563) โดยกลุ่มตัวอย่างคัดเลือก

ด้วยตารางสำเร็จรูปของเครจซี่และเมอร์แกน จากผู้ควบคุมงานของกรมทางหลวงชนบท จำนวน 86 คน และผู้รับเหมางานก่อสร้าง จำนวน 36 คน รวมเป็น 122 คน

ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความล่าช้าในการก่อสร้างของโครงการที่อยู่ภายใต้การดำเนินการก่อสร้างของกรมทางหลวงชนบท แบ่งออกเป็น 6 ด้าน ทั้งหมด 68 ปัจจัย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ด้านบุคลากร มี 17 ปัจจัย ได้แก่ ขาดประสบการณ์ในการควบคุมงาน, ออกแบบผิดพลาดไม่คำนึงถึงการก่อสร้างจริงหรือไม่ได้มาตรฐาน, อ่านแบบผิดพลาด, การสื่อสารผิดพลาดระหว่างผู้คุมงานและผู้ปฏิบัติงาน, ผู้คุมงาน/ผู้รับจ้างไม่สามารถแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าได้, คนงานไม่มีประสบการณ์หรือด้อยฝีมือในการทำงาน, เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง, หยุดงานเนื่องจากสาเหตุด้านความปลอดภัย, ไม่มีแรงจูงใจในการทำงาน, คณะกรรมการตรวจการจ้างมีความเห็นไม่ตรงกัน, แรงงานนัดหยุดงานหรือทิ้งงาน, แรงงานหยุดงานเนื่องจากช่วงเทศกาล, ขาดแคลนแรงงานเนื่องจากฤดูเกษตรกรรม, ไม่ทำงานล่วงเวลา, ผู้ควบคุมละเลยการปฏิบัติหน้าที่, ผู้ประมาณราคาทำรายการขัดแย้งกับแบบ และความไม่สามัคคีในกลุ่มแรงงานหรือผู้รับเหมา

2. ด้านการเงิน มี 10 ปัจจัย ได้แก่ ขาดสภาพคล่องทางการเงิน, เบิกจ่ายล่าช้า, ราคากลางกับแบบก่อสร้างขัดแย้ง, การใช้เงินของผู้รับจ้างไม่เป็นไปตามแผนหรือใช้ผิดประเภท, การอนุมัติวงเงินจากแหล่งกู้, การแข่งขันเรื่องราคาจากผู้จ้างเหมา, ราคาค่าก่อสร้างต่ำเกินจริง, ค่าเงินบาทอ่อนหรือแข็งตัวมากเกินไป, อัตราราคาน้ำมันที่ผันผวน และการรับค่างวดล่าช้า (งานเสร็จไม่ทันกำหนด/มีการแก้ไขงาน)

3. ด้านกระบวนการก่อสร้าง มี 15 ปัจจัย ได้แก่ ใช้เทคโนโลยีก่อสร้างไม่เหมาะสม, การวางแผนด้านเวลาไม่เหมาะสม, การวางแผนจัดซื้อวัสดุไม่เหมาะสม, สัญญาจ้างขัดแย้งกับกฎหมาย, วางแผนการก่อสร้างโดยไม่ตรวจสอบสภาพจริง, การรอผลสำรวจชั้นดิน, การเปลี่ยนแปลงสัญญา (เพิ่ม-ลดงาน), แบบก่อสร้างไม่ชัดเจน, ก่อสร้างผิดหรือข้ามขั้นตอน, รอผลทดสอบทางด้านวิศวกรรม, การวางแผนจัดส่งวัสดุไม่เหมาะสม, การวางแผนด้านแรงงานไม่เหมาะสม, การวางแผนประสานโครงการไม่เหมาะสม, การวางแผนใช้เครื่องจักรไม่เหมาะสม และการกำหนดจุดก่อสร้างไม่ตรงกับแบบแปลน

4. ด้านเครื่องมือและเครื่องจักร มี 6 ปัจจัย ได้แก่ เครื่องจักรขาดการบำรุงเสียบ่อย, การใช้เครื่องมือที่ไม่เหมาะสม, รอคิวการเช่า/ใช้เครื่องจักร, ไม่สามารถนำเครื่องจักรเข้าพื้นที่ทำงานได้, ไม่สามารถทำงานในช่วงที่ประชาชนพักผ่อน และขาดอะไหล่ในการซ่อมบำรุงเนื่องจากขาดตลาด

5. ด้านวัสดุก่อสร้าง มี 9 ปัจจัย ได้แก่ สถานที่ก่อสร้างอยู่ไกลจากแหล่งวัสดุ, วัสดุอุปกรณ์ขาดตลาด, การใช้วัสดุที่ไม่มีคุณภาพ, ราคาวัสดุผันผวนตามเศรษฐกิจ, การแย่งวัตถุดิบกับผู้รับเหมาในพื้นที่, ห่างไกลจากแหล่งสาธารณูปโภค, ไม่สามารถขนส่งผ่านรถบรรทุกขนาดใหญ่ได้, การขออนุมัติวัสดุเทียบเท่าได้ยาก และการขออนุมัติการเปลี่ยนแปลงวัสดุ

6. ด้านอื่นๆ มี 11 ปัจจัย ได้แก่ ภัยธรรมชาติ, สภาพภูมิอากาศไม่เอื้ออำนวย, ประสบปัญหาในการโยกย้ายระบบสาธารณูปโภค, ภูมิประเทศไม่เหมาะกับการทำงาน, ความล่าช้าด้านการเมืองท้องถิ่น, ขอบเขตงานไม่ชัดเจน, การส่งมอบพื้นที่ล่าช้า, ผู้รับจ้างเข้าดำเนินการในพื้นที่ล่าช้า, เกิดปัญหาการร้องเรียนจากประชนในท้องที่, โจรชุกชุม และเกิดปัญหาเศรษฐกิจ

ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานก่อสร้างโครงการของสำนักก่อสร้างทาง กรมทางหลวงชนบท ด้วยแบบสอบถามทั้งสิ้น 122 ชุด ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลจากส่ผู้ควบคุมงานของกรมทางหลวงชนบท และผู้รับเหมางานก่อสร้างในโครงการของกรมทางหลวงนบท ในช่วงการก่อสร้าง พ.ศ. 2559–2563 โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปจากแบบสอบถาม

ผู้ตอบแบบสอบถามมีจำนวนทั้งสิ้น 122 คน แบ่งเป็น ผู้ควบคุมงานจำนวน 86 คน คิดเป็น 70.49 % และผู้รับเหมาก่อสร้างจำนวน 36 คน คิดเป็น 29.51 % ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชายมีจำนวน 101 คนคิดเป็น 82.79% และเป็นเพศหญิงมีจำนวน 21 คนคิดเป็น 17.21%

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 31 – 40 ปี จำนวน 41 คน คิดเป็น 33.61% รองลงมามีอายุ 50 – 60 ปี จำนวน 26 คน คิดเป็น 21.31% ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีระดับการศึกษาในระดับปริญญาตรี จำนวน 53 คน คิดเป็น 43.44% รองลงมามีระดับการศึกษาในระดับปริญญาโท มีจำนวน 35 คน คิดเป็น 28.69% ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นตำแหน่งวิศวกร จำนวน 98 คน คิดเป็น 80.33% และเป็นตำแหน่งนายช่าง จำนวน 24 คน คิดเป็น 19.67%

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีประสบการทำงานในโครงการก่อสร้างงานทางระหว่าง 0 – 5 ปี จำนวน 47 คน คิดเป็น 38.52%, รองลงมา 6 – 10 ปี จำนวน 31 คน คิดเป็น 25.41%, 11 – 15 ปี จำนวน 20 คน คิดเป็น 16.39%, 16 – 20 ปี จำนวน 11 คน คิดเป็น 9.02% และมากกว่า 20 ปี มีจำนวน 13 คน คิดเป็น 10.66%

2. การวิเคราะห์ปัจจัยความความล่าช้าในการก่อสร้างของกรมทางหลวงชนบท

การวิเคราะห์ข้อมูล จำแนกออกเป็น 2 ส่วน คือ ความคิดเห็นร่วมกันของผู้ตอบแบบสอบถาม แบบค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และ ความแตกต่างในความคิดเห็นของกลุ่มผู้ควบคุมงานและกลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง โดยการวิเคราะห์ Independent-Samples T-Test

2.1 ความคิดเห็นร่วมกันของผู้ตอบแบบสอบถาม แบบค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)

Table 2 The Results of Risk Management Index of Construction Delays on the Department of Rural Roads Projects

Factors	Frequency		Impact level		Risk Management Index	Weight %
	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.		
Personnel	2.49	1.03	2.76	1.14	6.86	16.04
Finance	2.63	1.05	2.83	1.18	7.43	17.38
Construction Process	2.69	1.13	2.94	1.16	7.92	18.52
Machines and Tools	2.42	1.06	2.99	1.21	7.24	16.92
Materials	2.15	0.83	2.47	1.01	5.31	12.43
Other factors	2.64	1.13	3.03	1.12	8.00	18.71
Average	2.50	1.04	2.84	1.14	-	-
Total	-	-	-	-	42.76	100.00

ความคิดเห็นร่วมกันของผู้ตอบแบบสอบถามของปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าในการก่อสร้างงานทาง ภายใต้โครงการกรมทางหลวงชนบท แสดงดัง Table 2 พบว่า ความสำคัญของแต่ละปัจจัย ได้แก่ ด้านปัจจัยอื่นๆ, ด้านกระบวนการก่อสร้าง, ด้านการเงิน, ด้านเครื่องมือเครื่องจักร, ด้านบุคลากรและด้านวัสดุ ตามลำดับ และปัจจัยทั้ง 6 ด้าน มีระดับค่าดัชนีความเสี่ยงในระดับปานกลาง โดยปัจจัยด้านกระบวนการก่อสร้าง มีความถี่ของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้า (Frequency) มากที่สุด และด้านปัจจัยอื่นๆมีความรุนแรงของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้า (Impact level) มากที่สุด

2.2 การวิเคราะห์ความแตกต่างในความคิดเห็นของกลุ่มผู้ควบคุมงานและกลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง

โดยการวิเคราะห์ความแตกต่างในความคิดเห็นของกลุ่มผู้ควบคุมงานและกลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง ด้วย Independent-Samples T-Test ในการจำแนกเป็น ระดับความถี่ และ ระดับผลกระทบ ของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้ากับโครงการก่อสร้างถนนของกรมทางหลวงชนบท ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลความคิดเห็นของผู้ตอบระหว่างกลุ่มผู้ควบคุมงาน กับกลุ่มผู้รับเหมา ที่มีความคิดเห็นร่วมกันของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างงานทางทั้ง 68 ปัจจัย จาก 6 ด้าน โดยกำหนดให้ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) = 0.05 โดยตั้งข้อสมมติฐาน ดังนี้

H0 = ความคิดเห็นของกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามไม่แตกต่างกัน

H1 = ความคิดเห็นของกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามแตกต่างกัน

ตรวจสอบสมมติฐานของการวิจัยจากผลการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากค่า Significant หรือ Sig. โดยยอมรับสมมติฐาน เมื่อค่า Sig. ≥ 0.05 และ ปฏิเสธสมมติฐาน เมื่อค่า Sig. < 0.05

Table 3 The Results of Independent-Samples T Test

Factors	T-Test (Frequency)			T-Test (Impact level)		
	T	Sig.	Hypothesis	T	Sig.	Hypothesis
The contract contradicts the law	3.211	0.002	Different	1.624	0.109	Not Different
Waiting for soil survey results	2.987	0.004	Different	-0.026	0.980	Not Different
Improper labor planning	2.270	0.026	Different	0.241	0.810	Not Different
Planning for project coordination is inappropriate	2.001	0.049	Different	1.886	0.063	Not Different
Improper machines and tools planning	1.644	0.104	Not Different	2.149	0.034	Different
The designation of the construction point does not match the plan	2.251	0.027	Different	1.609	0.112	Not Different

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงดัง Table 3 พบว่ามีเพียง 6 ปัจจัย ที่กลุ่มผู้ควบคุมงาน กับกลุ่มผู้รับเหมามีความคิดเห็นต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ คือ สัญญาจ้างขัดแย้งกับกฎหมาย, การรอผลสำรวจชั้นดิน, การวางแผนด้านแรงงานไม่เหมาะสม, การวางแผนประสานโครงการไม่เหมาะสม, การวางแผนใช้เครื่องจักรไม่เหมาะสม และการกำหนดจุดก่อสร้างไม่ตรงกับแบบแปลน ซึ่งทั้ง 6 ปัจจัยที่กล่าวมาพบว่าคิดเห็นของกลุ่มผู้ควบคุมงาน มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง ทั้งหมด

สรุป

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาปัจจัยมีผลต่อความล่าช้าในการก่อสร้างงานทาง ของสำนักก่อสร้างทาง กรมทางหลวงชนบท ทั้งความถี่และความรุนแรง รวมถึงความแตกต่างในความคิดเห็นของกลุ่มผู้ควบคุมงานและ

กลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง โดยงานวิจัยครั้งนี้ได้เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามทั้งสิ้น 122 ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลจากผู้ควบคุมงานของกรมทางหลวงชนบท และผู้รับเหมางานก่อสร้างในโครงการของสำนักก่อสร้างทาง กรมทางหลวงชนบท กลุ่มตัวอย่างคัดเลือกโดยวิธีตารางสำเร็จรูปของเครจซี่และเมอร์แกน มีผู้เชี่ยวชาญจากกรมทางหลวงชนบท เป็นผู้ตรวจสอบแบบสอบถามก่อนการดำเนินการ ซึ่งผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. มุมมองของผู้ตอบแบบสอบถามเห็นพ้องกันว่า ปัจจัยด้านบุคลากร, ด้านการเงิน, ด้านกระบวนการก่อสร้าง, ด้านเครื่องมือเครื่องจักร, ด้านวัสดุ และด้านปัจจัยอื่นๆ มีผลต่อความล่าช้าในกการก่อสร้างงานทาง เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของงานก่อสร้างถนนในส่วนงานต่างๆ ในประเทศไทย (มารุต, 2549; สุธนัย, 2551; เทพ, 2555; ทัต, 2555; เชาวฤทธิ์, 2556) แต่การศึกษาดังกล่าวเมื่อ 10 – 20 ปีที่แล้วจะมีระดับค่าดัชนีความเสี่ยงในระดับสูง ซึ่งจะต่างกับการศึกษานี้ที่อยู่ในระดับปานกลาง

2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้า ทั้ง 68 ปัจจัย จาก 6 ด้าน มีปัจจัยที่มีความถี่เกิดขึ้นในงานก่อสร้างงานทาง (Frequency) 5 ลำดับแรก ได้แก่ เกิดปัญหาการร้องเรียนจากประชนในท้องที่ 3.70, การส่งมอบพื้นที่ล่าช้า 3.46, ประสบปัญหาในการโยกย้ายระบบสาธารณูปโภค 3.32, การเปลี่ยนแปลงสัญญา (เพิ่ม-ลดงาน) 3.27 และผู้ประมาณราคาทำรายการขัดแย้งกับแบบ 3.20 ตามลำดับ

3. ปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้า ทั้ง 68 ปัจจัย จาก 6 ด้าน มีปัจจัยที่มีความรุนแรงทำให้เกิดความล่าช้า (Impact level) 5 ลำดับแรก ได้แก่ การส่งมอบพื้นที่ล่าช้า 3.85, ผู้รับจ้างเข้าดำเนินการในพื้นที่ล่าช้า 3.66, ขาดสภาพคล่องทางการเงิน 3.66, ประสบปัญหาในการโยกย้ายระบบสาธารณูปโภค 3.62 และออกแบบผิดพลาดโดยไม่คำนึงถึงการก่อสร้างจริงหรือไม่ได้มาตรฐาน 3.52 ตามลำดับ

4. ปัจจัยที่มีดัชนีความเสี่ยง (Risk Management Index) ที่เกิดจากความถี่ (Frequency) และความรุนแรง (Impact level) ได้แก่ ด้านปัจจัยอื่นๆ, ด้านกระบวนการก่อสร้าง, ด้านการเงิน, ด้านเครื่องมือเครื่องจักร, ด้านบุคลากร และด้านวัสดุตามลำดับ ซึ่งการให้ลำดับความสำคัญใน 3 ปัจจัยแรกนั้น มีความคล้ายคลึงกับผลการวิจัยของทัต (2555) และ เทพ และคณะ (2555) แต่จะต่างกับงานศึกษาของเชาวฤทธิ์ ขาวใบไม้ (เชาวฤทธิ์, 2556) ที่มีดัชนีความเสี่ยงด้านบุคลากรมากกว่าด้านอื่นๆ

5. ในการศึกษาเปรียบเทียบการระหว่าง 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผู้ควบคุมงานและกลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง ทั้ง 68 ปัจจัย จาก 6 ด้าน พบว่าแต่ละปัจจัยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ ยกเว้น 6 ปัจจัย ได้แก่ สัญญาจ้างขัดแย้งกับกฎหมาย, การรอผลสำรวจชั้นดิน, การวางแผนด้านแรงงานไม่เหมาะสม, การวางแผนประสานโครงการไม่เหมาะสม, การวางแผนใช้เครื่องจักรไม่เหมาะสม และการกำหนดจุดก่อสร้างไม่ตรงกับแบบแปลน

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณกรมทางหลวงชนบท ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาวิจัย รวมไปถึงบุคลากรของหน่วยงาน ที่ได้ให้ข้อมูลและตอบแบบสอบถามอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง, 2559. รายงาน แผนบริหารความเสี่ยงกรมทางหลวง พ.ศ. 2560–2564, การศึกษาจัดทำแผนยุทธศาสตร์กรมทางหลวง พ.ศ. 2560 – 2564 และแผนการบริหารความเสี่ยงในการบริหารจัดการกรมทางหลวง, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

เทพ บุญตะโก, วีระศักดิ์ ละอองจันทร์, กองกูณฑ์ โตชัยวัฒน์, 2555. ความล่าช้าในงานก่อสร้างสะพานของกรมทางหลวง, บทความวิจัย, Researchgate.

ทัต นาควิเชียร, 2555. ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตปริมณฑล, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ธานินทร์ ศิลป์จารุ, 2563. การวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS และ AMOS, พิมพ์ครั้งที่ 18, ห้างหุ้นส่วนสามัญบิสซิเนสอาร์แอนด์ดี, กรุงเทพฯ.

วรพันธ์ แก้ววิทยาภรณ์, 2549. ระบบการประเมินความก้าวหน้าโครงการสำหรับงานก่อสร้างถนน, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มารุต ชาวสวน. 2549. การศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสระบุรี, การศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องปริญญาวิศวกรรมศาสมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมและการบริหารก่อสร้าง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

มารยาท โยทองยศ, ปราณี สวัสดิสรรพ์. 2558. การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างเพื่อการวิจัย, ศูนย์บริการวิชาการ, สถาบันส่งเสริมการวิจัยและพัฒนานวัตกรรม.

สุธนัย วงศ์สารภี. 2551. การศึกษาปัจจัยที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดความล่าช้ากับงานก่อสร้างถนนของกรมทางหลวง, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมและการบริหารก่อสร้าง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อภิชัย ธีระรังสิกุล, 2534. การศึกษาสาเหตุความล่าช้าของการก่อสร้างถนนของกรุงเทพมหานคร,วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Thapanont, P., Santi, C., Pruethipong, X. 2018. Causes of delay on highway construction projects in Thailand, MATEC Web of Conferences 192: 02014.

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบริหารโครงการก่อสร้างในหน่วยงานราชการ

Analysis of factors affecting the management of construction projects in government agencies

อรรถชัย ขำเจริญ, วัชรินทร์ วิทยกุล*

Auttachai Kamcharoen, Watcharin Wittayakul*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of civil engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบริหารโครงการก่อสร้างทางหลวงและสะพานของกรมทางหลวง โดยการจัดทำแบบสอบถามและรวบรวมข้อมูลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญภายใต้สังกัดหน่วยงานฯ แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลภายใต้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ซึ่ง AHP นั้นจะเป็นการนำข้อมูลเชิงปริมาณมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันเพื่อหาอัตราส่วนความสอดคล้องและค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้เชิญผู้เชี่ยวชาญด้านการวางแผน การเงิน และด้านวิศวกรรม มาช่วยจัดลำดับความสำคัญและหาปัจจัยที่อาจมีผลกระทบ โดยกำหนดไว้เป็น 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงวางแผนงบประมาณก่อสร้าง ช่วงดำเนินงานของโครงการ และช่วงติดตามผลหลังโครงการ ผลการวิเคราะห์สรุปปัจจัยสำคัญของแต่ละช่วงเวลามีดังนี้ (1) แผนงบประมาณก่อสร้าง (2) การวางแผนงานการก่อสร้าง และ (3) ความคุ้มค่าสอดคล้องกับงบประมาณ ตามลำดับช่วงเวลา เมื่อนำปัจจัยสำคัญที่ได้ทั้ง 3 ข้อ มาเปรียบเทียบตลอดระยะเวลาโครงการ ผลสรุปว่าปัจจัยที่สำคัญที่อาจก่อให้เกิดความล่าช้าคือ การวางแผนโครงการก่อสร้างมีคะแนนผลรวมที่ 374.00 คะแนน ค่าน้ำหนักความสำคัญที่ 18.70 และมีเปอร์เซ็นต์ความสำคัญมากที่สุด คือ 43.16 %

คำสำคัญ: การวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น, ผลกระทบต่อการบริหารโครงการ, กรมทางหลวง

Abstract

This research aimed to study factors affecting the management of highway and bridge construction projects of the Department of Highways. By preparing questionnaires and collecting data from experts under the department. The data was then analyzed under the Analytic Hierarchy Process (AHP), where AHP was used to analyze and compare the quantitative data to find the consistency ratio and the weight of significance. Of various factors in this research, experts in financial planning and engineering were invited. Let's help prioritize and find factors that may have an impact. Which is defined as 3 periods: planning period, construction budget Project implementation phase. And the follow-up period after the project. The analysis results summarize the key factors for each period are as follows. (1) Construction budget plan (2) Construction planning and (3) Value for money consistent with budget. Chronological. When comparing all 3 key factors throughout the project period. The results concluded that the major factors that could cause the delay were: Planning a construction project had an overall score of 374.00, a significance weight score of 18.70 and had the highest significance percentage at 43.16%.

Keywords: analytic hierarchy process, department of highways, management

คำนำ

ประเทศไทยได้มีการพัฒนาโครงข่ายทางหลวงเชื่อมต่อระหว่างภูมิภาคมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของประชาชนผู้ใช้ทาง โดยหน่วยงานราชการที่รับผิดชอบเป็นภารกิจหลัก คือ กรมทางหลวง ซึ่งปัจจุบันได้ดำเนินการวางแผนโครงการก่อสร้างอย่างมากมายเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของประชาชนนั้น อาจไม่สามารถตอบสนองได้อย่างสูงสุดเนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาทำให้หน่วยงานราชการที่รับผิดชอบดำเนินการล่าช้า หรือเมื่อดำเนินการแล้วเสร็จอาจไม่ได้คำนึงถึงความคุ้มค่าของเงินที่ลงทุนก่อสร้าง

บทความเสนอผลการศึกษาช่วงเวลาของโครงการฯโดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือการวางแผนงานโครงการฯประจำปีงบประมาณ (ก่อนก่อสร้าง) การดำเนินงานของโครงการ(ระหว่างก่อสร้าง) และการติดตามผลลัพธ์ (หลังดำเนินการ) (ศรยุทธ และวิสิทธิ์. 2545) ซึ่งเป็นการศึกษาปัจจัยในด้านต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อระยะเวลาดำเนินการและศึกษาความคุ้มทุนของโครงการที่ดำเนินการก่อสร้าง แล้วเสร็จ เพื่อให้หน่วยงานราชการได้ทราบตระหนักถึงปัญหาและดำเนินการแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)
2. ซอฟท์แวร์ไมโครซอฟต์ Microsoft Excel, Microsoft word

วิธีการศึกษา

แนวคิดของการวิเคราะห์แบบลำดับชั้นจะเป็นการศึกษาจากการสำรวจข้อมูลเพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลในเชิงปริมาณ ซึ่งผู้ทำการวิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็นเป้าหมาย เกณฑ์ (ช่วงเวลา) และทางเลือก (ปัจจัย) จากนั้นทำการคัดเลือกบุคคลที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านและมีประสบการณ์ไม่ต่ำกว่า 5 ปีคือ ด้านการวางแผน ด้านการเงินและด้านวิศวกรรม รวมจำนวน 20 ท่าน ซึ่งจะทำให้ผู้พิจารณาสามารถเห็นองค์ประกอบของปัญหาอย่างเป็นเหตุเป็นผลในปัจจัยที่พิจารณาทำให้ผลการตัดสินใจมีความถูกต้องรัดกุมมากขึ้น (อภิชาต, 2552)โดยการวิเคราะห์นั้นจะจำแนกชั้นปัญหาเป็นลำดับชั้น ดังแสดงใน Fig. 1

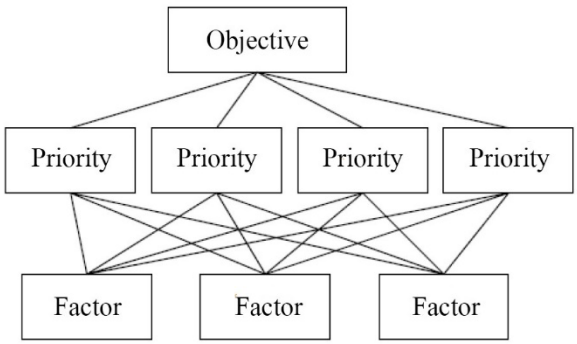


Fig. 1 Classification of decision problems into hierarchies

เมื่อพิจารณาช่วงเวลาและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จึงได้จัดทำแบบสอบถามเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญประเมิน ได้กำหนดช่วงเวลาไว้ 3 ส่วน คือ (1) ด้านการวางแผนโครงการ (2) ด้านการดำเนินงานของโครงการ และ (3) การติดตามผลหลังโครงการ โดยแบบสอบถามจะเป็นการให้ค่าน้ำหนักปัจจัยแรกเปรียบเทียบปัจจัยหลังซึ่งคะแนนจะเป็นตามลำดับความสำคัญหรืออาจให้ความสำคัญเท่ากัน ดังแสดงใน Table 1, Table 2 และ Table 3

Table 1 The priorities of this analysis: Construction project planning (A) Compare with other factors

Order	First Factor	First Factor is important over Latter Factor					Latter Factor is important over First Factor				Latter Factor
		Most	**A lot**	**Moderate**	**Little**	**Equal**	**Little**	**Moderate**	**A lot**	**Most**	
		9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Construction Budget Plan											
1	Budget Plan										Action plan
2	Budget Plan										Power rate
3	Budget Plan										Mechanical
4	Budget Plan										Material
Construction Action Plan											
5	Action plan										Power rate
6	Action plan										Mechanical
7	Action plan										Material
Power rate Plan											
1	Power rate										Mechanical
2	Power rate										Material
Mechanical Plan											
1	Mechanical										Material

Table 2 The priorities of this analysis: project implementation (B) Compare with other factors

Order	First Factor	First Factor is important over Latter Factor					Latter Factor is important over First Factor				Latter Factor
		Most	**A lot**	**Moderate**	**Little**	**Equal**	**Little**	**Moderate**	**A lot**	**Most**	
		9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Construction Planning											
1	Construction Plan										Personnel ,materials and equipment
2	Construction Plan										Construction management
3	Construction Plan										Inspection and commissioning
4	Construction Plan										Progress Report
Personnel recruitment Building materials and equipment											
5	Personnel ,materials and equipment										Construction management
6	Personnel ,materials and equipment										Inspection and commissioning
7	Personnel ,materials and equipment										Progress Report
Construction management											
1	Construction management										Inspection and commissioning
2	Construction management										Progress Report
Inspection and commissioning											
1	Inspection and commissioning										Progress Report

Table 3 The priorities of this analysis: Post-project follow-up (C) Compare with other factors

Order	First Factor	First Factor is important over Latter Factor					Latter Factor is important over First Factor				Latter Factor
		Most	**A lot**	**Moderate**	**Little**	**Equal**	**Little**	**Moderate**	**A lot**	**Most**	
		9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Value in accordance with budget											
1	Value in accordance with budget										Efficient
2	Value in accordance with budget										Effectiveness,benefits ,satisfaction.
3	Value in accordance with budget										Project impact
4	Value in accordance with budget										Service life , Work insurance period
Efficient											
5	Efficient										Effectiveness,benefits ,satisfaction.
6	Efficient										Project impact
7	Efficient										Service life , Work insurance period
Effectiveness, benefits and user satisfaction.											
1	Effectiveness,benefits ,satisfaction.										Project impact
2	Effectiveness,benefits ,satisfaction.										Service life , Work insurance period
Project impact											
1	Project impact										Service life , Work insurance period

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการรวบรวมแบบสอบถามกลุ่มตัวอย่างผู้ตอบแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญด้านวางแผน ด้านการเงิน และด้านวิศวกรรม รวมจำนวน 20 ท่าน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนัก ดัชนีความสอดคล้องและอัตราส่วนความสอดคล้อง ซึ่งในงานวิจัย (Saaty, 1980) กำหนดอัตราส่วนความสอดคล้องมีค่าไม่เกิน 0.1 ที่ขนาดเมทริกซ์ 4 × 4 ขึ้นไปจึงถือว่ามีความน่าเชื่อถือ โดยค่าน้ำหนักและอัตราส่วนความสอดคล้องจากการวิเคราะห์มีดัง Table 4

Table 4 Summation the weight and consistency ratio should be no more than 0.1

Order	Time period	Resulting weight	Consistency ratio
1	Construction project planning	0.1 – 0.53	0.02 – 0.09
2	Project implementation	0.08 – 0.47	0.02 – 0.08
3	Post-project follow-up	0.09 – 0.54	0.03 – 0.09

เมื่อได้อัตราส่วนความสอดคล้องที่ถูกต้องแล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยทางเลขาคณิตเพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยตาม Equation 1

$$a_{ij}^{gp} = \left(a_{ij}^{1} x a_{ij}^{2} x ... x a_{ij}^{h} x ... x a_{ij}^{H}\right)^{1/H} = \left(\prod_{h=1}^{H} a_{ij}^{h}\right)^{1/H} \quad (1)$$

*** a_{ij}^{h} = Priority value of each character in the matrix, priority of the decision maker. (h)

a_{ij}^{gp} = The geometric mean of each significance value in the priority matrix.

H = Total number of personnel conducting comparative research

Table 5 Summation the key factors of construction project management in each period. The most important factor is the bold letter

Construction project planning (A)			
Factor(Choice)	Total	Average	Importance percentage
1. Construction Budget Plan	**350.00**	**17.50**	**40.85**
2. Construction Action Plan	248.00	12.40	28.94
3. Power rate Plan	46.39	2.32	5.41
4. Mechanical Plan	97.09	4.85	11.33
5. Material	115.33	5.77	13.46
	856.81	42.84	100.00
Project implementation (B)			
Factor(Choice)	Total	Average	Importance percentage
1. Construction Planning	**374.00**	**18.70**	**43.16**
2. Personnel ,materials and equipment	122.67	6.13	14.16
3. Construction management	245.87	12.29	28.38
4. Inspection and commissioning	55.07	2.75	6.36
5. Progress Report	68.88	3.44	7.95
	866.48	43.32	100.00
Post-project follow-up (C)			
Factor(Choice)	Total	Average	Importance percentage
1. Value in accordance with budget	**324.00**	**16.20**	**38.04**
2. Efficient	85.43	4.27	10.03
3. Effectiveness, benefits and user satisfaction.	46.70	2.34	5.48
4. Project impact	230.00	11.50	27.00
5. Service life , Work insurance period	165.60	8.28	19.44
	851.73	42.59	100.00

หลังจากแทนค่าในสมการที่ 1 จะได้ค่าน้ำหนักความสำคัญในช่อง Average ตาม Table 5 ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบริหารโครงการก่อสร้างทางหลวงและสะพานของกรมทางหลวงที่สำคัญที่สุดของช่วงเวลาทั้ง 3 ช่วง จึงสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

ช่วงเวลาที่ 1 การวางแผนโครงการก่อสร้าง

ปัจจัยหลักที่สำคัญคือ แผนงบประมาณก่อสร้าง รายละเอียดที่ต้องให้ความสำคัญ (การกำหนดราคากลาง, ค่าใช้จ่ายทั่วไป, ค่าใช้จ่ายพิเศษ) ซึ่งจะเป็นเสมือนปัจจัยควบคุมความเคลื่อนไหวของโครงการฯ โดยที่งบประมาณควรจะกำหนดให้มีความเหมาะสม

ปัจจัยรอง คือ แผนปฏิบัติงานก่อสร้าง รายละเอียดที่ต้องให้ความสำคัญ (การเวนคืนที่ดิน,ประชาพิจารณ์) จะเป็นปัจจัยรองที่เมื่อได้งบประมาณแล้ว จึงนำไปทำประชาพิจารณ์ เพื่อฟังเสียงประชาชนและเวนคืนที่ดินและกำหนดแนวทางดำเนินการก่อสร้างต่อไป

ช่วงเวลาที่ 2 การดำเนินงานของโครงการ

ปัจจัยหลักที่สำคัญคือ การวางแผนงานการก่อสร้าง รายละเอียดที่ต้องให้ความสำคัญ (Bar-chart , S-curve) จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 ช่วงเวลา จะมีความเกี่ยวโยง สอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อมีแผนงบประมาณที่ดีเหมาะสม นำไปดำเนินการประชาพิจารณ์ และเวนคืนที่ดินแล้ว ทำให้ส่วนของการวางแผนงานการก่อสร้างจะสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ต้องมีการชะลอการเข้าพื้นที่ก่อสร้างหรือประชาชนในพื้นที่ประท้วงการก่อสร้างโครงการฯ นั่นคือ หากมีการตั้งเป้าหมายที่ดีงบประมาณ ที่เหมาะสม มีการวางแผนปฏิบัติงานปัญหาต่างๆที่จะเกิดขึ้นน้อยลง หน้าที่ด้านการวางแผนงบประมาณก่อสร้างและหน้าที่การวางแผนปฏิบัติงานก่อสร้าง จึงควรเป็นผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน และมีประสบการณ์สูง จึงสามารถกำหนดเป้าหมายและทิศทางการดำเนินงานได้ถูกต้องตามเป้าหมาย

ปัจจัยรองคือ การบริหารงานก่อสร้าง ซึ่งจะสามารถดำเนินการได้หลังจากวางแผนการก่อสร้างเสร็จแล้ว โดยในส่วนนี้จะเป็นการควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง ควบคุมการทำงานของผู้รับจ้างและควบคุมตลอดการทำงานให้อยู่ในแผนงานตามที่ตั้งเป้าหมายไว้

ปัจจัยหลักที่สำคัญคือ ความคุ้มค่าสอดคล้องกับงบประมาณ ซึ่งเป็นคำตอบที่ผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นตรงกันว่า เมื่อดำเนินงานก่อสร้างเสร็จสิ้นลงแล้ว สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ ให้ทำการประเมินโครงการเหล่านั้นเปรียบเทียบงบประมาณ กับความต้องการในการแก้ไขปัญหาว่าตรงตามความต้องการของประชาชนและมีความคุ้มค่าสอดคล้องกับงบประมาณที่ได้รับหรือไม่ หากใช้งบประมาณที่มากเกินไป แต่ไม่ตอบสนองต่อความต้องการจะถือว่า โครงการนั้นๆไม่คุ้มค่าที่จะดำเนินการ

ปัจจัยรองคือ ผลกระทบโครงการ จะเป็นปัจจัยที่สอดคล้องกับการทำประชาพิจารณ์ ในช่วงเวลาที่ 1 เป็นการตรวจสอบเมื่อดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ ในส่วนของ EIA, สภาพการจราจร, พฤติกรรมบุคคล เนื่องจากบางโครงการมีระยะเวลาก่อสร้างที่ยาวนาน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่และเปลี่ยนพฤติกรรมความคุ้นชินของประชาชนในพื้นที่นั้นๆ

สรุป

Table 6 Shows a comparison of the most important factors for each period. To know the factors affecting the delay in the construction project

Factor (Choice)	Total	Average	Importance percentage
Construction Budget Plan	350.00	17.50	40.85
Construction Planning	**374.00**	**18.70**	**43.16**
Value in accordance with budget	324.00	16.20	38.04

เมื่อสรุปปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบริหารโครงการก่อสร้างทางและสะพานของกรมทางหลวงทั้ง 3 ช่วงเวลานำมาเปรียบเทียบเพื่อหาช่วงเวลาที่ควรให้ความสำคัญมากที่สุดตลอดช่วงโครงการก่อสร้าง จะพบว่าช่วงเวลาที่ 2 การวางแผนโครงการก่อสร้างนั้น มีคะแนนผลรวมที่ 374.00คะแนน ค่าน้ำหนักความสำคัญที่ 18.70 และมีเปอร์เซ็นต์ความสำคัญมากที่สุดคือ 43.16% ตาม Table 6 จึงสามารถสรุปได้ว่า โครงการก่อสร้างทางและสะพานของกรมทางหลวงนั้น ควรให้ความสำคัญกับการวางแผนดำเนินการก่อสร้างให้มากที่สุด เพื่อควบคุมปัจจัยอื่นๆที่อาจมีผลกระทบต่อความล่าช้าและเพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพ ประสิทธิผล ความยั่งยืนต่อความต้องการของประชาชนมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร (ภาคพิเศษ) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนในด้านการเรียนการทำวิจัย และหน่วยงานกรมทางหลวง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและสิ่งต่างๆที่นำมาใช้ในการทำวิจัยจนสำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ศรยุทธ กิจพจน์, วิสิทธิ์ โรจน์พจนรัตน์. 2545. การบริหารและการจัดการงานก่อสร้าง. พัฒนาศึกษา, กรุงเทพฯ.

อภิชาต โสภาแดง. 2552. การตัดสินใจเพื่อการบริหาร. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Saaty, T.L. 1980. The Analytic Hierarchical Process, -McGraw`Hill, New York, USA.

Saaty, T.L. 1996. Decision making with dependence and feedback: The analytic network process, RWS Publications, Pittsburgh.

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธานของการประปานครหลวง

The study of factors affecting trunk main pipeline construction of metropolitan waterworks authority

เอกสยาม ทองด้วง, ดีบุญ เมธากุลชาติ*, วัชรินทร์ วิทยกุล

Eksayam Tongdoung, Deeboon Methakullachat*, Watcharin Witayakul

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

ปัญหาที่มักจะเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำในการก่อสร้างวางท่อประปา คือความล่าช้าของงานก่อสร้างที่ไม่แล้วเสร็จตามสัญญา การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธานของการประปานครหลวง โดยใช้ค่าน้ำหนักความสำคัญและการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (Analysis of Variance) ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม คือ กลุ่มผู้ควบคุมงาน กลุ่มผู้ออกแบบ และกลุ่มผู้รับจ้าง จากการศึกษาพบว่าความเห็นร่วมของกลุ่มตัวอย่างเกี่ยวกับปัจจัยที่เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดความล่าช้า 3 อันดับแรก ได้แก่ 1. การอนุมัติแบบที่ใช้ในการก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า 2. ความล้มเหลวในการครอบครองกรรมสิทธิ์พื้นที่ก่อสร้าง 3. การขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับจ้าง โดยความคิดเห็นต่อปัจจัยที่เป็นสาเหตุของความล่าช้า ที่จำแนกเป็น 3 ด้าน คือ 1) สาเหตุความล่าช้าประเภทต้องชดเชย 2) สาเหตุของความล่าช้าประเภทยอมรับได้ 3) สาเหตุของความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้ พบว่ามีผลกระทบที่มีต่อโครงการโดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง และมีความถี่โดยรวมอยู่ในระดับเกิดขึ้นบางโครงการ

คำสำคัญ: ความล่าช้า, งานก่อสร้าง, ประปา

Abstract

One of frequent problems in pipeline construction is the delay of construction that is not completed according to the contract. This research aims to study factors which affected the delay in trunk main pipeline construction of the Metropolitan Waterworks Authority. The data are analyzed using significant weight and ANOVA (Analysis of Variance) from 3 sample groups, namely supervisor group, designer group and construction contractor group. The results show that the sample group's opinion on the top 3 factors causing the delay were 1. The delay of the approval for construction (shop drawing). 2. The failure of claiming ownership in construction areas and having the right of way to construction areas. 3. Constructor’s lack of financial liquidity. The opinion on the factors that can cause delay is divided into 3 categorizes which are Compensable Delay, Excusable Delay and Non-excusable Delay. It was found that the factors affect the project in the middle level and the frequency is it occurs in some projects.

Keywords: construction, time delay, waterworks

คำนำ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างงานวางท่อประธานนั้นทำให้ระยะเวลาการดำเนินการก่อสร้างล่าช้ากว่าแผน และไม่ตรงตามแบบแปลนที่กำหนดไว้ วิธีการที่จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวนั้นดำเนินการได้โดยหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้าง และขจัดหรือป้องกันตัวปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้าง

โดยงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ้งเน้นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธานของการประปานครหลวง โดยสอบถามจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเพื่อนำข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ นำมาเป็นแนวทางในการป้องกันสาเหตุที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างท่อประธาน

อุปกรณ์และวิธีการ

กรอบแนวคิดทางการศึกษา

ความล่าช้าที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ความล่าช้าประเภทต้องชดเชย (Compensable Delay) ความล่าช้าประเภทยอมรับได้ (Excusable Delay) และความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้ (Inexcusable Delay) (Scott, 1997) ซึ่งการดำเนินงานศึกษางานวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการศึกษาวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) โดยใช้แบบสอบถามเพื่อรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง โดยมุ่งศึกษาองค์ประกอบปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธานของการประปานครหลวง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลจากความคิดเห็นของกลุ่มบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรง กลุ่มบุคคลดังกล่าวจะมีคุณวุฒิการศึกษาที่เกี่ยวข้องทางด้านงานก่อสร้าง คือ ผู้บริหาร พนักงาน หรือผู้ที่ทำงานเกี่ยวกับงานก่อสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะงานที่ปฏิบัติได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ 1. กลุ่มผู้ออกแบบ 2. กลุ่มผู้ควบคุมงาน และ 3. กลุ่มผู้รับจ้าง โดยทำการศึกษาในเรื่องผลกระทบและความถี่ของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธาน

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

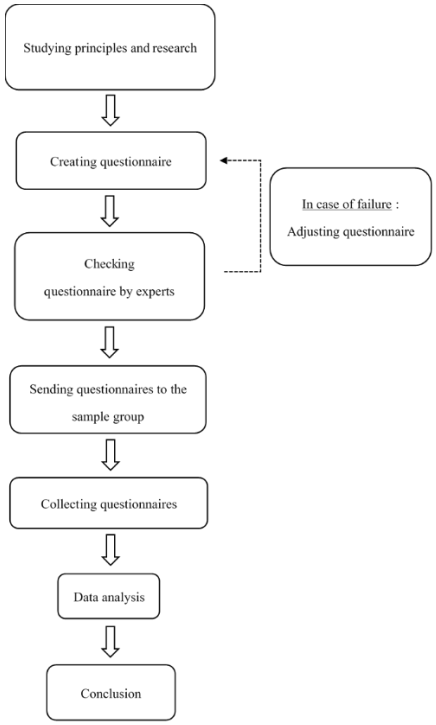


Fig. 1 Research process

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการรวบรวมแบบสอบถามจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้างวางท่อประธานของการประปานครหลวง โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยคำนวณกลุ่มตัวอย่างจากสูตรของ ทาโร่ ยามาเน่ (Taro , 1973 อ้างถึงในธานินทร์, 2555) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความคลาดเคลื่อนของการสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่ระดับ .05 ซึ่งได้ผลดังแสดงใน Table 1

Table 1 Number of another position of sample

Position	Total of population (N)	Total of sample (n)	Percentage (%)
Construction controller	94	69	65.10
Designer	20	15	14.15
Contractor	30	22	20.75
	144	106	100.00

จาก Table 1 แสดงให้เห็นว่ามีจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 106 คน แบ่งเป็น 1) ผู้ควบคุมงาน ร้อยละ 65.10 2) ผู้ออกแบบ ร้อยละ 14.15 และ 3) ผู้รับจ้าง ร้อยละ 20.75 ซึ่งผู้ควบคุมงานมีจำนวนกลุ่มตัวอย่างมากที่สุด

และจากการนำข้อมูลที่ได้จากผู้ทำแบบสอบถามมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Science) โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 หัวข้อ ต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธาน

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลรายด้านของผู้ตอบแบบสอบถาม ผู้วิจัยได้นำเสนอในรูปแบบของตาราง แสดงให้เห็นถึงระดับผลกระทบและระดับความถี่ที่เกิดขึ้นต่อโครงการของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในการก่อสร้างวางท่อประธาน สรุปค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าน้ำหนักสำคัญ ดังแสดงใน Table 2 และ Table 3

Table 2 Top 5 ranks of factors causing delay in construction

Ranking	Factors causing delay in construction	Level of Effect		Level of Frequency		Level of Importance	Importance Index (%)
		$\overline{X}$	S.D.	$\overline{X}$	S.D.		
1	Delayed approve of construction drawing.	4.111	0.782	4.000	1.000	16.444	4.679
2	Failure to take ownership of the construction area and the use of rights on the path to the construction area.	4.107	1.167	3.667	1.118	15.074	4.289
3	The contractor's lack of financial liquidity.	4.333	0.707	3.333	1.118	14.444	4.111
4	A lack of coordination at the field.	4.033	0.512	3.444	1.236	13.778	3.920
5	The request for permission to the government in the working area was delayed.	3.667	0.866	3.556	0.527	13.037	3.709

จาก Table 2 แสดงให้เห็นว่าความคิดเห็นร่วมกันของผู้ตอบแบบสอบถาม ปัจจัยที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดความล่าช้ากับงานวางท่อประธาน 5 อันดับแรก ได้แก่ 1. การอนุมัติแบบที่ใช้ในการก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า (ระดับความสำคัญ = 16.444) 2. ความล้มเหลวในการครอบครองกรรมสิทธิ์พื้นที่ก่อสร้าง และการใช้สิทธิ์

บนเส้นทางการเข้าสู่พื้นที่ก่อสร้าง (ระดับความสำคัญ = 15.074) 3. การขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา (ระดับความสำคัญ = 14.444) 4. ความบกพร่องในการประสานงานที่หน้าสนาม (ระดับความสำคัญ = 13.778) และ 5. การติดต่อขออนุญาตต่อหน่วยราชการที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ทำงานล่าช้า (ระดับความสำคัญ = 13.037)

Table 3 Mean, Standard deviation and Importance Index of Major factors causing delay in construction

Major factors causing delay in construction	Level of Effect		Level of Frequency		Level of Importance	Importance Index (%)
	$\overline{X}$	S.D.	$\overline{X}$	S.D.		
1. Compensable delay	3.302	0.423	3.016	0.508	9.957	35.084
2. Excusable delay	2.873	0.613	2.524	0.637	7.251	25.548
3. Inexcusable delay	3.619	0.396	3.087	0.251	11.173	39.368
Overall average	3.265	0.374	2.876	0.307	-	-
Sum	-	-	-	-	28.381	100.000

จาก Table 3 แสดงให้เห็นว่าความคิดเห็นร่วมกันของผู้ตอบแบบสอบถามด้านผลกระทบ ปัจจัยที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดความล่าช้ากับงานวางท่อประธาน โดยรวมด้านผลกระทบอยู่ในระดับปานกลาง ($\overline{X}$= 3.265) และด้านความถี่อยู่ในระดับเกิดขึ้นบางโครงการ ($\overline{X}$ = 2.876)

2. การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบสมมติฐานความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่าง

โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA (Analysis of Variance) จำแนกเป็นระดับผลกระทบ และระดับความถี่ต่อปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้า ซึ่งทำการวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มลักษณะงาน 3 กลุ่มที่มีความคิดเห็นร่วมกันของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างวางท่อประธาน ทั้ง 3 ด้าน ดังแสดงใน Table 4–6

Table 4 One-way ANOVA for Compensable delay

1. Compensable delay	ANOVA			
	Level of Effect		Level of Frequency	
	F	Sig.	F	Sig.
1.1 The delay of the approval for construction (shop drawing).	8.000	0.200	1.000	0.422
1.2 Delay of the Owner in Answering Questions from the Contractor.	2.625	0.152	8.600	0.017*
1.3 Annuity payment is not as scheduled.	0.538	0.409	5.600	0.042*
1.4 Defects and unclear construction contracts.	2.400	0.171	4.000	0.079
1.5 Details of the construction drawing contradict each other.	0.400	0.387	0.600	0.279
1.6 The delay in contacting government agencies involved in the work area.	1.500	0.296	7.000	0.127
1.7 Intervention of the contractor from owner.	1.000	0.422	2.375	0.174
1.8 Intervention of the contractor's work by other contractors or other owners.	0.437	0.165	10.750	0.010*
1.9 Lack of operational expertise of the supervisor.	0.250	0.087	0.500	0.030*
1.10 The number of supervisors is insufficient.	0.571	0.093	0.167	0.080

Table 4 (continued).

1. Compensable delay	ANOVA			
	Level of Effect		Level of Frequency	
	F	Sig.	F	Sig.
1.11 Order to change working methods and change inspection standards	0.250	0.087	0.500	0.120
1.12 Issuing an order to change details of construction drawings and details of various schedules.	4.750	0.058	0.571	0.093
1.13 The supervisor has multiple lines of command, causing delay in decision-making.	10.500	0.048*	0.100	0.106
1.14 The failure of claiming ownership in construction areas and having the right of way to construction areas.	1.900	0.229	12.000	0.078

*significant at a p-value less than 0.05

Table 5 One-way ANOVA for Excusable delay

2. Excusable delay	ANOVA			
	Level of Effect		Level of Frequency	
	F	Sig.	F	Sig.
2.1 Discovery of antiques or an ancient civilization in the construction area.	7.000	0.097	6.500	0.131
2.2 Meeting ferocious animals, toxins, or dangerous objects in the construction area.	10.500	0.111	3.250	0.111
2.3 Building obstructions Restricted tree and utilities of other agencies.	43.000	0.000*	3.100	0.119
2.4 Climate anomalies and natural disasters.	0.250	0.077	2.000	0.216
2.5 Local or domestic political problems.	0.250	0.077	7.000	0.027*
2.6 Problems from working conditions have changed from counterparties.	2.600	0.154	1.500	0.096
2.7 Problems from the site condition, hard rock found obstructing, requiring special tools to destroy.	4.000	0.079	1.500	0.096

*significant at a p-value less than 0.05

Table 6 One-way ANOVA for Inexcusable delay

3. Inexcusable delay	ANOVA			
	Level of Effect		Level of Frequency	
	F	Sig.	F	Sig.
3.1 Delay in delivery of construction drawings (Shop Drawing) delayed.	1.000	0.222	0.250	0.077
3.2 Delays in sending construction drawings (As build Drawing) are delayed.	0.250	0.077	3.500	0.098
3.3 Use of personnel not suitable for the job And not enough personnel.	6.300	0.234	4.333	0.068
3.4 Inadequate construction labor.	7.800	0.021*	7.750	0.002*

Table 6 (continued).

3. Inexcusable delay	ANOVA			
	Level of Effect		Level of Frequency	
	F	Sig.	F	Sig.
3.5 Lack of experience in personnel And expertise in operations or planning construction.	0.600	0.179	4.750	0.058
3.6 Delays arising from the work of subcontractors.	13.000	0.007*	4.750	0.058
3.7 The construction does not meet the contract and does not meet the requirements or construction drawings.	0.500	0.063	7.750	0.022*
3.8 Failure to comply with the request from the owner of the work answered by the contractor.	0.500	0.063	25.000	0.001*
3.9 Deficiencies in following up work and adjusting work plans.	3.000	0.065	7.750	0.057
3.10 Deficiency in coordination at the field.	1.500	0.296	2.500	0.162
3.11 Deficiency in management and coordination within the contractor's organization.	9.000	0.016*	14.000	0.005*
3.12 Delays in the provision of tools Equipment or materials used in construction.	1.500	0.296	5.333	0.047*
3.13 Use of tools or equipment for construction that do not meet the requirements.	1.333	0.062	1.000	0.052
3.14 Constructor’s lack of financial liquidity.	3.000	0.072	2.625	0.085

*significant at a *p*-value less than 0.05

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของ Table 4 – 6 พบว่าความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถาม กลุ่มลักษณะงาน 3 กลุ่ม ด้านระดับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงการ มีปัจจัยที่มีความคิดเห็นไม่แตกต่างกันอยู่ 30 ปัจจัย เช่น การอนุมัติแบบที่ใช้ในการก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า, การค้นพบโบราณวัตถุ หรือแหล่งอารยธรรมโบราณในพื้นที่ก่อสร้าง และความล่าช้าในการส่งแบบที่ใช้ในการก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า เป็นต้น ส่วนปัจจัยที่มีความคิดเห็นที่แตกต่างกันมี 5 ปัจจัย เช่น การกีดขวางของสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้หวงห้าม และระบบสาธารณูปโภคของหน่วยงานอื่น, ความล่าช้าที่เกิดจากการทำงานของผู้รับจ้างย่อย และการที่มีแรงงานก่อสร้างไม่เพียงพอ เป็นต้น

สำหรับด้านระดับความถี่ที่เกิดขึ้นกับโครงการ มีปัจจัยที่มีความคิดเห็นไม่แตกต่างกันอยู่ 25 ปัจจัย เช่น ผู้ควบคุมงานมีจำนวนบุคลากรไม่เพียงพอ, ความผิดปกติของสภาพภูมิอากาศ และภัยธรรมชาติ และความบกพร่องในการประสานงานที่หน้าสนาม เป็นต้น ส่วนปัจจัยที่มีความคิดเห็นที่แตกต่างกันมี 10 ปัจจัย เช่น การจ่ายเงินงวดไม่เป็นไปตามกำหนด, ปัญหาทางการเมืองในท้องถิ่น หรือในประเทศ และความล่าช้าในการจัดหาเครื่องมืออุปกรณ์หรือวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เป็นต้น

สรุป

จากการศึกษาโดยจำแนกความล่าช้าออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ความล่าช้าประเภทต้องชดเชย ความล่าช้าประเภทยอมรับได้ และความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้ พบว่าความเห็นร่วมของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างวางท่อประธานของการประปานครหลวง 5 อันดับแรก เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ 1) การอนุมัติแบบที่ใช้ในการก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า 2) ความล้มเหลวในการครอบครองกรรมสิทธิ์พื้นที่ก่อสร้าง 3) การขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับจ้าง 4) ความบกพร่องในการประสานงานที่หน้าสนาม 5) ความบกพร่องในการติดตามงานและปรับแผนการทำงาน ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความล่าช้าส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแปรปรวนแบบ ANOVA (Analysis of Variance) พบว่าความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถาม กลุ่มลักษณะงาน 3 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ออกแบบ, ผู้ควบคุมงาน และผู้รับจ้าง ปัจจัยที่มีค่านัยสำคัญน้อยที่สุด ด้านผลกระทบ เช่น การกีดขวางของสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้หวงห้าม และระบบสาธารณูปโภคของหน่วยงานอื่น, ความล่าช้าที่เกิดจากการทำงานของผู้รับเหมาย่อย, ความบกพร่องในการจัดการและประสานงานภายในองค์กรของผู้รับเหมา เป็นต้น และในด้านความถี่ เช่น การไม่ปฏิบัติตามคำขอร้องจากเจ้าของงานที่ผู้รับเหมาได้ตอบตกลงตามคำขอร้องนั้นไปแล้ว, ความบกพร่องในการติดตามงานและปรับแผนการทำงาน, การที่มีแรงงานก่อสร้างไม่เพียงพอ และการใช้สิทธิ์บนเส้นทางการเข้าสู่พื้นที่ก่อสร้าง เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารของการประปานครหลวง ที่ให้คำแนะนำด้านข้อมูลและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับสาเหตุปัญหาความล่าช้าของการก่อสร้างวางท่อประธาน

ขอขอบคุณบุคคลต่างๆ ที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม ที่ได้ความอนุเคราะห์และสละเวลาในการตอบแบบสอบถามข้อมูลเพื่อการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

Scott, S. 1997. Dealing with delay claims: a survey. Int. J. Proj. Manag. 11: 143–153.

ธานินทร์ ศิลป์จารุ. 2555. การวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS และ AMOS, พิมพ์ครั้งที่ 13. บิสซิเนสอาร์แอนด์ดี, กรุงเทพฯ.

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง

Factors affecting construction supervisor's performance, construction supervision division, department of public works and town & country planning

ธิปก ฝอยทอง*, วัชรินทร์ วิทยกุล, ดีบุญ เมธากุลชาติ

Thipok Foythong*, Watcharin Witayakul, Deeboon Methakullachat

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

การควบคุมงานก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมืองมีปริมาณหลายโครงการที่หยุดงาน และล่าช้ากว่าแผนงาน ปัญหาส่วนหนึ่งเกิดจากการควบคุมงานก่อสร้าง โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีวิจัยเชิงสำรวจ เพื่อการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน และใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา และการพัฒนาองค์กรให้เกิดประโยชน์สูงสุด ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยลักษณะโครงการ ด้านลักษณะงาน ด้านงบประมาณโครการ และด้านระยะห่างที่ตั้งโครงการกับที่พักอาศัยที่แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ส่วนปัจจัยวงจรบริหารงานคุณภาพที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ประกอบด้วย การวางแผน, การปฏิบัติตามแผน, การตรวจสอบการปฏิบัติตามแผน และการปรับปรุงแก้ไข อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ผลจากการวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานให้เกิดประสิทธิภาพการปฏิบัติงานต่อไป

คำสำคัญ: โครงการก่อสร้าง, ประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน, วงจรบริหารงานคุณภาพ

Abstract

The construction supervision of the Department of Public Works and Town & Country Planning had many projects that were off work and lagging behind schedule. The problem is partially due to construction supervision. This research uses survey research method to study the factors affecting the performance of the construction supervisors. It will be used as a guideline for solving problems and developing the organization for maximum benefit. The study found that the difference in Project Characteristics, namely job description, project budget, and the distance between the project location and the domicile had a statistically significant difference in the supervisor’s performance efficiency at the .01 level. On the other hand, the Quality Management Cycle Factors (PDCA) that influenced the performance of construction supervisors, consisting of planning, implementation of the plan, monitoring the implementation of the plan, and improvements, is statistically significant at the .05 level. The research results can be used as a guideline for further improvement of the supervisor's performance efficiency.

Keywords: construction project, performance efficiency, quality management cycle

คำนำ

กรมโยธาธิการและผังเมือง มีภารกิจเกี่ยวกับงานด้านการผังเมืองระดับต่าง ๆ การออกแบบ การก่อสร้าง และการควบคุมการก่อสร้างอาคาร ดำเนินการและสนับสนุนองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในด้านการพัฒนาเมือง พื้นที่ และชนบท โดยการกำหนดและกำกับดูแลนโยบายการใช้ประโยชน์ที่ดิน ระบบการตั้งถิ่นฐานและโครงสร้างพื้นฐาน รวมทั้งการกำหนดคุณภาพและมาตรฐานการก่อสร้างด้านสถาปัตยกรรม วิศวกรรม และการผังเมือง เพื่อให้มีสภาพแวดล้อมที่ดี เกิดมาตรฐานความปลอดภัยแห่งสาธารณชน ความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมืองและสิ่งปลูกสร้างตามระบบการผังเมืองที่ดี อันจะนำไปสู่การพัฒนาประเทศ ในด้านการผังเมือง การพัฒนาเมือง และการอาคาร ให้มีความน่าอยู่ ปลอดภัย รักษาสภาพแวดล้อม ประหยัดพลังงาน และมีอัตลักษณ์อย่างยั่งยืน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2554)

ในการควบคุมงานก่อสร้างให้แล้วเสร็จสมบูรณ์ถูกต้องตามรูปแบบ รายการ และข้อกำหนดของสัญญาภายใต้ระยะเวลาที่กำหนดนั้น เป็นหน้าที่หลักของผู้ควบคุมงานก่อสร้างที่จะต้องยึดถือปฏิบัติ ซึ่งต้องอาศัยการวางแผนงานที่ดี มีวิธีการตรวจสอบที่ถูกต้อง และการประเมินผลงานที่เหมาะสม สำหรับใช้กำกับและควบคุมในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินงานแต่ละโครงการ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ควบคุมงานจะต้องรู้จักวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่เหมาะสมสอดคล้องกับลำดับขั้นตอนก่อสร้างและแผนการเบิกจ่ายเงินงบประมาณ รู้จักวิธีการตรวจสอบความเหมาะสมของขั้นตอนการทำงาน สามารถตรวจสอบผลงานก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง และมีวิธีการประเมินผลงานก่อสร้างในแต่ละส่วนที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีแนวทางปฏิบัติที่หลากหลายขึ้นอยู่กับ ขนาด ประเภท และความซับซ้อนของงานก่อสร้าง รวมทั้งประสบการณ์ที่แตกต่างกันของผู้ควบคุมงานแต่ละคน ผู้ควบคุมงานก่อสร้างจึงเป็นบุคลากรที่มีความสำคัญที่มีหน้าที่ควบคุมการก่อสร้างให้เป็นไปตามแบบรูปและรายการตามข้อกำหนดของสัญญาจ้างเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของโครงการ

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง

2) เสนอแนะแนวทางในปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน

กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง

งานก่อสร้างเป็นงานที่สลับซับซ้อน มีหน่วยงานทั้งภายในและภายนอกเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องหลายหน่วยงาน ซึ่งแต่ละหน่วยงานจะมีลักษณะและความเกี่ยวกันกับงานก่อสร้างที่แตกต่างกัน ต้องมีการประสานงานกันอย่างใกล้ชิดตลอดเวลา โดยทั่วไปงานก่อสร้างมีลักษณะ (ประเสริฐ , 2552) ดังนี้

1) ส่วนใหญ่เป็นงานปฏิบัติในที่โล่งแจ้ง พื้นที่ปฏิบัติการกว้างการดำเนินงานขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ

2) ต้องมีการประเมินและปรับแก้แผนงานตลอดเวลา

3) เป็นงานที่ใช้บุคลากรทุกระดับฝีมือและความชำนาญในลักษณะแตกต่างกันจำนวนมาก (Construction Team) การเคลื่อนที่โยกย้ายบุคลากรจะเกิดขึ้นได้ทุกขณะจากกิจกรรมหนึ่งไปยังอีกกิจกรรมหนึ่งในโครงการเดียวกันหรือแม้แต่การโยกย้ายระหว่างโครงการ

4) สถานที่ตั้งโครงการกระจายอยู่ได้ทั่วท้องที่อาจจะห่างไกลจากสำนักงานใหญ่มาก จึงต้องมีการพิจารณาเตรียมการด้านต่างๆ ให้เหมาะสมแต่ละโครงการ เช่น วัสดุ อุปกรณ์ บุคลากร เครื่องจักรเครื่องมือ และงบประมาณ

5) มีปัญหาที่เกิดขึ้นและต้องรีบแก้ไขอยู่ตลอดเวลาซึ่งต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์ และความรู้ในมาตรฐานการออกแบบและการก่อสร้าง

6) มีงานหลายลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งต้องอาศัยความรู้ความชำนาญเฉพาะทางดำเนินงานร่วมกัน

7) ต้องมีการติดต่อสัมพันธ์กันตลอดเวลาของคนสองกลุ่ม คือ กลุ่มผู้ออกแบบและกลุ่มผู้ดำเนินการก่อสร้าง

8) เป็นงานที่ต้องใช้เงินทุนหมุนเวียนสูงกว่างานประเภทอื่น

ลักษณะงานของโครงการก่อสร้างนั้น มีความหมายและขอบเขตของงานก่อสร้างของส่วนราชการ (กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง, 2555) ดังนี้

1) งานก่อสร้างอาคาร หมายถึง งานก่อสร้างใหม่ งานปรับปรุง งานซ่อมแซม งานรื้อถอน และหรืองานต่อเติมอาคาร บ้าน เรือน โรง ร้าน แพ เรือหรือพาหนะสาหรับขนส่งข้ามฟาก ท่าเทียบเรือ ตึกแถว ร้านค้า โรงเรือน โรงเรียน โรงพยาบาล โรงงาน โรงภาพยนตร์ ศูนย์การค้า คลังสินค้า อาคารสำนักงาน อาคารที่ทำการ อาคารชุดพักอาศัย ศาลาที่พัก เป็นต้น หรือสิ่งก่อสร้างอื่นที่มีลักษณะรูปแบบหรือโครงสร้างคล้ายกับสิ่งก่อสร้างดังกล่าว ซึ่งบุคคลอาจเข้าอยู่หรือเข้าไปใช้สอยได้

2) การก่อสร้างชลประทาน หมายถึง งานก่อสร้าง ปรับปรุง ซ่อมแซม หรือต่อเติมสิ่งก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมน้ำเพื่อการชลประทาน หรือเพื่อการอื่น เช่น การประมง การเกษตรกรรม การป้องกันน้ำเค็ม การป้องกันน้ำท่วม หรือเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

3) งานก่อสร้างทาง หมายถึง การก่อสร้าง การขยาย การบูรณะ หรือการบำรุงรักษาทางหรือถนนซึ่งจัดไว้เพื่อประโยชน์ในการจราจร สาธารณะทางบก ไม่ว่าในระดับพื้นดิน หรือเหนือพื้นดิน หรือใต้ หรือเหนืออสังหาริมทรัพย์อย่างอื่น เป็นต้น

งบประมาณโครงการ หมายถึง แผนในการใช้ทรัพยากรขององค์กรและแผนการจัดสรร ทรัพยากรสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ของโครงการ รวมทั้งแผนรายรับรายจ่าย โดยจัดทำในหน่วยของ จำนวนเงิน ดังนั้นหลักกว้างๆ ในการจัดทำงบประมาณของโครงการคือ จำนวนทรัพยากรที่ต้องใช้ และการประมาณต้นทุนของทรัพยากรที่ต้องการใช้แต่ละชนิดออกมาเป็นจำนวนเงิน เมื่อนำต้นทุน ต่าง ๆ ของแต่ละกิจกรรมมารวมกันก็จะได้เป็นประมาณการค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการที่จะต้องได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารขององค์กร เมื่อผู้บริหารอนุมัติแล้วประมาณการนั้นก็จะเปลี่ยนแปลงเป็นงบประมาณของโครงการต่อไป (รัตนา, 2546 อ้างถึงใน พนิดา, 2555)

ระยะห่างที่ตั้งโครงการกับที่พักอาศัย เป็นหนึ่งในข้อจำกัดในงานก่อสร้าง ซึ่งผู้บริหารงานก่อสร้าง ผู้รับเหมาก่อสร้าง หัวหน้าหน่วยงาน ช่างควบคุมงาน ควรต้องพิจารณาว่า การทำงานแต่ละกิจกรรมมีปัญหาหรือข้อจำกัดอย่างไร ซึ่งเมื่อทราบล่วงหน้างานที่ทำนั้นมีข้อจำกัดอย่างไรแล้ว จะช่วยให้สามารถวางแผนการดำเนินงานได้อย่างรอบคอบต่อไป (สุธิรา, 2556)

วงจรบริหารงานคุณภาพ (PDCA) หรือ Plan-Do-Check-Act จัดเป็นกิจกรรมปรับปรุงและพัฒนางานให้มีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย การวางแผน การปฏิบัติตามแผน การตรวจสอบการปฏิบัติตามแผน และการปรับปรุง

แก้ไข (Salaheldin and Zain, 2007) โดย Deming in Mycoted (2004) กล่าวว่า การจัดการอย่างมีคุณภาพเป็นกระบวนการที่ดำเนินการต่อเนื่องเพื่อให้เกิดผลผลิตและบริการที่มีคุณภาพขึ้น โดยหลักการที่เรียกว่าวงจรบริหารงานคุณภาพ (PDCA) หรือวงจรเดมมิ่ง ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน รายละเอียด ดังนี้

Plan คือ กำหนดสาเหตุของปัญหา จากนั้นวางแผนเพื่อการเปลี่ยนแปลงหรือทดสอบเพื่อการปรับปรุงให้ดีขึ้น

Do คือ การปฏิบัติตามแผนหรือทดลองปฏิบัติเป็นการนำร่องในส่วนย่อย

Check คือ ตรวจสอบการปฏิบัติตามแผนเพื่อทราบว่าบรรลุผลตามแผนหรือหากมีสิ่งใดที่ทำผิดพลาดหรือได้เรียนรู้อะไรมาแล้วบ้าง

Act คือ ยอมรับการเปลี่ยนแปลง หากบรรลุผลเป็นที่น่าพอใจหรือหากผลการปฏิบัติไม่เป็นไปตามแผน ให้ทำซ้ำวงจรโดยใช้การเรียนรู้จากการกระทำในวงจรที่ได้ปฏิบัติไปแล้ว

แม้ว่าวงจรบริหารงานคุณภาพจะเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องแต่สามารถเริ่มต้นจากขั้นตอนใดก็ได้ขึ้นอยู่กับปัญหาและขั้นตอนการทำงานหรือจะเริ่มจากการตรวจสอบสภาพความต้องการเปรียบเทียบกับสภาพที่เป็นจริงจะทำให้ได้ข้อสรุปว่าจะต้องดำเนินการอย่างไรในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้เกิดการปรับเปลี่ยนไปตามเป้าหมายที่วางไว้

อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติภารกิจด้านการบริการด้านช่างของกรมโยธาธิการและผังเมือง พบว่า ปริมาณงานที่อยู่ในความรับผิดชอบของกองควบคุมการก่อสร้าง ถึงปี งบประมาณ 2463 รวมทั้งสิ้น 423 โครงการ แบ่งเป็นงานกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 388 โครงการ งานส่วนราชการอื่น 35 โครงการ อยู่ระหว่างก่อสร้าง 363 โครงการ หยุดงาน 60 โครงการ ล่าช้ากว่าแผนงาน 150 โครงการ พบว่าปัญหาส่วนหนึ่งเกิดจากการควบคุมงานก่อสร้าง แสดงให้เห็นว่าการควบคุมงานก่อสร้างเป็นหัวใจสำคัญประการหนึ่งในการบริการด้านช่างของกรมโยธาธิการและผังเมือง จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้างเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา และการพัฒนาองค์กรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง และเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ควบคุมงานก่อสร้างในสังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 84 คน

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทดสอบสมมติฐานของการวิจัยใช้สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) ได้แก่ การวิเคราะห์ปัจจัยลักษณะโครงการที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมืองในระดับต่างกัน ใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และการวิเคราะห์ปัจจัยวงจรบริหารงานคุณภาพ (PDCA) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง ทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ พบว่า วงจรบริหารงานคุณภาพ (PDCA) ของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ในสังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง โดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.02)

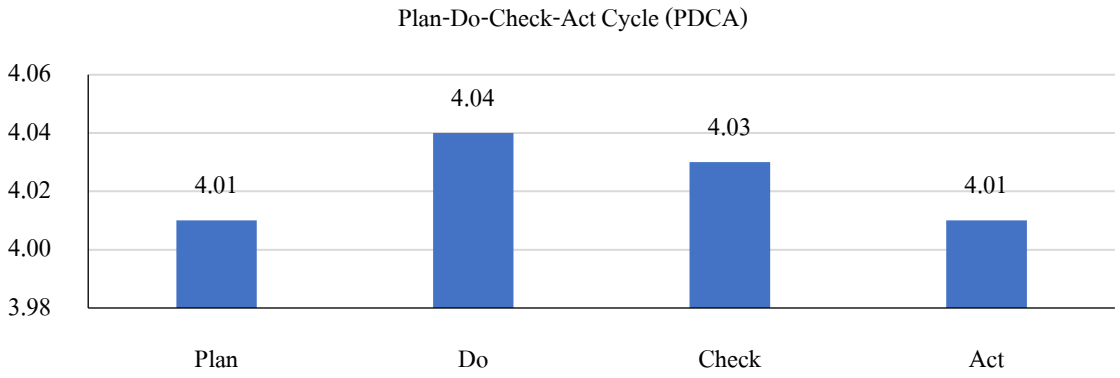


Fig. 1 Level of importance of The Play-Do-Check-Act Cycle (PDCA)

จาก Fig. 1 พบว่า วงจรบริหารงานคุณภาพเมื่อพิจารณาเป็นรายด้านที่ผู้ควบคุมงานก่อสร้างในสังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมืองให้ความสำคัญมากที่สุดคือ ด้านการปฏิบัติตามแผน (ค่าเฉลี่ย 4.04) รองลงมาคือ ด้านการตรวจสอบการปฏิบัติตามแผน (ค่าเฉลี่ย 4.03) ด้านการวางแผน (ค่าเฉลี่ย 4.01) และด้านการปรับปรุงแก้ไข (ค่าเฉลี่ย 4.01)

ประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ในสังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมืองโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.17) แยกเป็นรายด้านได้ ดังนี้

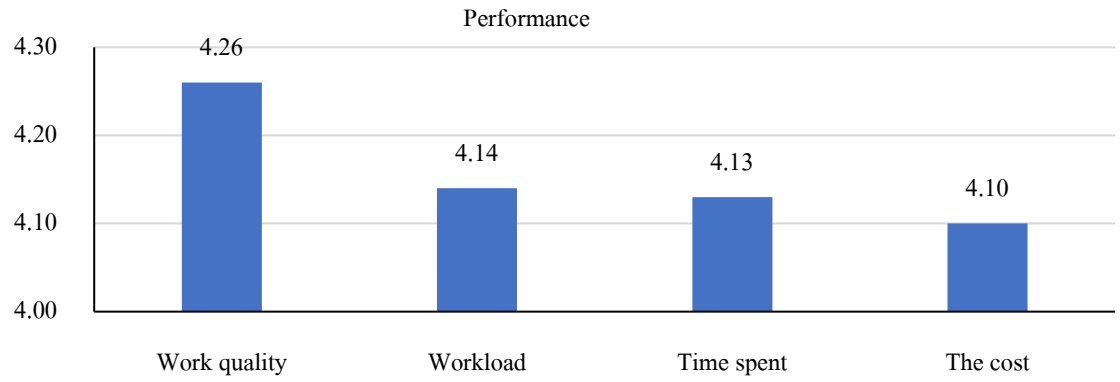


Fig. 2 Performance level of the supervision

จาก Fig. 2 พบว่า ประสิทธิภาพการปฏิบัติงานที่ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ในสังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า อยู่ในระดับมากตามลำดับ คือ ด้านคุณภาพงาน (ค่าเฉลี่ย 4.26) รองลงมาคือ ด้านปริมาณงาน (ค่าเฉลี่ย 4.14) ด้านเวลาที่ใช้ (ค่าเฉลี่ย 4.13) และด้านค่าใช้จ่าย (ค่าเฉลี่ย 4.10)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงการ ด้านลักษณะงานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยลักษณะโครงการที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง สังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง โดยใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) สามารถแสดงได้ดัง Table 1

Table 1 One-way ANOVA-test of project characteristics affecting the performance of construction supervisors

Project description	Number	Mean	Standard deviation	F	Sig.
Job description					
1. Dam construction, bank protection	30	4.64	0.36	36.527	0.000*
2. Construction of flood protection system	13	3.74	0.52		
3. Urban development	30	4.18	0.36		
4. Building construction	11	3.39	0.57		
Project budget					
1. 10-50 million baht	18	4.56	0.26	9.752	0.000*
2. 51-100 million baht	34	3.91	0.22		
3. 100 million baht or more	32	4.24	0.78		
Distance of project location and residence					
1. Less than 50 kilometers	13	4.60	0.42	14.106	0.000*
2. 50-100 kilometers	37	4.32	0.45		
3. More than 100 kilometers	34	3.84	0.57		

* The mean difference is significant at the 0.01 level.

จากตารางที่ 1 การวิเคราะห์ปัจจัยลักษณะโครงการที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานสังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง พบว่า ลักษณะโครงการ ด้านลักษณะงาน ด้านงบประมาณโครงการ และด้านระยะห่างที่ตั้งโครงการกับที่พักอาศัยที่แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

การวิเคราะห์วงจรบริหารงานคุณภาพ (PDCA) ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ใช้สถิติการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยใช้วิธี Enter คือ การนำทุกตัวแปรเข้าสมการพร้อมกัน ปรากฏตามตารางที่ 2 พบว่า วงจรบริหารงานคุณภาพ (PDCA) ประกอบด้วย การวางแผน (Plan), การปฏิบัติตามแผน (Do), การตรวจสอบการปฏิบัติตามแผน (Check) และการปรับปรุงแก้ไข (Act) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน โดยวงจรบริหารงานคุณภาพที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 สามารถแสดงได้ดัง Table 2

Table 2 The Plan-Do-Check-Act Cycle (PDCA) Influencing Performance of Construction Supervisors

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	0.408	0.131		3.113	0.003
	Plan	0.211	0.099	0.230	2.128	0.036*
	Do	0.237	0.106	0.245	2.243	0.028*
	Check	0.239	0.094	0.250	2.544	0.013*
	Act	0.250	0.091	0.263	2.739	0.008*
$R = 0.957$, $R^2 = 0.916$, Adj $R^2 = 0.912$, Std Error of the Estimate = 0.169, Sig of F = 0.000						

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

สรุป

ปัจจัยลักษณะโครงการ ประกอบด้วย ลักษณะงาน งบประมาณโครงการ และระยะห่างระหว่างที่ตั้งโครงการกับที่พักอาศัยของผู้ควบคุมงานที่แตกต่างกันที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานสังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมืองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 โดยด้านลักษณะงานก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง ด้านงบประมาณโครงการระหว่าง 10–50 ล้านบาท และด้านระยะห่างที่ตั้งโครงการกับที่พักอาศัยน้อยกว่า 50 กิโลเมตรมีระดับค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการปฏิบัติงานมากที่สุด เนื่องจากงานก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งเป็นภาระกิจงานก่อสร้างหลักของกรมโยธาธิการและผังเมือง ทำให้ผู้ควบคุมงานมีความรู้ความเข้าใจในการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างให้ถูกต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของสัญญา งบประมาณโครงการในช่วง 10–50 ล้านบาท จะเป็นโครงการก่อสร้างที่มีรายละเอียดของงานไม่ซับซ้อน ผู้ควบคุมงานสามารถบริหารงานให้สอดคล้องกับแผนการเบิกจ่ายงบประมาณรายปี ระยะห่างที่ตั้งโครงการกับที่พักอาศัยน้อยกว่า 50 กิโลเมตร เป็นระยะทางที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานมากที่สุด โดยสามารถกำหนดลักษณะโครงการที่มีความเสี่ยงซึ่งทำให้เกิดปัญหาด้านประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานก่อสร้างของผู้ควบคุมงานก่อสร้างและนำไปจัดทำแผนการบริหารความเสี่ยงให้เหมาะสมกับลักษณะโครงการที่มีปัญหาต่อไป

วงจรบริหารงานคุณภาพ (PDCA) ประกอบด้วย การวางแผน, การปฏิบัติตามแผน, การตรวจสอบการปฏิบัติตามแผน และการปรับปรุงแก้ไขมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน สังกัดกองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 จะเห็นได้ว่า การดำเนินงานไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพ หรือแม้แต่การบริหารกิจกรรมภายในองค์กร การวางแผนงานอย่างเหมาะสมจากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องรอบด้าน ถือเป็นจุดเริ่มต้นที่ดี และการดำเนินการที่สอดคล้องกับแผนจะเป็นเส้นทางที่นำไปสู่ความสำเร็จ และบรรลุตามเป้าหมายที่วางไว้ แต่ก็จะต้องมีการตรวจสอบความคืบหน้า หรือปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นเป็นระยะ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ในการปรับแผนให้สอดคล้องกับสถานการณ์ได้ และที่สำคัญเมื่อการดำเนินงานเสร็จสิ้นแต่ละครั้ง บทเรียนต่างๆ ที่ได้รับ ก็ถือเป็นสิ่งสำคัญ หากได้มีการนำมาทบทวน และสรุปข้อดี ข้อด้อย หรือ หาจุดปรับปรุง เพื่อให้การดำเนินงานในรอบต่อไปทำได้ง่ายขึ้น ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น ทั้งหมดนี้คือการดำเนินงานอย่างครบถ้วนตามแนวคิดของวงจร PDCA ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญของการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้รับความร่วมมือจากผู้ควบคุมงานก่อสร้างในสังกัดกรมโยธาธิการและผังเมือง ทุกท่านที่ได้สละเวลาตอบแบบสอบถาม ให้ข้อมูลและข้อแนะนำต่าง ๆ แก่ผู้วิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง. 2555. หลักเกณฑ์การคำนวณราคากลางงานก่อสร้างอาคาร. กระทรวงการคลัง, กรุงเทพฯ.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2554. แนะนำกรมโยธาธิการและผังเมือง. https://dpt.go.th/th/about-us/4-strategies.html, 1 พฤศจิกายน 2563.

มนต์ชัย วงศ์สันติราษฎร์. 2556. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมงานก่อสร้าง กรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลภายในจังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทปริญญา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ประเสริฐ ดำรงชัย. 2552. การวางแผนงานก่อสร้าง.โครงการจัดทำตำราสำหรับรายวิชาในหลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานช่างและผังเมือง, กรุงเทพฯ.

พนิดา ก้องกังวาน. 2555. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพฯ.

รัตนา สายคณิต. 2546. เศรษฐศาสตร์การจัดการคณะเศรษฐศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สันติ อินทร์สุภา. 2559. การพัฒนารูปแบบการบริหารวิชาการแบบมีส่วนร่วมของศูนย์เครือข่ายคุณภาพการศึกษา สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาประถมศึกษานครสวรรค์ เขต 3. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

สุธิรา จันทรา. 2556. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนในงานก่อสร้าง พ.ศ. 2550–2556 กรณีศึกษา บริษัทอุดมกิจวิศวก์ จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

Deming in Mycoted. 2004. Plan Do Check Act (PDCA). http://www.mycoted.com/creativity/techniques/pdca.php.

Salaheldin I.S., Zain, M. 2007. How quality control circles enhance work safety: A case study. The TQM Magazine. 19: 229–224.

การศึกษาปัญหาด้านความปลอดภัยของการติดตั้งนั่งร้านในโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม
The Study of Safety Problems Related to Scaffolding Installation in Factory Construction Sites

ณัฐวดี บุริบัน[a]*, ก่อโชค จันทวรางกูร[b], ชาญณรงค์ ไวยพจน์[b]
Nattawadee Buriban[a]*, Korchoke Chantawarangul[b], Channarong Waiyapoj[b]
[a]โครงการปริญญาโทวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[a]Graduate Program in 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: nattawadee.bur@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาปัญหาด้านความปลอดภัยของการติดตั้งนั่งร้านในโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม 3 โครงการ โดยการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี Job Safety Analysis (JSA) และ Fault Tree Analysis (FTA) โดยนำผลที่ได้ไปประเมินความเสี่ยง เพื่อให้ทราบถึงระดับของความเสี่ยง และเสนอแนะมาตรการป้องกันอันตราย พร้อมทั้งแนวทางการติดตั้งนั่งร้านอย่างปลอดภัย ผลการวิจัย พบการปรับพื้นที่ติดตั้งนั่งร้านไม่สมดุล และการติดตั้งนั่งร้านไม่สมบูรณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วย JSA พบความเสี่ยงที่ระดับปานกลาง อาจก่อให้เกิดการพังของนั่งร้าน และผู้ปฏิบัติงานตกจากที่สูง เมื่อนำทั้ง 2 สถานการณ์ไปวิเคราะห์หาสาเหตุด้วยวิธี FTA พบสาเหตุ 13 และ 8 สถานการณ์ตามลำดับ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว สรุปได้ว่า เหตุการณ์ย่อยของแต่ละเหตุการณ์ที่แตกต่างกัน ก่อให้เหตุการณ์หลักไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีระดับความเสี่ยงที่ระดับปานกลาง ซึ่งต้องมีการกำหนดแนวทางในการดำเนินงาน โดยจะต้องทำการประเมินอันตรายอย่างรอบคอบ เพื่อให้มั่นใจว่าระดับความเสี่ยงลดลงเหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

คำสำคัญ: การติดตั้งนั่งร้าน, การวิเคราะห์ความเสี่ยง, การวิเคราะห์ความปลอดภัยในการทำงาน, การวิเคราะห์แบบ Fault Tree Analysis

Abstract

This research is the study of safety problems related to scaffolding installation in 3 factory construction sites. The Job Safety Analysis (JSA) and the Fault Tree Analysis (FTA) are a hazard analysis method that is applied to review scaffolding installation procedures and practices in order to identify potential hazards. The results of the hazard analysis were taken for risk assessment according to 5 × 5 Risk Assessment Matrix to risk classification and determine risk control measures for safely scaffolding installation. The operation research was found in scaffolding installation on uneven surfaces and non-exhaustive. When analyzed with JSA, it was found that the risks were at a moderate level. It may cause the scaffold collapse and worker falls from a height. When both situations were used for root cause analysis by FTA, 13 and 8 causes were found, respectively, and the one-way ANOVA is concluded that each different sub-event cause the top events which are not different as statistically significant at a level of 0.05. The risk assessment results are moderate level (tolerable), which shall be a careful evaluation of the hazard to carry out to ensure that the risk level is reduced to as low as reasonably practicable.

Keywords: fault tree analysis, job safety analysis, scaffolding installation, risk analysis

คำนำ

ในการดำเนินงานโครงการก่อสร้างโรงงานงานอุตสาหกรรม โกดังหรือคลังสินค้า และอาคารต่างๆ ถูกระบุด้วยกฎหมายความปลอดภัยถึงลักษณะงานที่มีความสูงตั้งแต่ 2 เมตรขึ้นไป (กระทรวงแรงงาน, 2551) ต้องจัดให้มีพื้นที่สำหรับรองรับผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้สามารถขึ้นไปปฏิบัติงานได้อย่างปลอดภัย สำหรับงานก่อสร้างนั้น การติดตั้งนั่งร้านจำเป็นต้องให้ความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ โดยต้องมีการออกแบบและรับรองโดยวิศวกรโยธา มีการดำเนินการติดตั้งอย่างมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัย (กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2554) หลังการติดตั้งนั่งร้านแล้วเสร็จ ต้องมีการตรวจสอบโดยหัวหน้างานของทีมผู้ติดตั้ง และเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยกับวิศวกรที่รับผิดชอบโครงการนั้นๆ เพื่อให้การติดตั้งนั่งร้านเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบ และมาตรฐานการติดตั้งนั่งร้าน เนื่องจากการดำเนินงานตรวจสอบนั่งร้านในพื้นที่โครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า นั่งร้านที่ใช้เป็นพื้นที่รองรับผู้ปฏิบัติงาน มีประเด็นปัญหาที่ไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดของการติดตั้ง (SMCC Construction Department, 2017) เช่น การติดตั้งราวกันตกไม่ครบถ้วน ไม่มีการติดตั้งที่กั้นสำหรับป้องกันวัสดุร่วงหล่น มีการติดตั้งนั่งร้านใกล้พื้นที่เสี่ยง และพื้นที่บริเวณที่ทำการติดตั้งเกิดการทรุดตัวหรือไม่ราบเรียบ เนื่องมาจากผู้ปฏิบัติงานมีการดัดแปลงนั่งร้านเอง ปัญหาดังกล่าวเป็นประเด็นเดิมที่เคยตรวจพบ หากไม่ได้รับการปรับปรุงแก้ไข อาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายหรืออุบัติเหตุต่อผู้ปฏิบัติงานบนนั่งร้าน และพื้นที่โดยรอบ

ดังนั้น จึงมีการดำเนินการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับมาตรฐานการติดตั้งนั่งร้าน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นจากการใช้งานนั่งร้านที่มีการติดตั้งไม่สมบูรณ์ หรือไม่สอดคล้องตามรูปแบบของมาตรฐานการติดตั้ง และนำผลที่ได้มากำหนดเป็นมาตรการป้องกันอันตรายเมื่อมีการติดตั้งนั่งร้าน และใช้เป็นแนวทางในการสื่อสารให้ผู้ปฏิบัติงานในโครงการก่อสร้างให้มีความตระหนักถึงอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการดำเนินการตรวจสอบนั่งร้าน และปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ ที่ไม่สอดคล้องตามมาตรฐานกำหนดให้ดียิ่งๆ ขึ้นไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ คอมพิวเตอร์ (Computer), เครื่องพิมพ์ (Printer), โปรแกรม, Microsoft Office 2013, เทปวัดระยะหรือตลับเมตร และอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment)

วิธีการ

1. ศึกษางานวิจัย และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. การดำเนินการออกแบบงานวิจัย
    2.1 ออกแบบวิธีการวิจัย เพื่อดำเนินการวัดผลให้บรรลุตามวัตถุประสงค์การวิจัย โดยการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธีการวิเคราะห์ความปลอดภัยในการทำงาน (Job Safety Analysis: JSA) การวิเคราะห์หาสาเหตุ

การเกิดอุบัติเหตุ โดยใช้วิธี Fault Tree Analysis (FTA) มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหารายการอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการติดตั้งนั่งร้าน และดำเนินการประเมินความเสี่ยง

2.2 เลือกกลุ่มผู้ให้ข้อมูล โดยกำหนดคุณสมบัติกลุ่มผู้ให้ข้อมูลจากประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับงานติดตั้งนั่งร้านอย่างน้อย 3 ปี

2.3 เลือกโครงการที่จะดำเนินการเก็บข้อมูลวิจัย โดยเป็นโครงการที่มีการดำเนินงานอยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม ถึงเดือนธันวาคม 2562 ทั้งหมด 3 โครงการ ได้แก่ โครงการที่ 1 เป็นโครงการก่อสร้างอาคารลำเลียงสารเคมี 3 ชั้น พื้นที่อาคารรวม 5,572 ตารางเมตร นั่งร้านที่ใช้รอบอาคารสูง 11 ชั้น โครงการที่ 2 เป็นโครงการก่อสร้างอาคารลำเลียงสารเคมี 3 ชั้น พื้นที่อาคารรวม 13,000 ตารางเมตร นั่งร้านที่ใช้รอบอาคารสูง 13 ชั้น และโครงการที่ 3 เป็นโครงการก่อสร้างโรงงานผลิตเครื่องมือแพทย์ 2 ชั้น พื้นที่อาคารรวม 7,661 ตารางเมตร นั่งร้านที่ใช้รอบอาคารสูง 5 ชั้น ดังแสดงใน Fig. 1 ตามลำดับ



Fig. 1 Project 1, 2 and 3, Respectively.

3. การวิเคราะห์ความปลอดภัยในการติดตั้งนั่งร้าน

3.1 ศึกษาขั้นตอนการติดตั้งนั่งร้าน

3.2 ค้นหารายการอันตรายหรืออุบัติเหตุในแต่ละขั้นตอนของการติดตั้งนั่งร้าน

3.3 วิเคราะห์อันตรายในแต่ละขั้นตอนการติดตั้งนั่งร้าน

3.4 ชี้บ่งอันตรายด้วยวิธีการวิเคราะห์ความปลอดภัยในการทำงาน (Job Safety Analysis: JSA) และวิธี Fault Tree Analysis (FTA) และนำข้อมูลที่ได้จากการชี้บ่งอันตรายไปประเมินความเสี่ยงแบบ 5 × 5 (SMCC Construction Department, 2017) ซึ่งผลการโดยระดับความเสี่ยงหาได้จากการคูณค่าของระดับความรุนแรง และโอกาสที่อาจเกิดขึ้น โดยกำหนดให้มีสมการการวิเคราะห์ผลเป็น RPN = S × L หมายถึง ลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Risk Priority Number) = ความรุนแรง (Severity) × โอกาสที่จะเกิด (Likelihood) (RPN = S × L) ที่เป็นตัวชี้วัดผลของความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอันตรายหรืออุบัติเหตุจากงานนั่งร้าน ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินจะถูกนำมาสรุปเป็นระดับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น โดยใช้เกณฑ์ ดัง Table 1

Table 1 Example of a common 5x5 Risk Matrix with a mix of numeric and descriptive ratings

Likelihood / Severity	Rare (1)	Remote (2)	Occasional (3)	Frequent (4)	Almost Certain (5)
Catastrophic (5)	Medium	Medium	High	High	High
Major (4)	Medium	Medium	Medium	High	High
Moderate (3)	Low	Medium	Medium	Medium	High
Minor (2)	Low	Medium	Medium	Medium	Medium
Negligible (1)	Low	Low	Low	Medium	Medium

4. เสนอแนะแนวทางในการลดอุบัติเหตุ และมาตรการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุในขั้นตอนการติดตั้งนั่งร้าน
5. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการเก็บข้อมูลขั้นตอนการติดตั้งนั่งร้านของแต่ละโครงการ

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลสถิติการตรวจพบประเด็นปัญหาเกี่ยวกับนั่งร้านย้อนหลังตั้งแต่ปี 2015–2019 จากโครงการก่อสร้างโรงงานของบริษัท โดยมีโครงการตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี ระยอง อยุธยา สระบุรี ปทุมธานี และกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นข้อมูลของประเด็นปัญหาที่พบจากการตรวจสอบประจำเดือน (Monthly Audit) ของแต่ละโครงการ ข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมจะใช้เป็นแนวทางในการกำหนดลักษณะอันตรายของการติดตั้งนั่งร้านและประเมินความเสี่ยงของอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น โดยสรุปผลการเก็บรวบรวมข้อมูลไว้ดัง Table 1

Table 2 Summary of scaffolding issues (2015–2019)

Year	2015		2016		2017		2018		2019	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Total of year	53	95	26	31	50	55	52	50	50	48
Average per month	4.42	21.5	2.20	14.10	4.20	13.10	4.33	11.55	4.20	11.42

Remark: (1) Amount of project (2) Amount of issues

จาก Table 2 เป็นการรวบรวมข้อมูลสถิติการตรวจพบประเด็นปัญหาเกี่ยวกับการติดตั้งนั่งร้านในโครงการก่อสร้าง โดยสรุปเป็นจำนวนโครงการของแต่ละปีเป็นค่าเฉลี่ย เนื่องจากช่วงเวลาดำเนินงานแต่ละโครงการไม่เท่ากัน พบว่า ในปี 2015 มีจำนวนโครงการรวม 12 เดือน เท่ากับ 53 โครงการ คิดเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนโครงการต่อเดือนเท่ากับ 4.42 โครงการ และค่าเฉลี่ยจำนวนโครงการของปี 2016 ถึง 2019 เท่ากับ 2.20, 4.20, 4.33 และ 4.20 ตามลำดับ และพบจำนวนประเด็นปัญหาของปี 2015 รวม 12 เดือน เท่ากับ 95 ประเด็น คิดเป็นค่าเฉลี่ยจำนวน

ประเด็นปัญหาต่อเดือนเท่ากับ 21.5 ประเด็น และค่าเฉลี่ยจำนวนประเด็นปัญหาของปี 2016 ถึง 2019 เท่ากับ 14.10, 13.10, 11.55 และ 11.42 ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าประเด็นปัญหาที่พบในแต่ละปีมีแนวโน้มลดลง

จากการรวบรวมข้อมูลด้านสถิติการตรวจพบประเด็นปัญหาเกี่ยวกับนั่งร้าน พบการปรับพื้นที่ติดตั้งนั่งร้านไม่สมดุล เนื่องจากการบดอัดดินไม่แน่น ดังแสดงใน Fig. 2 อาจส่งผลให้นั่งร้านบริเวณดังกล่าวทรุดทำให้นั่งร้านเอียงหรือเสียสมดุล หากรับน้ำหนักที่มากเกินไปอาจก่อให้เกิดการพังถล่มของนั่งร้านได้ และการวางวัสดุบนนั่งร้านมากเกินไป ดังแสดงใน Fig. 3 ซึ่งมีผลต่อการรับน้ำหนักของนั่งร้านอาจเสี่ยงต่อการพังถล่มของนั่งร้านได้ (กระทรวงมหาดไทย, 2525) เนื่องจากแผ่นพื้นนั่งร้านที่ใช้งาน 1 แผ่น (0.48 เมตร × 1.8 เมตร) มีผลทดสอบการรับน้ำหนักสามารถรับน้ำหนักได้เพียง 120 กิโลกรัมจากจุดศูนย์กลางของแผ่นพื้น



Fig. 2 Improper ground adjustment



Fig. 3 Material on the scaffold is overload

ผลการวิเคราะห์อันตรายด้วยวิธีการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job Safety Analysis)

จากการวิเคราะห์อันตรายด้วยวิธีการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (JSA) ผลจากการชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงของแต่ละขั้นตอนในการติดตั้งนั่งร้าน สรุปผลการวิเคราะห์อันตรายที่มีระความเสี่ยงปานกลาง ดัง Table 2

Table 3 Job Safety Analysis

No.	Risk Situation	Preventive measures	Likelihood	Severity	Risk Level
1	The adjustment of the ground area is uneven.	Adjust the ground area before scaffolding installation	2	5	10 (Medium)
2	Adjust the level of the jack base is unequal.	Check by measuring the level with a balanced water level	2	5	10 (Medium)

จาก Table 3 เป็นการสรุปผลการวิเคราะห์ของอันตรายเหตุการณ์ที่พบระดับความเสี่ยงอยู่ในระดับปานกลางขึ้นไป โดยมีระดับความรุนแรงที่ระดับ 5 (สูง) พบ 2 เหตุการณ์ ได้แก่ (1) เหตุการณ์ปรับพื้นที่ไม่ราบเรียบ การติดตั้งนั่งร้านไม่สมดุลอาจเสี่ยงต่อการเกิดการพังถล่มของนั่งร้านได้ (2) เหตุการณ์ปรับระดับของฐานไม่เท่ากัน ส่งผลให้การติดตั้งนั่งร้านเสียสมดุล หรือนั่งร้านเอียง อาจก่อให้เกิดการถล่มของนั่งร้านได้ จะต้องมีการกำหนดแนวทางการดำเนินการต่อ โดยการประเมินอันตรายอย่างรอบคอบอีกครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าระดับความเสี่ยงลดลงเหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (As Low As Reasonably Practicable : ALARP) และกำหนดมาตรการควบคุมความเสี่ยงระหว่างดำเนินงาน

ผลการวิเคราะห์อันตรายด้วยวิธี Fault Tree Analysis

การวิเคราะห์อันตรายในการดำเนินการติดตั้งนั่งร้าน ด้วยวิธี Fault Tree Analysis ซึ่งผู้วิจัยมีการดำเนินการใช้เหตุการณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นซึ่งมีระดับความเสี่ยงอยู่ในระดับปานกลาง (สิริวิมลและนันทิยา, 2555) โดยนำผลจากการวิเคราะห์อันตรายด้วยวิธีการวิเคราะห์ความปลอดภัยในการทำงาน (JSA) มาดำเนินการวิเคราะห์ต่อ โดยเกิดเหตุการณ์นั่งร้านถล่ม มาเป็นเหตุการณ์ตั้งต้นในการวิเคราะห์หาสาเหตุของอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น แสดงดัง Fig. 4

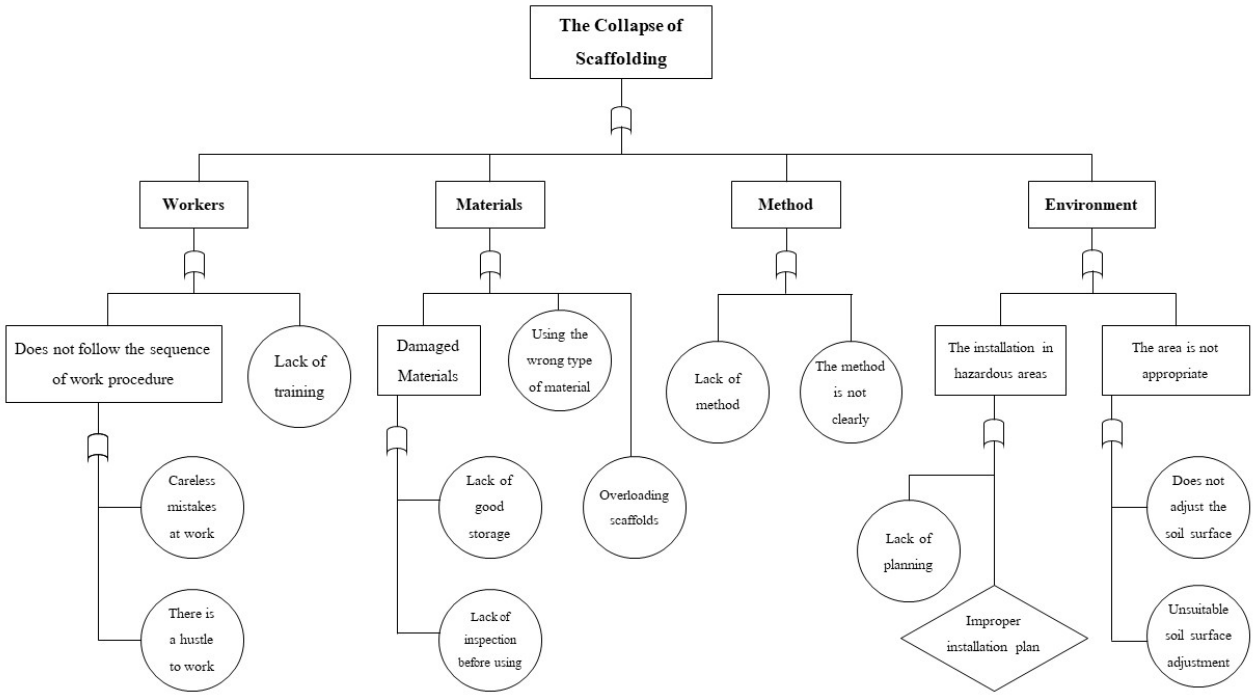


Fig. 4 Fault Tree Analysis Flow Chart for Scaffolding Accident

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Fault Tree Analysis ใช้หลักการ 4M1E ซึ่งประกอบไปด้วย คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัสดุ (Material) วิธีการทำงาน (Method) และสภาพแวดล้อม (Environment) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาเหตุการณ์ย่อย ผลการวิเคราะห์มี 4 สาเหตุ ดังนี้ (1) คน (Man) เป็นการวิเคราะห์ในส่วนของผู้ปฏิบัติงานมีผลต่อการเกิดการพังของนั่งร้าน เนื่องมาจากสาเหตุของการปฏิบัติงานลัดขั้นตอน หรือขาดการอบรบการปฏิบัติงานอย่างปลอดภัย (2) วัสดุ (Material) เป็นการวิเคราะห์ในส่วนของวัสดุที่ใช้ในการติดตั้งนั่งร้าน หากมีการใช้วัสดุที่ชำรุด มีสนิม หรือเสียรูป หรือใช้วัสดุในการติดตั้งไม่ถูกประเภท หรือมีการวางกองวัสดุบนนั่งร้านมากเกินอาจส่งผลต่อการรับน้ำหนักของนั่งร้านและเกิดการพังของนั่งร้านได้ (3) วิธีการทำงาน (Method) เป็นการวิเคราะห์ในส่วนของวิธีการติดตั้งนั่งร้าน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากไม่มีการกำหนดขั้นตอนการทำงาน หรือกำหนดวิธีการดำเนินงานไม่ชัดเจน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่มีแนวทางในการติดตั้งนั่งร้านอย่างปลอดภัย และ (4) สภาพแวดล้อม (Environment) อาจส่งผลต่อการพังของนั่งร้าน เนื่องจากการติดตั้งใกล้พื้นที่เสี่ยง หรือสภาพพื้นที่บริเวณที่ติดตั้งไม่เหมาะสม

เมื่อวิเคราะห์สาเหตุแล้ว ผู้วิจัยได้นำแผนภาพที่วิเคราะห์ได้ มาทำการคำนวณระดับความเสี่ยงของแต่ละสถานการณ์ โดยใช้สมการของในการหาจำนวนสาเหตุพื้นฐานและจัดลำดับความสำคัญ ดังแสดงใน Fig. 5

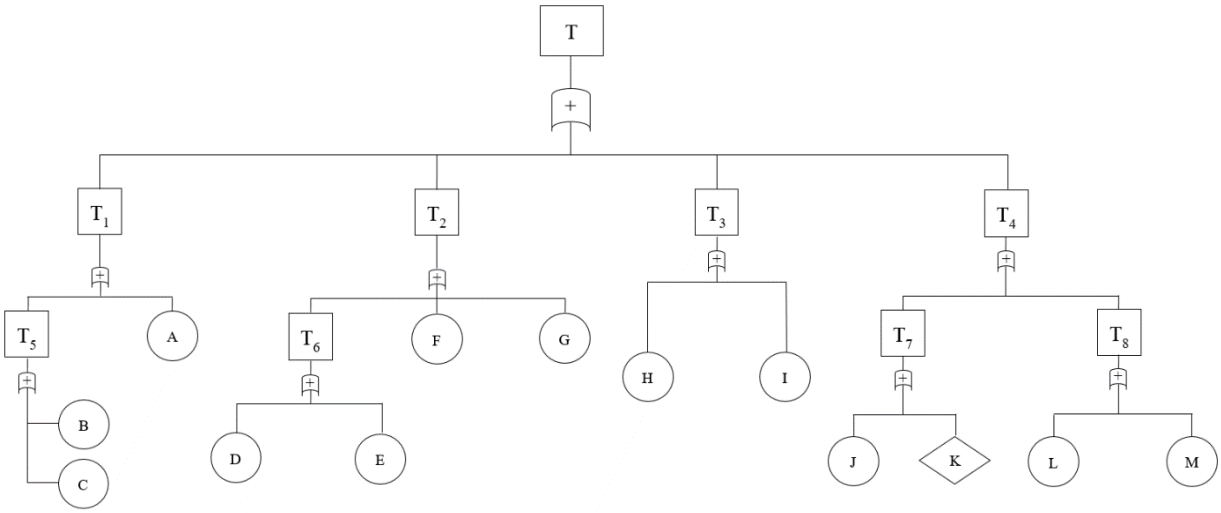


Fig. 5 Scaffolding Accident Diagram

จากการจัดทำแผนภาพ ผู้วิจัยกำหนดเหตุการณ์ต่างๆ เป็นสัญลักษณ์ โดยกำหนดให้เหตุการณ์หลัก (Top Event) ด้วยอักษร T เหตุการณ์ย่อยแทนด้วย T_1 ถึง T_8 และ Or Gate แทนด้วยเครื่องหมายบวก ส่วนสาเหตุพื้นฐานแทนด้วยตัวอักษร A ถึง M แล้วจึงใช้หลักการบูลเลี่ยนแทนค่า (W.E. Vesely, 1981) เพื่อหาค่า T ใน Equation 1

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (1)$$

ได้ผลจากการแทนค่า ดังนี้

$$T = A + B + C + D + E + F + G + H + I + J + K + L + M$$

จากการแทนค่าในสมการเพื่อหา T สามารถอธิบายได้ว่า การเกิดเหตุการณ์นั่งร้านพัง สามารถเกิดขึ้นได้จากทั้งสิ้น 13 สถานการณ์ ตามจำนวนตัวอักษร เมื่อนำชุดข้อมูลสถานการณ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ได้ค่า F (1.67) < Fcrit (6.60) สรุปได้ว่า เหตุการณ์ย่อยของเหตุการณ์นั่งร้านพังที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดเหตุการณ์หลักไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากการชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยงจาก FTA กรณีนั่งร้านถล่ม พบทั้งระดับความเสี่ยงของแต่ละสาเหตุอยู่ในระดับปานกลาง และพบว่าระดับความรุนแรงอยู่ในระดับ 5 (สูง) ซึ่งหมายถึง การบาดเจ็บรุนแรง และเสียชีวิต

สรุปผลและเสนอแนะ

การศึกษาปัญหาด้านความปลอดภัยของการติดตั้งนั่งร้านในโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม โดยการนำประเด็นปัญหาต่างๆ ที่ตรวจพบว่าไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์อันตรายที่อาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ ด้วยวิธีวิเคราะห์ความปลอดภัยในการทำงาน (JSA) และ Fault Tree Analysis (FTA) มีการประเมินระดับของความเสี่ยง เพื่อกำหนดมาตรการในการป้องกันอันตรายและลดความเสี่ยง และเป็นแนวทางในการติดตั้งนั่งร้านอย่างปลอดภัย สำหรับ FTA มีการวิเคราะห์ทางสถิติเพิ่มด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) สรุปได้ว่า เหตุการณ์ย่อยของเหตุการณ์หลักที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดเหตุการณ์ที่ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากผลการวิเคราะห์อันตรายจากทั้ง 2 วิธี พบว่า ระดับความเสี่ยงอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้บางกรณี จะต้องมีการกำหนดแนวทางการดำเนินการต่อ โดยการประเมินอันตรายอย่างรอบคอบอีกครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าระดับความเสี่ยงลดลงเหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (As Low As Reasonably Practicable : ALARP) และกำหนดมาตรการควบคุมความเสี่ยงระหว่างดำเนินงาน เช่น การควบคุมการบริหารจัดการอย่างเหมาะสม หรือการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPE) (กระทรวงแรงงาน, 2551) ครบถ้วนตลอดระยะเวลาการปฏิบัติงาน ก่อนการติดตั้งนั่งร้าน ผู้ปฏิบัติงานจะต้องผ่านการอบรมตามหลักสูตรที่กำหนด และรับทราบถึงผลการชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และมาตรการในการป้องกันความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้น เพื่อเป็นการเน้นย้ำให้ผู้ปฏิบัติงานได้ตระหนักถึงอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น และปฏิบัติงานอย่างปลอดภัย

เมื่อดำเนินการติดตั้งนั่งร้านแล้วเสร็จ ผู้เกี่ยวข้องจะต้องมีการดำเนินการตรวจสอบก่อนใช้งานทุกครั้ง (กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562) เพื่อให้แน่ใจว่า นั่งร้านมีการติดตั้งตามการออกแบบ และสอดคล้องตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งรายการตรวจสอบนั้นสามารถกำหนดได้ตามความเหมาะสม ตามรูปแบบของนั่งร้าน โดยอ้างอิงเกณฑ์การตรวจสอบจากข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้การติดตั้งนั่งร้านมีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัยต่อการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงแรงงาน. 2551. กำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับงานก่อสร้าง.

กรมโยธาธิการ และผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. 2554. มาตรฐานประกอบการออกแบบนั่งร้านและค้ำยัน. มยผ. 1344-54.

กรมโยธาธิการ และผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. 2562. มาตรฐานการติดตั้งและการตรวจสอบโครงสร้างนั่งร้าน. มยผ.1571-62.

ประกาศกระทรวงมหาดไทย. 2525. ความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้าง ว่าด้วยนั่งร้าน.

ระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2543. หลักเกณฑ์การชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง.

สิริวิมล ชื่นบาน, นันทิยา หาญศุภลักษณ์. 2555. การชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี Fault Tree Analysis และการประเมินความเสี่ยงภายในท่ออบแป้งในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง. วิศวกรรมสาร มก. 80: 39–50.

SMCC Construction Department. 2017. Safety Handbook. SMCC, Tokyo.

Vesely, W.E. 1981. Fault Tree Handbook. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.

แนวทางการประเมินความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูป

Safety assessment guideline for installation of precast concrete beam

สถิตคุณ พุ่มพวง*, ฆนิศา รุ่งแจ้ง

Sathitkun Poompuang*, Kanisa Rungjang

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

การกำหนดขั้นตอนการตรวจสอบความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นงานที่ท้าทายอย่างยิ่งในการจัดการงานก่อสร้างโครงสร้างส่วนบน การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าและสะพานมีการพัฒนาไปอย่างรุดหน้าในทศวรรษนี้ผลกระทบที่ตามมาคือการสูญเสียในชีวิตและทรัพย์สินอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุระหว่างงานก่อสร้าง งานก่อสร้างมีสถิติการเกิดอุบัติเหตุรายปีสูงที่สุดในกลุ่มประเภทกิจการที่มีลูกจ้างประสบอันตรายเนื่องจากการทำงาน (ร้อยละ 8.29 ของจำนวนอุบัติเหตุทั้งหมด) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแบบประเมินความปลอดภัยของงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปกับโครงสร้างส่วนบนและนำผลการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานไปพัฒนาเป็นแนวปฏิบัติให้แก่โครงการนำร่อง โดยผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าแต่ละหน่วยงานมีขั้นตอนด้านความปลอดภัยที่แตกต่างกันและแนวปฏิบัติที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานในโครงการนำร่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการประเมินพบว่า 1 ใน 3 ของโครงการนำร่องมีค่าความปลอดภัยอยู่ในระดับ Fair และหลังการเสนอแนวปฏิบัติและปรับปรุงแก้ไขสามารถพัฒนาขึ้นอยู่ในระดับ Very good ได้

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ระดับความปลอดภัย, ความปลอดภัย, คานคอนกรีตสำเร็จรูป

Abstract

Establishing a safety audit procedure in the installation of precast concrete beams is an extremely challenging task in managing the construction of superstructures. The infrastructural development in the electric locomotive train and bridge construction project has developed rather rapidly in this decade. The consequences are the loss of life and property due to the construction accident. Construction work has the highest annual accident record among the types of businesses where workers suffer from work hazards (8.29 % of the total number of accidents). This research aims to generate a safety assessment of precast concrete beam installation in superstructure and use the results of the analysis of working procedures to develop into safety guiding instruction for the pilot project. Research has shown that each project has different safety procedures and the proposed safety guiding instruction can be used effectively in pilot projects. The assessment results showed that one in three of the pilot projects had the safety value of Fair level and after proposing a safety guiding instruction and improvement, it could be improved up to the Very good level.

Keywords: analysis of the safety level, precast concrete beam, safety

คำนำ

ที่มาของงานวิจัย

งานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นงานที่มีขั้นตอนการทำงานซับซ้อน การกำหนดขั้นตอนการตรวจสอบความปลอดภัยในงานติดตั้งจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักในการจัดการงานก่อสร้างโครงสร้างส่วนบนทั้งนี้การพัฒนาโครงสร้างทางยกระดับและรถไฟฟ้าในประเทศไทยเป็นไปอย่างมากในทศวรรษนี้ เช่น โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีชมพู ช่วงมีนบุรี-แคราย โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีเหลือง ช่วงลาดพร้าว-สำโรง โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม ช่วงศูนย์วัฒนธรรม-มีนบุรี โครงการก่อสร้างระบบรถไฟชานเมือง (สายสีแดง) ช่วงบางซื่อ-รังสิต โครงการก่อสร้างสะพานข้ามคลองดู จังหวัดสตูล และโครงการก่อสร้างสะพานข้ามจุดตัดทางรถไฟสายทางเลี่ยงเมืองห้วยแถลง เป็นต้น ในขณะที่โครงการก่อสร้างเป็นไปอย่างรุดหน้านั้นการเกิดอุบัติเหตุระหว่างการก่อสร้างยังเป็นผลกระทบที่ตามมาซึ่งส่งผลให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนทั้งในส่วนของผู้ดำเนินงานโครงการและผู้ใช้ทาง ข้อมูลสถิติการประสบอุบัติเหตุจากการทำงานที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ากิจการก่อสร้างเป็นประเภทกิจการที่ลูกจ้างประสบอุบัติเหตุเนื่องจากการทำงานเป็นอันดับแรกเมื่อเทียบกับจำนวนการประสบอุบัติเหตุจากการทำงานรายปี (จำนวน 8,218 ครั้ง หรือร้อยละ 8.29 ต่อปี เมื่อเทียบกับจำนวนอุบัติเหตุจากการทำงานทั้งหมด 99,131 ครั้ง) รองลงมาเป็นอุบัติเหตุจากกิจการการผลิตเครื่องดื่มและอาหาร (ร้อยละ 6.83) กิจการการค้าเครื่องไฟฟ้า (ร้อยละ 5.54) ตามลำดับ (สำนักงานกองทุนเงินทดแทน, 2563) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งทำการวิเคราะห์ระดับความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปกับโครงสร้างส่วนบนของโครงการก่อสร้างระบบขนส่งที่สำคัญ โดยทำการประเมินความปลอดภัยของงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปกับโครงสร้างส่วนบนและจัดทำแนวปฏิบัติในการตรวจสอบขั้นตอนการติดตั้ง และนำไปถ่ายทอดให้ผู้รับผิดชอบโครงการซึ่งเป็นโครงการนำร่อง 3 แห่ง ได้นำไปปฏิบัติรวมถึงได้ประเมินผลการปรับปรุงการปฏิบัติงานด้านความปลอดภัยของโครงการนำร่องอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำแนวทางปฏิบัติงานดังกล่าวไปสู่การปฏิบัติและการเผยแพร่ต่อไป

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการวิเคราะห์ระดับความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปกับโครงสร้างส่วนบน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อทำการประเมินความปลอดภัยของงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปกับโครงสร้างส่วนบน
2. เพื่อจัดทำแนวปฏิบัติในการตรวจสอบขั้นตอนการติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปในงานโครงสร้างส่วนบน พร้อมนำไปถ่ายทอดให้ผู้รับผิดชอบโครงการนำร่องและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำไปสู่การปฏิบัติ

การรวบรวมข้อมูลและงานที่วิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทั้งนี้เพื่อให้การวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้จึงจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยใน 2 ประเด็นสำคัญ ได้แก่ 1) สถิติอุบัติเหตุและการวิเคราะห์สาเหตุอุบัติเหตุในกิจการก่อสร้างที่เกี่ยวกับโครงสร้างส่วนบน 2) กฎระเบียบและมาตรการความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งรวมถึงมาตรฐานทางวิศวกรรมและวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง

สถิติอุบัติเหตุและการวิเคราะห์สาเหตุอุบัติเหตุในกิจการก่อสร้างที่เกี่ยวกับโครงสร้างส่วนบน

สถิติข้อมูลและความหมายของอุบัติเหตุในการก่อสร้างมีการรายงานไว้โดยงานวิจัยและรายงานของหน่วยงานหลายแห่ง (สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย (2563) กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน (2560)) ความหมายที่นิยมใช้แพร่หลายในกิจการก่อสร้างได้นิยามของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน (2560) ซึ่งกำหนดให้ อุบัติเหตุ หมายถึง เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้คาดการณ์หรือวางแผนไว้ล่วงหน้าซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วมีผลกระทบต่อการทำงานและผลผลิต ทำให้เกิดการบาดเจ็บ ความเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงานหรือการเสียชีวิตและทรัพย์สิน การกำหนดแนวทางปฏิบัติเพื่อลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุมีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุอุบัติเหตุ สาเหตุที่สำคัญของการเกิดอุบัติเหตุส่วนใหญ่มาจากการกระทำที่ไม่ปลอดภัย และสภาพการณ์ที่ไม่ปลอดภัย หรือที่นิยมเรียกว่า “Unsafe Acts and Unsafe Condition” (Heinrich, 1941; Hollnagel et al, 2016; 2006, Flin et al, 2000) งานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปในงานก่อสร้างรถไฟฟ้าและสะพานของประเทศไทยมีความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุที่ทำให้เกิดความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินของผู้ก่อสร้างและประชาชนผู้ใช้ทาง ตัวอย่างอุบัติเหตุที่สำคัญอาทิเช่น อุบัติเหตุงานก่อสร้างโครงการสะพานลอยรังสิต-นครนายก (มติชนออนไลน์, 2561) และอุบัติเหตุงานก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง โครงการมอเตอร์เวย์บางปะอิน-โคราช (ผู้จัดการออนไลน์, 2562) เป็นต้น

กฎระเบียบและมาตรการความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูป

ความปลอดภัยในงานก่อสร้างถูกกำหนดไว้ในกฎระเบียบหลายฉบับและถูกกำกับดูแลโดยหลายหน่วยงาน กฎหมายสำคัญที่กำหนดและกำกับดูแลโดยกระทรวงมหาดไทย และกระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม ได้แก่ พระราชบัญญัติความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 (ราชกิจจานุเบกษา, 2554) ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงานหลักเกณฑ์และวิธีการใช้เชือก ลวดสลิง และรอก พ.ศ. 2553 (ราชกิจจานุเบกษา, 2553) ประกาศกระทรวงมหาดไทยเรื่องความปลอดภัยในการทำงานในสถานที่ที่มีอันตรายจากการตกจากที่สูง วัสดุกระเด็น ตกหล่น และการพังทลาย (ราชกิจจานุเบกษา, 2534) นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานความปลอดภัยที่เป็นแนวทางปฏิบัติในวงการวิชาชีพวิศวกรรมซึ่งถูกกำหนดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ได้แก่ มาตรฐานความปลอดภัยในงานก่อสร้างเล่ม 1 ความปลอดภัยในเรื่องการจัดการทั่วไป (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2561) มาตรฐานความปลอดภัยในงานก่อสร้างเล่ม 2 ความปลอดภัยในการใช้เครื่องมือและเครื่องจักร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2561)

เนื่องจากงานก่อสร้างโครงสร้างส่วนบนส่วนมากเป็นงานโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่มีความแตกต่างและซับซ้อนในการปฏิบัติงานอันเนื่องด้วยหลายปัจจัย เช่น ลักษณะโครงสร้างและการใช้งาน เทคนิควิธีการ รวมถึงหน่วยงานที่รับผิดชอบที่มีทั้งภาครัฐและเอกชน และโครงการรัฐร่วมเอกชน (Public Private Partnership, PPP) ที่มีความร่วมมือกับหลายหน่วยงานทั้งในและต่างประเทศ ดังนั้นผู้รับผิดชอบโครงการจึงกำหนดมาตรการเฉพาะสำหรับหน่วยงาน เช่น มาตรการและการตรวจสอบด้านความปลอดภัยของ บริษัท ซิโน-ไทย เอ็นจีเนียริ่ง แอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) (หน่วยงานอาชีวอนามัยและความปลอดภัย, 2562) คู่มือการทำงานบนที่สูงของ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) (หน่วยงานความปลอดภัย, 2560) เป็นต้น

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การประเมินความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูป การจัดทำแนวปฏิบัติในการตรวจสอบความปลอดภัยในการติดตั้ง และ การถ่ายทอดให้ผู้รับผิดชอบโครงการนำร่องเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำไปสู่การปฏิบัติ

การประเมินความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีต

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบประเมินความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปของโครงสร้างส่วนบน โดยประเด็นที่ทำการประเมินได้จากการวิเคราะห์ความสำคัญของขั้นตอนที่ถูกกำหนดไว้ในกฎระเบียบและมาตรการของภาครัฐและเอกชน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบด้านความปลอดภัยในขั้นตอนการทำงานมี 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ข้อกำหนดความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน การประเมินความเสี่ยงและกิจกรรมความปลอดภัยประจำวัน และข้อกำหนดด้านสถานที่และอุปกรณ์ โดยแสดงสรุปไว้ใน Table 1

Table 1 Safety Measures for Installation of Precast Concrete Beam

Safety measures	Law	EIT	Guideline	Research
Personnel				
1. Personnel qualifications	✓		✓	✓
2. Skill training of personnel competence	✓		✓	✓
Management				
1. Weight rating, installation, inspection of cranes	✓	✓	✓	
2. Equipment standard And checking		✓	✓	
3. Safety activities	✓		✓	✓
4. Regulations or rules	✓		✓	✓
Equipment and location				
1. Crane	✓	✓	✓	✓
2. Equipment to tie while lifting objects	✓	✓	✓	
3. Safety Fence	✓		✓	
4. Equipment for closing floor opening	✓	✓	✓	
5. Scaffolding	✓		✓	
6. Wire rope (Appearance, Safety factor)	✓	✓	✓	✓
7. Safety belt and lifelines	✓		✓	
8. Cutting and welding equipment	✓	✓		
9. Personal Protective Equipment (PPE)	✓	✓	✓	✓
10. Distance between electric cable to any part of precast concrete beam			✓	
11. Blocking areas for lifting precast concrete beams			✓	

Source: Authors (2021)

แบบประเมินความปลอดภัยที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย 3 ส่วน (กำหนดตามองค์ประกอบที่สำคัญ 3 องค์ประกอบดังที่กล่าวมาแล้ว) ประกอบด้วย

ส่วนที่ 1 ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน องค์ประกอบย่อย 3 ส่วน ได้แก่ คุณสมบัติของผู้ปฏิบัติงานและบุคลากร ทักษะความสามารถและการผ่านการอบรมของผู้ปฏิบัติงาน พฤติกรรมของผู้ปฏิบัติงาน

ส่วนที่ 2 การประเมินความเสี่ยงและกิจกรรมความปลอดภัยประจำวัน องค์ประกอบย่อย 2 ส่วน ได้แก่ การประเมินความเสี่ยงและกำหนดมาตรการด้านความปลอดภัย และการบริหารงานประจำวัน (Daily Management)

ส่วนที่ 3 ข้อกำหนดด้านสถานที่และอุปกรณ์ องค์ประกอบย่อย 2 ส่วน ได้แก่ มาตรการป้องกันการตกของสถานที่ปฏิบัติงาน (กรณีผู้ปฏิบัติงานตกจากที่สูง) และมาตรการลดและควบคุมความเสี่ยงงานยกและติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูป

ความปลอดภัยในแต่ละองค์ประกอบในกระบวนการติดตั้ง ได้ถูกกำหนดไว้ 5 ระดับ ตั้งแต่ ระดับไม่มีการปฏิบัติ (ระดับ 0) ปฏิบัติบางส่วน (ระดับ 1) ปฏิบัติในระดับปานกลาง (ระดับ 2) ปฏิบัติค่อนข้างครบถ้วน (ระดับ 3) ไปจนถึงระดับปฏิบัติครบถ้วนและอยู่ในสภาพที่ดี (ระดับ 4) การประเมินมีทั้ง 2 วิธี ได้แก่ 1) การประเมินการปฏิบัติงานในพื้นที่โครงการก่อสร้าง 2) การตรวจสอบเอกสารและบันทึกการปฏิบัติงาน โดยผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัย 2 กลุ่ม ได้แก่ ผู้รับเหมาและที่ปรึกษาโครงการ จำนวนทั้งสิ้น 51 คน หลังจากทำการประเมินความปลอดภัยในแต่ละองค์ประกอบแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ระดับความปลอดภัยในภาพรวมของโครงการ ความปลอดภัยของโครงการ (Safety Level) ถูกกำหนดไว้ 5 ระดับ ได้แก่ ระดับที่มีระบบและการดำเนินการขั้นพื้นฐาน (Poor) ระดับที่มีระบบและการดำเนินการที่พอใช้ (Fair) ระดับที่มีระบบและการดำเนินการปานกลาง (Good) ระดับที่มีระบบและการดำเนินการที่ดี (Very Good) ระดับที่มีระบบและการดำเนินการที่ดีเยี่ยม (Excellent) แสดงดัง Table 2

Table 2 Safety Level

Level	Level name	Scores
1	Poor	0-59
2	Fair	60-69
3	Good	70-79
4	Very good	80-89
5	Excellent	90-100

Source: Modified from Hoisrijan (2018)

โครงการนำร่องในการประเมินค่าความปลอดภัยในงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปมี 3 โครงการ ดังนี้
1) โครงการ *A* โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าความยาว 34.5 กิโลเมตร จำนวน 30 สถานีโดยมีรัฐและเอกชนร่วมลงทุน
2) โครงการ B โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าความยาว 30.4 กิโลเมตร จำนวน 23 สถานีโดยมีรัฐและเอกชนร่วมลงทุน
3) โครงการ C โครงการก่อสร้างสะพานข้ามทางรถไฟ ของภาครัฐบาล

การจัดทำแนวปฏิบัติในการตรวจสอบความปลอดภัยในการติดตั้ง

งานวิจัยนี้ได้จัดทำแนวปฏิบัติในการตรวจสอบขั้นตอนการติดตั้งและนำไปถ่ายทอดให้ผู้รับผิดชอบโครงการที่มีผลการประเมินความปลอดภัยในระดับที่ได้คะแนนน้อยที่สุด
แนวปฏิบัติด้านความปลอดภัย ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและบุคลากร ประกอบด้วย คุณสมบัติของผู้ปฏิบัติงานและบุคลากร หน้าที่และความรับผิดชอบของเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย (จป.) และการแต่งกายขณะปฏิบัติงานรูปแบบต่างๆและการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล

ส่วนที่ 2 ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยในการประเมินความเสี่ยง ประกอบด้วย การประเมินความเสี่ยงของงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปกับโครงสร้างส่วนบน ระบบการจัดการความปลอดภัยการบริหารงานประจำวัน (Daily Management) การควบคุมระดับแอลกอฮอล์และสารเสพติดของผู้ปฏิบัติงาน ข้อบังคับหรือกฎความปลอดภัย การรายงานอุบัติเหตุ

ส่วนที่ 3 ข้อกำหนดความปลอดภัยของสถานที่และอุปกรณ์ ประกอบด้วย มาตรการป้องกันการตกของสถานที่ปฏิบัติงาน (กรณีผู้ปฏิบัติงานตกจากที่สูง) มาตรการลดและควบคุมความเสี่ยงงานยกและติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูป

ส่วนที่ 4 การพิจารณาโทษในกรณีผู้ปฏิบัติงานไม่ปฏิบัติตามข้อบังคับ หรือกฎความปลอดภัย

การถ่ายทอดให้ผู้รับผิดชอบโครงการนำร่องเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำไปสู่การปฏิบัติ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำแนวปฏิบัติไปถ่ายทอดและทำการประเมินผลการปรับปรุงการปฏิบัติงานด้านความปลอดภัยของโครงการนำร่องอีกครั้ง เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำแนวทางปฏิบัติงานดังกล่าวไปสู่การปฏิบัติและการเผยแพร่ต่อไป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการประเมินความปลอดภัยครั้งแรกกับโครงการนำร่อง 3 โครงการ พบว่าโครงการ A มีคะแนนความปลอดภัยร้อยละ 88 และโครงการ B มีคะแนนความปลอดภัยร้อยละ 89 ซึ่งจัดอยู่ในระดับ Very good โครงการ C มีค่าคะแนนความปลอดภัยร้อยละ 66 ซึ่งจัดอยู่ในระดับ Fair ผลการประเมินรายละเอียดในแต่ละส่วนพบว่าโครงการ C มีค่าความปลอดภัยของส่วนที่ 2 (การประเมินความเสี่ยง และกิจกรรมความปลอดภัยประจำวัน) อยู่ในระดับ 60–69 คะแนน และมีค่าความปลอดภัยของส่วนที่ 3 (ข้อกำหนดด้านสถานที่และอุปกรณ์) อยู่ในระดับ 0–59 คะแนน แสดงดัง Fig. 1

ผลการวิเคราะห์ส่วนที่ 1 (ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน) พบว่าโครงการ C มีค่าความปลอดภัยหัวข้อ 1.1 คุณสมบัติของผู้ปฏิบัติงานและบุคลากร และ 1.3 พฤติกรรมของผู้ปฏิบัติงาน อยู่ในระดับ 60–69 คะแนน เป็นผลมาจากการพบข้อบกพร่อง กรณีผู้ปฏิบัติงานบนที่สูงไม่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันการตก ไม่มีการคล้องเกี่ยวกับจุดยึดตรึง และผู้ปฏิบัติงานไม่ได้รับการอบรมความปลอดภัยเบื้องต้นก่อนเริ่มงาน แสดงดัง Fig. 2

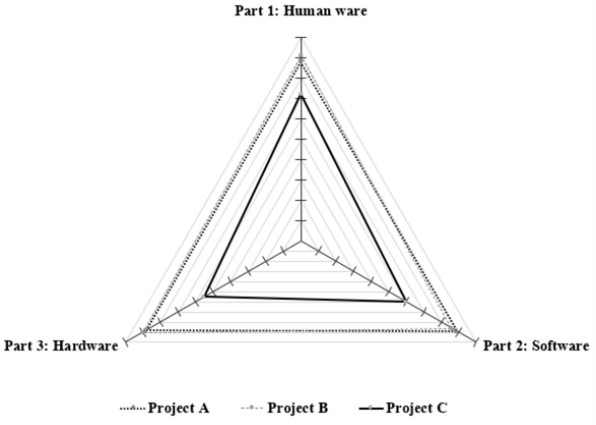


Fig. 1 Safety Scores in Each Part of Each Project

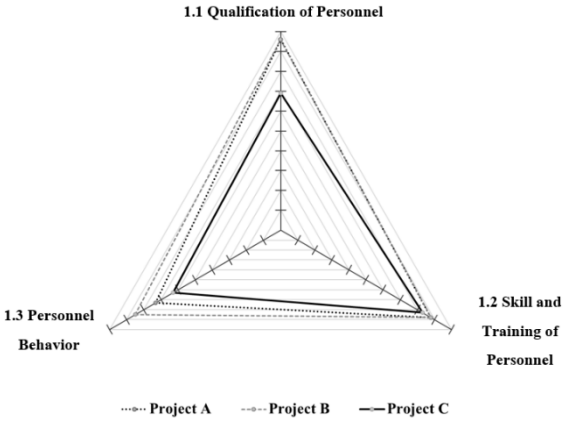


Fig. 2 Personnel Safety Requirements

ผลการวิเคราะห์ส่วนที่ 2 (การประเมินความเสี่ยงและกิจกรรมความปลอดภัยประจำวัน) พบว่าโครงการ C มีค่าความปลอดภัยหัวข้อ 2.2 การบริหารงานประจำวัน อยู่ในระดับ 0–59 คะแนน เป็นผลมาจากข้อบกพร่องกรณีไม่มีการตรวจความปลอดภัยของ เครื่องมือและนั่งร้าน ไม่มีการทำ 5ส. เป็นประจำทุกวัน และไม่พบการนำ

มาตรการความปลอดภัยจากผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงของงานมาสื่อสารให้ผู้ปฏิบัติงานทราบก่อนเริ่มงาน แสดงดัง Fig. 3

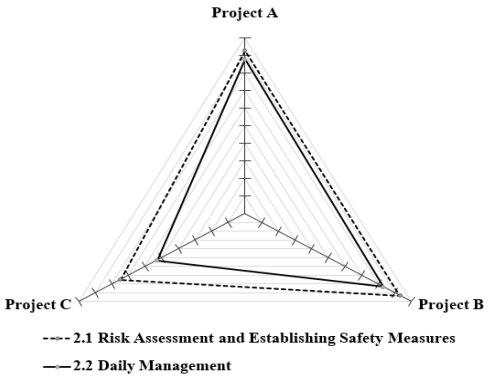


Fig. 3 Risk Assessment and Daily Safety Activities

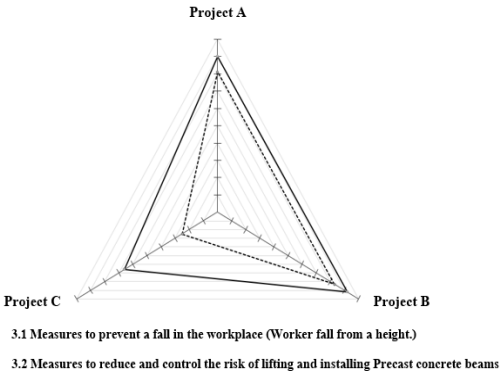


Fig. 4 Location and Equipment Requirements

ผลการวิเคราะห์ส่วนที่ 3 (ข้อกำหนดด้านสถานที่และอุปกรณ์) พบว่าโครงการ C มีค่าความปลอดภัยของหัวข้อ 3.1 มาตรการป้องกันการตกของสถานที่ทำงาน (ผู้ปฏิบัติงานตกจากที่สูง) อยู่ในระดับ 0–59 คะแนน เป็นผลมาจากการพบข้อบกพร่อง กรณีมีการติดตั้งราวกันตกและจัดเตรียมจุดยึดตรึงสายช่วยชีวิตที่ไม่ได้ตามมาตรฐานความปลอดภัย และหัวข้อ 3.2 มาตรการลดและควบคุมความเสี่ยงงานยกและติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปอยู่ในระดับ 60–69 คะแนน เป็นผลมาจากการพบข้อบกพร่องกรณีไม่มีการติดตั้งตาข่ายกันตก และไม่มีการติดตั้งค้ำยันเพื่อป้องกันคานคอนกรีตสำเร็จรูปพลิกคว่ำก่อนการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ แสดงดัง Fig. 4

หลังทำการประเมินและวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยกับโครงการนำร่องครั้งแรก ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขตามหัวข้อที่มีค่าความปลอดภัยต่ำต่อโครงการ C และประเมินค่าความปลอดภัยอีกครั้งหลังจากโครงการทำการแก้ไข โดยสามารถเพิ่มค่าความปลอดภัยจากร้อยละ 66 ซึ่งอยู่ในระดับ Fair เป็นร้อยละ 80.15 ซึ่งอยู่ในระดับ Very good

สรุป

งานวิจัยนี้ได้จัดทำแบบประเมินความปลอดภัยของงานติดตั้งคานคอนกรีตสำเร็จรูปกับโครงสร้างส่วนบนและแนวปฏิบัติในการตรวจสอบขั้นตอนการติดตั้งให้แก่โครงการนำร่องและประเมินผลการใช้แนวปฏิบัติ โดยผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าแต่ละโครงการมีขั้นตอนปฏิบัติในด้านความปลอดภัยที่แตกต่างกัน และแนวปฏิบัติที่นำเสนอจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานในโครงการนำร่องได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องต่อความเสี่ยงของงาน ผลการวิจัยพบว่า 1 ใน 3 ของโครงการนำร่องมีค่าความปลอดภัยอยู่ในระดับ Fair โดยเป็นผลจากการพบข้อบกพร่องกรณีผู้ปฏิบัติงานบนที่สูงไม่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันการตกและอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล ไม่มีการคล้องเกี่ยวกับจุดยึดตรึงขณะปฏิบัติงาน อีกทั้งยังมีปัจจัยภายนอก คือ มูลค่าของโครงการก่อสร้างที่แตกต่างกันและความพร้อมในเรื่องเครื่องมือ เครื่องจักร ในการทำงาน แนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยที่ได้จัดทำขึ้นนั้นเมื่อได้นำเสนอต่อโครงการนำร่อง สามารถเพิ่มค่าความปลอดภัยของโครงการให้อยู่ในระดับ Very good คือมีระบบและการดำเนินการที่ดี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บริษัท บีทีเอสอินฟราสตัคเจอร์ ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด และกรมทางหลวง (กระทรวงคมนาคม) ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. 2560. คู่มือการฝึกอบรมหลักสูตรเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในการทำงานระดับหัวหน้างาน. พิมพ์ครั้งที่ 1.

ผู้จัดการออนไลน์. 2562. คานสร้างสะพานมอเตอร์เวย์โคราชถล่ม. https://mgronline.com/local/detail/9620000050004, 10 มีนาคม 2564.

มติชนออนไลน์. 2561. คานสะพานลอยร่วงขวางถนนเส้น รังสิต-นครนายก. https://www.matichon.co.th/local/news_869102, 6 มีนาคม 2564

ราชกิจจานุเบกษา. 2534. ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานใน สถานที่ที่มีอันตรายจากการตกจากที่สูง วัสดุกระเด็น ตกหล่น และการพังทลาย. เล่ม 108 ตอนที่ 200.

ราชกิจจานุเบกษา. 2553. ประกาศจากกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการ การใช้เชือกลวดสลิง และรอก พ.ศ. 2553. เล่ม 127 ตอนพิเศษ 145 ง, หน้า 57–60.

ราชกิจจานุเบกษา. 2554. พระราชบัญญัติความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ.2554. เล่ม 128 ตอนที่ 4 ก, หน้า 5–25.

รุจิโรจน์ หอยศรีจันทร์. 2561. แนวทางการประเมินความปลอดภัยในงานติดตั้งผนังคอนกรีตสำเร็จรูปกับอาคารสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิศกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2561. มาตรฐานความปลอดภัยในงานก่อสร้างเล่ม 1 ความปลอดภัยในเรื่องการจัดการทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิศกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2561. มาตรฐานความปลอดภัยในงานก่อสร้างเล่ม 2 ความปลอดภัยในการใช้เครื่องมือและเครื่องจักร. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน. 2563. สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน. https://www.tosh.or.th/index.php/blog/item/761-2020-07-30-08-40-04, 29 มีนาคม 2564.

สำนักงานกองทุนเงินทดแทน. 2563. สถานการณ์การประสบอันตรายหรือเจ็บป่วย เนื่องจากการทำงาน ปี 2558–2562. https://www.sso.go.th/wpr/main, 19 มกราคม 2564.

หน่วยงานความปลอดภัย. 2560. คู่มือการทำงานบนที่สูง. บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) , กรุงเทพฯ.

หน่วยงานอาชีวอนามัยและความปลอดภัย. 2562. มาตรการและการตรวจสอบด้านความปลอดภัย. บริษัท ซิโน-ไทย เอ็นจีเนียริ่งแอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

Flin, R., Mearns, K., O'Connor, P., Bryden, R. 2000. Measuring safety climate: Identifying the common features. Safety science: 34: 177–192.

Heinrich, H.W. 1941. Industrial Accident Prevention, 2nd ed. McGraw-Hill book Company. New York, NY, USA.

Hollnagel, E., Woods, D., Leveson, N. 2006. Resilience engineering concepts and precepts. Ashgate Publishing Company. Burlington, VT, USA.

Hollnagel, E. 2016. Barriers and Accident Prevention. Routledge Publishing Company. London, UK.

การศึกษาปัญหาที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่

A study of problems affecting effectiveness of quality control for large-scale irrigation structure

ภูริณัฐ ดวงจักร์, พิพัฒน์ สอนวงษ์*, ชวเลข วณิชเวทิน

Purinat Duangjak, Pipat Sornwong*, Chavalek Vanichavetin

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: Purinat.du@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่ จึงได้ศึกษาปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทานช่วงก่อนและระหว่างการก่อสร้าง โดยใช้การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบพหุหลักเกณฑ์ ด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP) การศึกษาทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสอบถามบุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการก่อสร้าง จำนวน 10 คน ซึ่งเป็นผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการก่อสร้างชลประทานขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุดและจัดลำดับความสำคัญของปัญหา จากการวิเคราะห์พบว่าปัญหา 3 อันดับแรกที่เกิดขึ้น คือ (1) ด้านมวลชน (2) ด้านการเงิน (3) ด้านบุคคลและการปฏิบัติงาน ทั้งนี้ ผลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถนำไปปรับใช้กับกระบวนการตัดสินใจในการดำเนินการก่อสร้างอาคารชลประทาน เพื่อให้สามารถดำเนินงานตามภารกิจของกรมชลประทานในการพัฒนาแหล่งน้ำและเพิ่มพื้นที่ชลประทาน บริหารจัดการน้ำ ป้องกันและบรรเทาภัยจากน้ำให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, คุณภาพงานก่อสร้าง, ประสิทธิภาพ, อาคารชลประทาน

Abstract

The objective of this research is to study on problems that affecting to the efficiency of the quality control of large irrigation building projects construction. Therefore, this research studied study the issues that occurred between before the construction and constructing. The method of this research is a questionnaire. The questionnaire is collected from 10 person who related to the management of large-scale irrigation projects, in order to get precisely information. Next to ranking procress the frequency and severity of each factors that occurred. From the literature reviewed found that the top 3 problems that occurred were (1) Mass (2) Finance (3) People and Operations, respectively. The result of this study can be used to making decisions on irrigation projects construction. As a result, this study can improved the construction quality control of Royal Irrigation Department (RID). To ensure that the development of water resources, irrigation area expansion, water management, and flood prevention efficiency will be improved.

Keywords: Analytical Hierarchy Process, efficiency, irrigation building, quality construction

คำนำ

กรมชลประทานมีหน่วยงานภายในกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ มีพื้นที่ในการกำกับดูแล 27.32 ล้านไร่ และมีการพัฒนาแหล่งน้ำเพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี เพื่อให้เกษตรกรได้รับน้ำอย่างเพียงพอในช่วงฤดูแล้ง และช่วยป้องกันบรรเทาภัยจากปัญหาน้ำท่วมในช่วงฤดูฝน

โครงการชลประทานขนาดใหญ่เป็นงานชลประทานอเนกประสงค์ที่สามารถก่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านการเกษตร การอุปโภคบริโภค การบรรเทาอุทกภัย การอุตสาหกรรม การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังน้ำ การคมนาคม แหล่งเพาะพันธุ์ประมงน้ำจืด แหล่งท่องเที่ยวพักผ่อนหย่อนใจ และอื่นๆ ในแต่ละโครงการมีงานก่อสร้างหลายประเภท เช่น เขื่อนเก็บกักน้ำ เขื่อนหรือฝายทดน้ำ การสูบน้ำ ระบบส่งน้ำ ระบบระบายน้ำ ระบบชลประทานในแปลงนา ถ้าเป็นการก่อสร้างประเภทเขื่อนเก็บกักน้ำ สามารถเก็บกักน้ำได้ตั้งแต่ 100 ล้านลูกบาศก์เมตรขึ้นไป หรือมีพื้นที่อ่างเก็บน้ำตั้งแต่ 15 ตารางกิโลเมตรขึ้นไป หรือโครงการชลประทานที่มีพื้นที่การชลประทานตั้งแต่ 80,000 ไร่ขึ้นไป รวมทั้งโครงการที่มีวงเงินค่าก่อสร้างมากกว่า 1,000 ล้านบาทขึ้นไป ก่อนเริ่มดำเนินโครงการจะต้องเสนอคณะรัฐมนตรีพิจารณาอนุมัติเปิดโครงการตามมาตรา 4 (8) ของพระราชกฤษฎีกาว่าด้วยการเสนอเรื่องต่อคณะรัฐมนตรีและการประชุมคณะรัฐมนตรี พ.ศ. 2548 ทั้งนี้ โครงการชลประทานขนาดใหญ่มีลักษณะและองค์ประกอบของโครงการมาก ใช้งบประมาณสูง อีกทั้งกระบวนการก่อสร้างเกี่ยวข้องกับหน่วยงานและราษฎรเป็นจำนวนมาก เช่น การจัดหาที่ดินของราษฎรที่ได้รับผลกระทบในการดำเนินโครงการ หรือที่ดินของเอกชน ซึ่งดำเนินการทั้งการจัดซื้อโดยวิธีปรองดอง และวิธีการขอออกพระราชกฤษฎีกาเวนคืนที่ดิน ต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินงาน ส่งผลให้การดำเนินการก่อสร้างโครงการต้องใช้ระยะเวลายาวนานด้วย อีกทั้งการก่อสร้างต้องใช้ความชำนาญในการควบคุม เพื่อให้แผนงาน/โครงการบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

อย่างไรก็ดีโครงการก่อสร้างอาคารชลประทานขนาดใหญ่ มักจะมีอุปสรรคในการก่อสร้าง โดยจากการพิจารณาผลการดำเนินงานโครงการก่อสร้างอาคารชลประทานขนาดใหญ่เกิดความล่าช้าในการดำเนินการ ทำให้ส่งผลที่ไม่เป็นผลดีต่อทุกฝ่ายที่ทำงานร่วมกันในโครงการ อีกทั้งยังทำให้ประชาชนผู้ใช้น้ำหรือประชาชนโดยรอบพื้นที่เกิดความเดือดร้อนในเรื่องของการขาดแคลนน้ำหรือได้รับผลกระทบจากปัญหาน้ำท่วม

โดยกรมชลประทานมีนโยบายขับเคลื่อนโครงการที่ดำเนินการยังไม่แล้วเสร็จ เนื่องจากอุปสรรคที่เกิด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่ เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนการทำงานก่อสร้างอาคารชลประทานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และยังช่วยลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในการดำเนินการก่อสร้างของกรมชลประทาน

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการศึกษาการจัดลำดับ ปัญหาที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่ เพื่อทราบถึงปัญหาที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน และทราบลำดับความสำคัญของปัญหาเหล่านั้นว่ามีผลกระทบมากน้อยเพียงใด โดยมีแนวทางกระบวนการในการทำวิจัยด้วยวิธีการ วิเคราะห์เชิงลำดับ

(Analytical Hierarchy Process: AHP) เพื่อกำหนดเกณฑ์ในการตัดสินใจและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

การกำหนดปัญหาที่ใช้ในการเลือกเป็นเกณฑ์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการศึกษาปัญหาที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่

การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและผู้เชี่ยวชาญ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง คือ บุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการก่อสร้างของกรมชลประทาน จำนวน 10 คน ซึ่งเป็นผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการก่อสร้างชลประทานขนาดใหญ่ โดยผู้ตอบแบบสอบถามคือผู้เชี่ยวชาญ (Expert) ซึ่งเป็นผู้บริหาร ผู้ออกแบบ และผู้ควบคุมงาน ซึ่งเป็นผู้มีประสบการณ์ในงานก่อสร้างชลประทานขนาดใหญ่

การเก็บรวบรวมข้อมูล

นำแบบสัมภาษณ์ดังกล่าวกลับไปสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญโดยในส่วนของการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยด้านต่างๆ นั้นจะให้ผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบเกณฑ์หรือปัจจัยทีละคู่ โดยคำอธิบายส่วนตัวเลขในการระบุระดับความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยดังแสดงใน Table 1

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ผู้ทำการศึกษา ได้คัดเลือกโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการตัดสินใจจากข้อมูลที่ได้ จากวิธีการใช้แบบสอบถาม ของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP)

1. กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น(Analytic Hierarchy Process: AHP) เป็นเทคนิคที่ที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจ โดยใช้การแบ่งองค์ประกอบปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปแผนภูมิลำดับชั้น จากนั้นนำมาให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบ แล้วนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อนำไปสู่การจัดลำดับค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือก

1.1 การสลายปัญหาที่ซับซ้อน (Decomposition) ดำเนินการให้อยู่ในรูปของแผนภูมิโครงสร้างที่เป็นลำดับชั้น (Hierarchy Structure) แต่ละระดับชั้นประกอบด้วยเกณฑ์การตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้น ระดับชั้นบนสุดเรียกว่าเป้าหมายโดยรวม ซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้นระดับชั้นที่ 2 อาจมีหลายปัจจัย ขึ้นอยู่กับจำนวนระดับชั้นทั้งหมดของแผนภูมิ ปัจจัยต่างๆ ในระดับชั้นเดียวกันต้องมีความสำคัญเท่ากัน ถ้าระดับชั้นใดมีปัจจัยที่มีความสำคัญแตกต่างกันมากควรแยกปัจจัยที่สำคัญน้อยกว่าให้ลงไปอยู่ระดับชั้นถัดไป

1.2 การหาลำดับความสำคัญ (Prioritization) ดำเนินการโดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทีละคู่ (Pairwise Comparison) จากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเกณฑ์การตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นด้วยวิธี Principle of Hierarchic Composition ผลการวินิจฉัยจะถูกแสดงออกมาในรูปมาตราส่วนของระดับความสำคัญที่เป็นตัวเลข 1 ถึง 9 (แสดงใน Table 1) โดยแสดงอยู่ในรูปแบบตารางเมตริกซ์ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเปรียบเทียบในลักษณะเป็นคู่ หรือจับคู่ ซึ่งสามารถตรวจสอบความสอดคล้องกันของการวินิจฉัย และสามารถวิเคราะห์ความอ่อนไหวของลำดับความสำคัญเมื่อการวินิจฉัยเปลี่ยนแปลงไปได้อีกด้วย

Table 1 Ranking of weightiness

Ranking of weightiness	Meaning
1	Equally Important
3	Moderately More Important
5	(Strongly More Important
7	Very Strongly More Important
9	Extremely More Important
2, 4, 6, 8	Intermediate Judgment Value

1.3 การสังเคราะห์ (Synthesis) ดำเนินการโดยพิจารณาลำดับความสำคัญทั้งหมด จากการเปรียบเทียบว่าทางเลือกใดสมควรได้รับเลือก

1.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทางเลือกที่มีต่อปัจจัยในการวินิจฉัย (Sensitive Analysis) จะดำเนินการภายหลังจากเสร็จจากกระบวนการทั้งหมด เป็นการพิจารณาว่าเมื่อข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านเกณฑ์การตัดสินใจหรือปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง จะทำให้อันดับความสำคัญของทางเลือกมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้สามารถวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัยที่เป็นผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่ได้ดังนี้

Table 2 List of weightiness factors affecting to the quality of large-scale irrigation structure

Example	People and Operations [A]	Contract and Document management [B]	The project site and its topography [C]	Machine [D]	Financial [E]	Mass [F]	Consistency Ratio [C.R.]
1	0.1524	0.1002	0.0508	0.2104	0.1152	0.3710	0.0989
2	0.3105	0.1632	0.0415	0.2985	0.1128	0.0734	0.0862
3	0.0271	0.0987	0.2348	0.1419	0.0472	0.4504	0.0907
4	0.0617	0.1121	0.0247	0.0721	0.4600	0.2694	0.0894
5	0.2590	0.2349	0.0783	0.1061	0.0728	0.2488	0.0826
6	0.4082	0.2134	0.1234	0.1503	0.0722	0.0324	0.0768
7	0.1365	0.1052	0.0472	0.2187	0.4474	0.0450	0.0652
8	0.0893	0.0299	0.1132	0.0740	0.2596	0.4340	0.0802
9	0.3405	0.1486	0.0356	0.0513	0.3462	0.0780	0.0833
10	0.0296	0.1270	0.2518	0.0459	0.0697	0.4759	0.0936
Geometric mean	0.1690	0.1563	0.0994	0.1445	0.1986	0.2322	1.0000

Table 3 Average weightiness ranking of minor factors affecting to the quality of large-scale irrigation structure

Main decision criteria	Sub-decision criteria
1. People and Operations [A] (0.1690)	➢ The problem of insufficient human labor for the amount of construction work. [A1] (0.0766) ➢ Problems in communication/coordination of all parties involved in the project. [A2] (0.1345) ➢ Problem of delegating duties for controlling multiple projects. Affect the performance of job control duties. [A3] (0.0921) ➢ Labor problems lacking skills to work. [A4] (0.0873) ➢ The problem of stopping work or delaying the work of the contractor during the construction. Making it unable to perform the work as planned. [A5] (0.1343) ➢ Problem: There is no construction work plan / human labor plan / tooling plan. Or has been prepared, but does not correspond to the nature of work and the season. [A6] (0.2879)

Table 3 (continued).

Main decision criteria	Sub-decision criteria
	➢ The problem of lack of knowledge and understanding in the work procedures according to the specified Work Instruction. [A7] (0.1872)
2. Contract and Document management [B] (0.1563)	➢ The problem of unclear scope of work in the construction tender documents. [B1] (0.1079)
	➢ Problems to compete / undercut Between contractors. [B2] (0.0776)
	➢ Problem of lack of qualification examination system for contractors submitted for bidding. [B3] (0.0638)
	➢ Problems lacking guidelines / forms / conditions In selecting suitable contractors (eg contractors with a large number of original responsibilities, should not be allowed to participate in bidding, etc.). [B4] (0.0810)
	➢ The problem of editing contracts during construction. [B5] (0.2136)
	➢ The problem of solving the construction drawings in accordance with the conditions of the area and the needs of the people in the area. [B6] (0.2035)
	➢ Problem of termination of the contract during construction. [B7] (0.2525)
3. The project site and its topography [C] (0.0994)	➢ Problems of changes in the general condition of the area have changed from the original, for example, geological conditions, community prosperity. [C1] (0.2200)
	➢ Terrain problems make it difficult to enter the construction site. [C2] (0.1018)
	➢ Area problems such as agricultural land reform office area, reserved forest area, park forest area, etc. [C3] (0.6782)
4. Machine [D] (0.1445)	➢ The contractor brings machines and tools into the work that does not go as planned. [D1] (0.7660)
	➢ Problems that the machines used by the contractors are in disrepair. [D2] (0.2340)
5. Financial [E] (0.1986)	➢ The problem of higher wages. [E1] (0.0712)
	➢ Problems raising or lowering the budget limit. [E2] (0.0909)
	➢ The problem of lack of planning in the construction budget. [E3] (0.2172)
	➢ Problems in the financial liquidity of the contractor. [E4] (0.3996)
	➢ The budgeting problem is inconsistent with the facts. [E5] (0.2211)
6. Mass [F] (0.2322)	➢ The problem of lack of public relations and promoting community participation. [F1] (0.3016)
	➢ The conflict with the villagers living in the project area. [F2] (0.3467)
	➢ Problems from opposition from Non Governmental Organizations (NGOs). [F3] (0.3517)

สรุป

การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP) ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่ ได้คำนวณค่าน้ำหนักคะแนนตามกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ โดยคำนวณแยกตามปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย และมีการคำนวณคะแนนตามสูตรคำนวณเพื่อหาคะแนนรวมและนำคะแนนรวมที่ได้มาจัดลำดับผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษาโครงการชลประทานขนาดใหญ่ จากการวิเคราะห์พบว่าปัญหา 3 อันดับแรกที่เกิดขึ้น คือ 1) ด้านมวลชน (0.2322)โดยมีเกณฑ์ย่อยเรียงตามน้ำหนักความสำคัญดังนี้ 1.1)ปัญหาจากการต่อต้านจากองค์กรอิสระ (NGOs) [F3] (0.3517) 1.2) ปัญหาความขัดแย้งกับชาวบ้านที่อาศัยอยู่ในเขตพื้นที่โครงการ [F2] (0.3467) 1.3) ปัญหาการขาดการประชาสัมพันธ์และส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชน [F1] (0.3016) 2) ด้านการเงิน (0.1986) โดยมีเกณฑ์ย่อยเรียงตามน้ำหนักความสำคัญดังนี้ 2.1) ปัญหาด้านสภาพคล่องด้านการเงินของผู้รับจ้าง [E4] (0.3996) 2.2) ปัญหาการตั้งงบประมาณไม่สอดคล้องกับข้อเท็จจริง [E5] (0.2211) 2.3) ปัญหาการขาดการวางแผนในการใช้งบประมาณก่อสร้าง [E3] (0.2172) 3) ด้านบุคคลและการปฏิบัติงาน (0.1690) โดยมีเกณฑ์ย่อยเรียงตามน้ำหนักความสำคัญดังนี้ 3.1) ปัญหาไม่มีการจัดทำแผนปฏิบัติงานก่อสร้าง/แผนการใช้แรงงานคน/แผนการใช้งานเครื่องจักรเครื่องมือ หรือมีการจัดทำแต่ไม่สอดคล้องกับลักษณะงานและฤดูกาล [A6] (0.2879) 3.2) ปัญหาด้านการสื่อสาร/ประสานงานไม่ตรงกันของทุกฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการ [A2] (0.1345) 3.3) ปัญหาการหยุดงานหรือชะลองานของผู้รับจ้างในระหว่างการก่อสร้าง ทำให้ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ตามแผนที่วางไว้ [A5] (0.1343) ดังนั้นปัญหาอันดับแรกที่เกิดขึ้น คือ ด้านมวลชน แนวทางแก้ไข ควรมีการทำประชาพิจารณ์ให้ได้รับความคิดเห็นจากประชาชนทุกหมู่เหล่า และทำในวงกว้างเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่สะท้อนความคิดเห็นจากประชาชนอย่างแท้จริง ต้องแสดงให้เห็นว่าพวกเขาเหล่านั้นจะมีส่วนได้โดยตรงจากการก่อสร้างโครงการชลประทานขนาดใหญ่ ก็จะสามารถหักล้างความกังวลต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้ ผลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถนำไปปรับใช้กับกระบวนการตัดสินใจในการดำเนินการก่อสร้างอาคารชลประทาน เพื่อให้สามารถดำเนินงานตามภารกิจของกรมชลประทานในการพัฒนาแหล่งน้ำและเพิ่มพื้นที่ชลประทาน บริหารจัดการน้ำ ป้องกันและบรรเทาภัยจากน้ำให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ รศ.ร.อ. พิพัฒน์ สอนวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั้งการทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ชวเลข วณิชเวทิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยชี้แนะแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่มีคุณค่ายิ่ง ขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ และกรมชลประทานที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่ใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

เอกสารอ้างอิง

เดชา ผลรุ่งเรือง, สันติ ชินานุวัติวงศ์. 2561. การศึกษาปัจจัยที่สำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างโรงไฟฟ้าพระนครเหนือ ชุดที่ 2. วิศวกรรมสาร มก.

ธเนศ อักษร. 2556. การศึกษาแนวทางเพื่อเพิ่มสมรรถนะการบริหารและจัดการสัญญาก่อสร้างในกรมชลประทาน: กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่. ชลสารกรมชลประทาน. สำนักวิจัยและพัฒนา, กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ.

นรินทร์ เอื้อศิริวรรณ, วิกรม พนิชการ, ดำรงค์ รังสรรค์, อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ. 2560. การกำหนดหลักเกณฑ์คัดเลือกตำแหน่งที่เหมาะสม สำหรับการจัดตั้งสถานีตรวจสอบน้ำหนักโดยการใช้ทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP). วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ปีที่ 7 ฉบับที่ 1, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต, กรุงเทพฯ.

ปรีชา วิลัยวงค์. 2560. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างถนนโดยประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ กรณีศึกษาการก่อสร้างถนนโครงการกังหันลม ตำบลวะตะแบก อำเภอเทพสถิต จังหวัดชัยภูมิ. คลังปัญญามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

พรรษมล เทียนพูล, อภิชาต ประสิทธิ์สม. 2561. ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินงานโครงการก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษา: โครงการก่อสร้างอาคารชลประทาน ของสำนักงานชลประทานที่ 9. วารสารเกษมบัณฑิตวิศวกรรมเล่ม 8: 2.

แขนกลร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

2D sketching robotic arm controlled by programmable logic controller

ชลัมพล เวสารัชประเสริฐ*, ไพโรจน์ ทองประศรี

Chalumpol Wesaruchprasert*, Pairote Thongprasri

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: chalumpol.we@ku.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแขนกลแบบคาร์ทิเชียนสำหรับร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ภาษา LD และ ST แขนกลแกน X และแกน Y ใช้มอเตอร์ชนิดเซอร์โวในการขับเคลื่อนบอลสกรูที่ติดตั้งกับรางสไลด์ แกน Z ใช้วาล์วชนิดโซลินอยด์ยึดติดกับปากกาสำหรับยกขึ้นหรือลง แขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน X และแกน Y ไม่เกิน 48 เซนติเมตร ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกน X แกน Y และแกน Z ถูกแปลงจากรูปภาพต้นแบบโดยใช้โปรแกรม ALL TO G-Code Converter ขอบเขตการร่างภาพไม่เกินขนาดของกระดาษ A3 ผลการทดลองแขนกลสามารถร่างภาพได้เหมือนภาพต้นแบบเมื่อใช้อุปกรณ์ในการร่างภาพเป็นปากกาลูกลื่นหรือปากกาเมจิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ความยาว 11 เซนติเมตร การเร่งความเร็วในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ชนิดเซอร์โวแกน X และแกน Y สามารถกำหนดผ่านคำสั่ง Set_LI ผลการทดสอบค่าสูงสุดไม่เกิน 60,000 ซึ่งภาพที่ร่างออกมาสมบูรณ์และใช้เวลาในการร่างภาพสั้น

คำสำคัญ: แขนกลแบบคาร์ทีเซียน, เซอร์โวมอเตอร์, โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

Abstract

This paper presents a cartesian robotic arm for 2D sketching controlled by programmable logic controller using LD and ST languages. The X- and Y-axis robotic arms use a servo motor to drive a ball screw mounted on a slide rail. The Z-axis uses a solenoid valve attached to the pen for lifting up or down. The robotic arm can move not more than 48 centimeters in the X and Y axes. The displacement of X, Y, and Z axis was converted from the prototype image using the ALL TO G-Code Converter. The sketching area does not exceed the size of A3 paper. Experimental results, the robotic arm can sketch like the prototype image when uses a drawing device as a ballpoint pen or a magic pen with a diameter of 0.8 centimeters and a length of 11 centimeters. The acceleration speed for position control of the X-axis and Y-axis servo motors can be set through the Set_LI command. The maximum value of the test results is not more than 60,000, which the sketch is complete and it takes a short time to sketch.

Keywords: cartesian robotic arm, programmable logic controller, servo motor

คำนำ

การนำแขนกลหรือหุ่นยนต์มาช่วยงานทางด้านอุตสาหกรรมและด้านอื่นๆ อย่างหลากหลาย เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง หรือสามารถทำงานแบบเดิมซ้ำๆ กันตลอดเวลาได้ไม่ว่าจะเป็นงานที่เสี่ยงอันตรายทั้งในด้านสารเคมีและด้านพื้นที่เสี่ยง งานที่ต้องการความละเอียดสูงหรือต้องการความแม่นยำ (Haider et al., 2011) หุ่นยนต์ชื่อ RPP ได้รับการออกแบบและผลิตภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ “ Lucian Blaga” University of Sibiu วิธีการควบคุมหุ่นยนต์ได้นำเสนอแนวทางการใช้งานร่วมกันระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic Control: PLC) (Laurean, 2012) การสร้างแบบจำลองและการประดิษฐ์ระบบแขนกลแบบ 3 ข้อต่อ สำหรับกิจกรรมการวาดภาพ แขนกลสามารถยกหรือนำปากกามาวาดเขียนตามไฟล์ภาพอินพุตที่จัดเตรียมไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ ตัวควบคุมเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ด Arduino UNO และมอเตอร์ชนิดเซอร์โว (Baid and Kumar, 2016) หุ่นยนต์ PAUL ได้ถูกออแบบสำหรับวาดภาพร่างโดยใช้มนุษย์เป็นแบบ แขนกลมีลักษณะเป็นแบบ 3 ข้อต่อ เทคนิคการควบคุมให้แขนกลร่างภาพใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพ (Tresset and Fol Leymarie, 2012) หุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (cartesian) แกนทั้ง 3 ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น ถ้าโครงสร้างมีลักษณะคล้าย Overhead Crane จะเรียกว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิด gantry แต่ถ้าหุ่นยนต์ไม่มีขาตั้งหรือขาเป็นแบบอื่น เรียกว่าหุ่นยนต์ชนิด Cartesian (Mole, 2017) โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ โดยมีไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวควบคุม มีส่วนอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถนำไปประกอบใช้กับอุปกรณ์ได้หลากหลายประเภท นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการสั่นสะเทือน อุณหภูมิ และความชื้นได้ดี (Kopte1, 2015)

บทความนี้นำเสนอแขนกลสำหรับร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ แขนกลที่ใช้โครงสร้างเป็นแบบคาร์ทีเซียน การเคลื่อนที่ของแขนกลแนวแกน X และแกน Y ถูกควบคุมด้วยมอเตอร์เซอร์โว ส่วนแกน Y เป็นส่วนที่ยึดจับอุปกรณ์ร่างภาพโดยการเคลื่อนที่ขึ้นลงถูกควบคุมโดยวาล์วชนิดโซลินอยด์ การควบคุมมอเตอร์ทั้ง 3 แกนถูกควบคุมผ่านโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ โดยโครงสร้างของคำสั่งที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเป็นภาษาแบบแผนภาพบันได (Ladder Diagram : LD) ร่วมกับภาษาระดับสูงที่มีโครงสร้างแบบข้อความ (Structure Text : ST) ตำแหน่งการทำงานของแกน X, Y และ Z ถูกแปลงมาจากรูปภาพต้นแบบด้วยโปรแกรม All To G-Code Converter

อุปกรณ์และวิธีการ

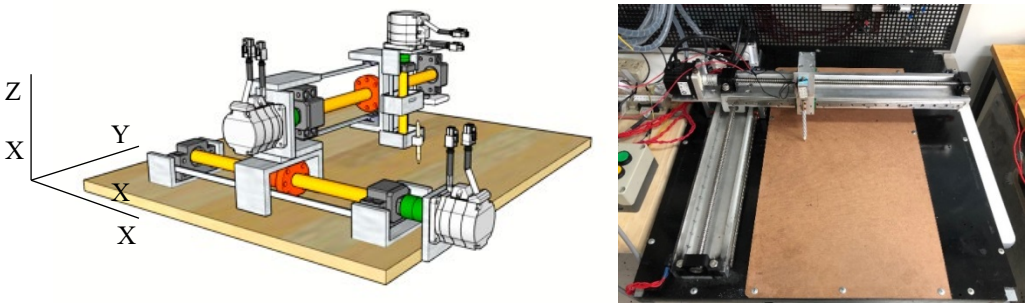


Fig. 1 Structure of 2D sketching Robotic Arm

โครงสร้างของแขนกลเป็นแบบคาร์ทีเซียนโดยมีแกน X, Y และ Z เคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของแขนกลในแนวแกน X และ Y ใช้มอเตอร์ชนิดเซอร์โวเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนบอลสกูรที่ติดตั้งบนรางสไลด์ สำหรับแขนกลแกน Z ใช้วาล์วชนิดโซลินอยด์เป็นตัวยกอุปกรณ์ในการเขียนภาพร่าง บอลสกูรทำหน้าที่เปลี่ยนการหมุนของมอเตอร์ให้เป็นการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้น การเคลื่อนที่มีความราบลื่นสม่ำเสมอสูงมาก เนื่องจากเม็ดลูกปืนที่อยู่ภายในและร่องเกลียวมีการเจียระไนและจำนวนเม็ดลูกปืนมีมากทำให้สามารถรับภาระได้สูง มีประสิทธิภาพอยู่ระหว่างร้อยละ 70–90 (Pin et al., 2018) แต่ราคาค่อนข้างสูง บอลสกูรที่ใช้มีระยะพิตช์ 10 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ติดตั้งบนเพลาเกลียวมีความยาว 50 cm ดัง Fig. 2A สามารถคำนวณหาค่าแรงบิดได้ดัง Equation 1

(A) (B)



Fig. 2 Ball screw installed on screw shaft and slide guide

รางสไลด์ (slide guide) เป็นอุปกรณ์เครื่องมือกลที่มีลักษณะเป็นรางยาว มีบล็อคสี่เหลี่ยมที่เป็นตัวรับน้ำหนักสามารถเลื่อนไปกลับได้ ผลิตมาจากเหล็กหรืออลูมิเนียม ภายในจะมีตลับลูกปืนเป็นตัวขับเคลื่อนให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามรางได้อย่างสะดวกรวดเร็วรางสไลด์ ในบทความนี้ใช้ความยาว 50 cm ดัง Fig. 2B

$$\tau = \frac{F_a \times P_h}{2\pi\eta} \tag{1}$$

เมื่อ $F_a = \mu mg$ โดยที่

τ คือ แรงบิด (Nm)

F_a คือ แรงทั้งหมดที่กระทำ (N)

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของบอลสกูร

m คือ มวล (kg)

g คือ ความเร่งของแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

P_h คือ feed screw (m)

η คือ ประสิทธิภาพของบอลสกูร

กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถคำนวณได้ดัง Equation 2

$$P_m = \frac{2\pi\tau N}{60} \tag{2}$$

โดยที่

P_m คือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (W)

N คือ ความเร็วของมอเตอร์ (rmp)

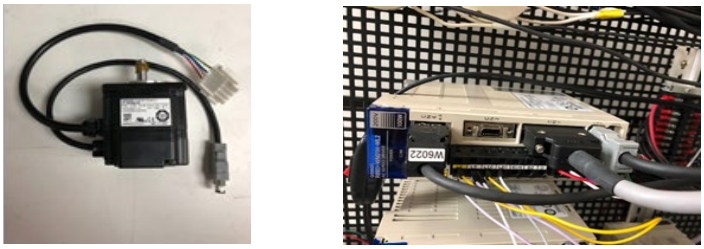
กำหนดมวลทั้งหมดกดลงบอลสกูรส่งกำลัง 5 kg สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของบอลสกูร 0.9 ประสิทธิภาพของบอลสกูร 0.8 สามารถหาค่าแรงบิดจาก Equation 1 ได้ดังนี้

$$F_a = \mu mg$$
$$= 0.9 \times 5 \times 9.81 = 44.15 \quad N$$
$$\tau = \frac{F_a \times P_h}{2\pi\eta}$$
$$= \frac{44.15 \times 0.01}{2\pi \times 0.8} = 88.88 \quad mNm$$

กำหนดความเร็วของมอเตอร์ 3,000 rpm สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก Equation 2 ดังนี้

$$P_m = \frac{2\pi\tau N}{60}$$
$$= \frac{2\pi \times 88.88 \times 10^{-3} \times 3{,}000}{60} = 27.63 \quad W$$

ตัวขับเคลื่อนแขนกลแกน X และแกน Y ใช้เอซีมอเตอร์ชนิดเซอร์โว รุ่น R88M-WP10030H-S1-ND โดยมีพิกัดความเร็วรอบ 3,000 rpm พิกัดกำลังไฟฟ้า 100 W และแรงบิด 318 mNm ดังแสดงใน Fig. 3A ใช้งานร่วมกับชุดขับ OMRON R88D-WN01H-ML2 ดัง Fig. 3B



(A) AC servo motor (B) Servo driver

Fig. 3 AC servo motor and driver

สำหรับตัวยกแขนกลแกน Z สำหรับยกอุปกรณ์การร่างภาพใช้วาล์วโซลินอยด์ดังรูปที่ 4 รุ่น ZYE1-0837Z แรงดันที่ใช้ 24 VDC กระแส 0.38 A ช่วงการชัก 10 mm



Fig. 4 Solenoid valve

ระบบควบคุมโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เป็นแบบโมดูลล่าร์ ประกอบด้วย หน่วยจ่ายพลังงาน รุ่น CJ1W-PA202 หน่วยประมวลผลรุ่น CJ2M-CPU11 หน่วยอินพุตรุ่น CJ1W-ID211 หน่วยเอาต์พุตชนิดทรานซิสเตอร์ รุ่น CJ1W-OD211 และหน่วยเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์กับมอเตอร์ชนิดเซอร์โวรุ่น CJ1W-NC471 ดังแสดงใน Figs. 5A–5E ตามลำดับ

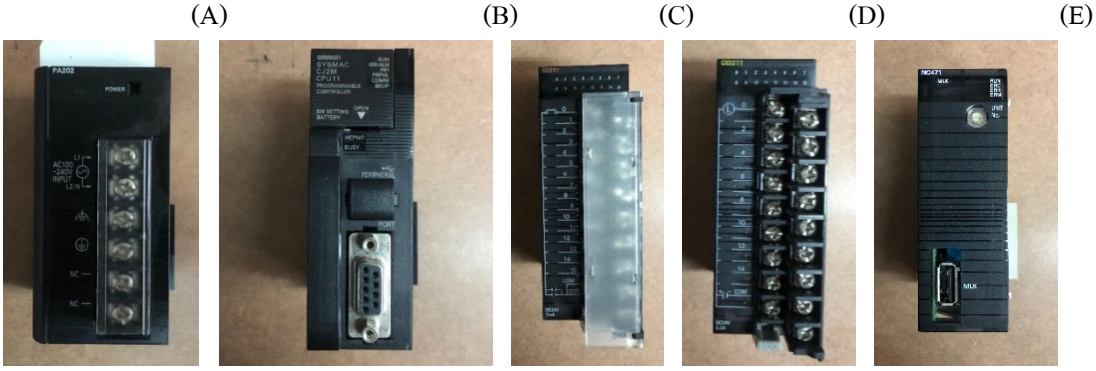


Fig. 5 Control system using programmable logic Controller

หลักการควบคุมมอเตอร์ชนิดเซอร์โวในรูปที่ 6 เริ่มจากโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ส่งคำสั่งควบคุมตำแหน่งซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์หรือแอนะล็อกให้กับตัวควบคุมตำแหน่ง สัญญาณนี้จะถูกส่งไปควบคุมความเร็วและระยะของมอเตอร์ผ่านชุดขยายสัญญาณ ความเร็วจะถูกควบคุมให้คงที่โดยการควบคุมแบบป้อนกลับชนิด PID โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มีฟังก์ชัน Auto-tuning ช่วยในการคำนวณค่า Kp (อัตราการขยายแบบสัดส่วน), Ki (อัตราการขยายอินทิเกรต) และ Kd (อัตราการขยายอนุพันธ์) โดยใช้หลักการคำนวณค่าการตอบสนองของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม

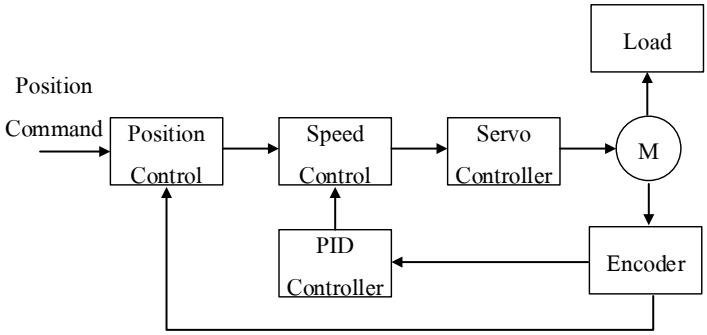


Fig. 6 Control principle of the servo motor

เครื่องต้นแบบแขนกลร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ดังรูปที่ 7 มีหลักการทำงานดังแสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 8 เริ่มจากนำรูปต้นแบบที่มีนามสกุล dxf ขนาดไม่เกิน A3 มาแปลงเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล tap ผ่านโปรแกรม All To G-Code Converter โดยมีขั้นตอนแปลงไฟล์เพื่อให้ได้พิกัดดังรูปที่ 9 ไฟล์ใหม่ที่ได้จะทำให้ทราบตำแหน่งของ X, Y และ Z ตำแหน่งเหล่านี้จะถูกนำใช้กับโปรแกรมควบคุมซึ่งเขียนจากภาษา LD และ ST เพื่อควบคุมให้มอเตอร์ชนิดเซอร์โวเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y ส่วนวาล์วโซลินอยด์จะทำหน้าที่ขยับอุปกรณ์ร่างภาพขึ้นลงในแนวแกน Z

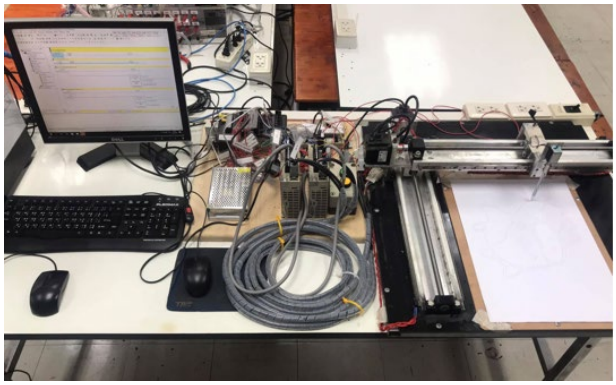


Fig. 7 Prototype of 2D Sketching Robotic Arm

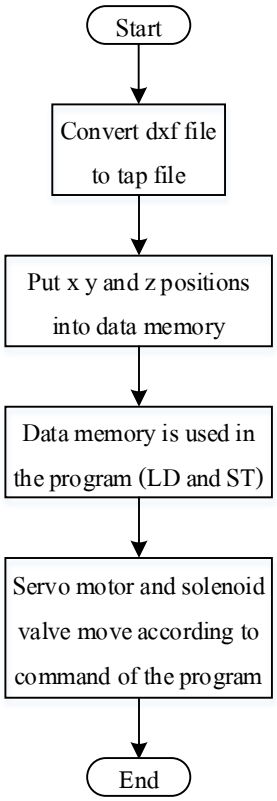


Fig. 8 Flow chart of operation of the system

การแปลงไฟล์รูปภาพเป็นพิกัดดังแสดงในรูปที่ 9 เริ่มจากนำไฟล์รูปภาพไฟล์ต้นฉบับที่มีนามสกุล .dxf มาใสไว้ที่ช่อง 01 ตั้งค่าตัวแปรในช่องหมายเลข 02 (กำหนด Z เป็น 10 หมายถึงวาล์โซลินอยด์ทำงาน ถ้า Z เป็น 0 หมายถึงตรงข้าม) แปลงไฟล์รูปภาพเป็นพิกัดจะได้ไฟล์ใหม่ที่มีนามสกุล .tap (G-Code) โดยถ้าทำการ Convert ที่ช่องหมายเลข 03 ถ้าสำเร็จโปรแกรมจะแสดง “ สีเขียว ” ที่ไฟล์นั้น แต่ถ้าไฟล์รูปภาพไหนไม่สามารถแปลงได้โปรแกรมจะแสดง “ สีแดง ” ที่ไฟล์นั้น หลังจากนั้นนำมาจัดเรียงข้อมูลใหม่โดยใช้โปรแกรม Excel

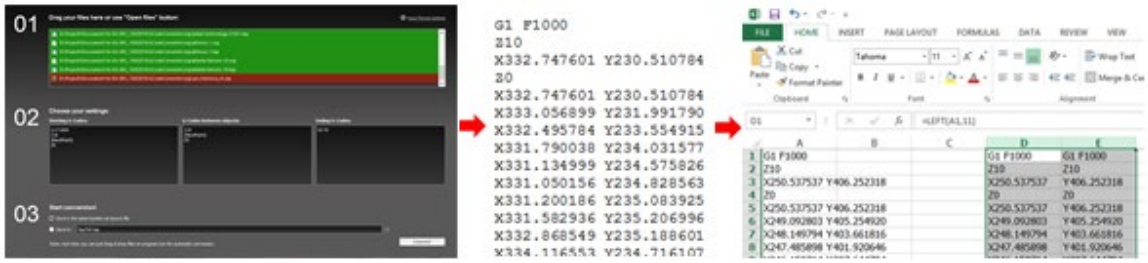


Fig. 9 Method to convert an image file to coordinates

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง



Fig. 10 Crocodile prototype picture

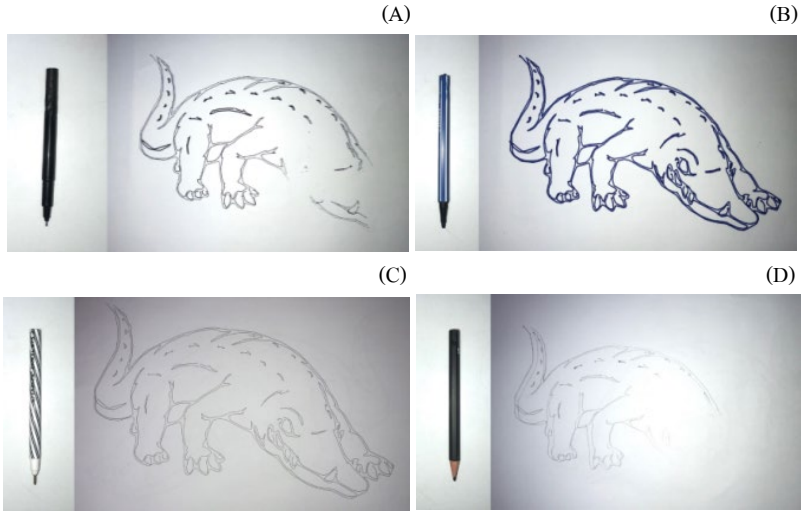


Fig. 11 Sketches made by different kinds of equipment, Cutting pen (A); Magic pen (B); ballpoint pen (C); pencil (D)

ทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับร่างภาพประกอบด้วย ปากกาตัดเส้น ปากกาเมจิก ปากกาลูกลื่น และดินสอ โดยใช้รูปต้นแบบเป็นรูปจระเข้ดังแสดงใน Fig. 10 ผลภาพร่างรูปจระเข้ที่เกิดจากการใช้ปากกาตัดเส้น ปากกาเมจิก ปากกาลูกลื่น และดินสอ ดังแสดงใน Figs. 11A–11D ตามลำดับ อุปกรณ์ที่เหมาะกับการร่างภาพเมื่อใช้กับแขนกลร่างภาพ 2 มิติ มี 2 ชนิด คือปากกาเมจิก และปากกาลูกลื่น โดยขนาดของหัวปากกาต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร และมีความยาว 11 เซนติเมตร เนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z ใช้วาล์วโซลินอยด์เพื่อลดต้นทุน ข้อด้อยคือระยะแกนชักของวาล์วโซลินอยด์ไม่สามารถปรับได้ ทำให้อุปกรณ์ร่างภาพที่ติดอยู่จะถูกกดลงบน

กระดาษโดยไม่สามารถปรับความสูงได้ ดังนั้นถ้าใช้ดินสอในการร่างภาพที่มีลายเส้นยาวจะทำให้ไส้ดินสอหู่ก่อนที่จะร่างภาพหมดทำให้ภาพขาดความคมชัด

การเร่งความเร็วในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ชนิดเซอร์โว สามารถกำหนดผ่านคำสั่ง Set_LI โดยสามารถตั้งค่าได้อยู่ระหว่าง 1–65,535 ทดสอบหาค่าการเร่งความเร็วในการควบคุมตำแหน่งแขนกล โดยทดสอบกับภาพต้นแบบ 4 แบบได้แก่ แพะ สุนัข วัว และฮิปโปโปเตมัส ผลที่ได้การ Set LI ของมอเตอร์แกน X และแกน Y ค่าสูงสุดมีค่าไม่เกิน 60,000 ดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 Test for setting up speed of servo motor

Item	X	Y	Time to sketch (Min)			
			goat	dog	cow	hippopotamus
1	30,000	30,000	7.59	5.54	3.41	4.04
2	45,000	45,000	7.23	5.25	3.05	3.21
3	60,000	60,000	6.59	5.09	2.48	3.00

การร่างภาพ แพะ สุนัข วัว และฮิปโปโปเตมัส ด้วยแขนกลผลที่ได้ดังแสดงใน Figs. 12A–12Dตามลำดับ แขนกลสามารถร่างภาพออกมาได้เหมือนต้นแบบโดยถ้ากำหนดค่า Set LI ให้มีค่าสูงเวลาที่ใช้ในการร่างภาพก็จะใช้เวลาสั้นผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 1 ผลการทดสอบการตั้งค่า LI สูงสุดที่ได้ไม่เกิน 60,000 ผลที่ได้คือแขนกลร่างภาพได้เหมือนต้นแบบ แต่ถ้าสูงกว่านี้ภาพที่ถูกแขนกลร่างจะไม่มีความสมบูรณ์ สำหรับการปรับความเร็วให้เหมาะสมกับภาพที่จะร่างขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของลายเส้น โดยถ้าเวลาที่ใช้ในการร่างภาพไม่เกิน 2.48 นาที สามารถกำหนดค่า Set LI ได้สูงสุด 60,000

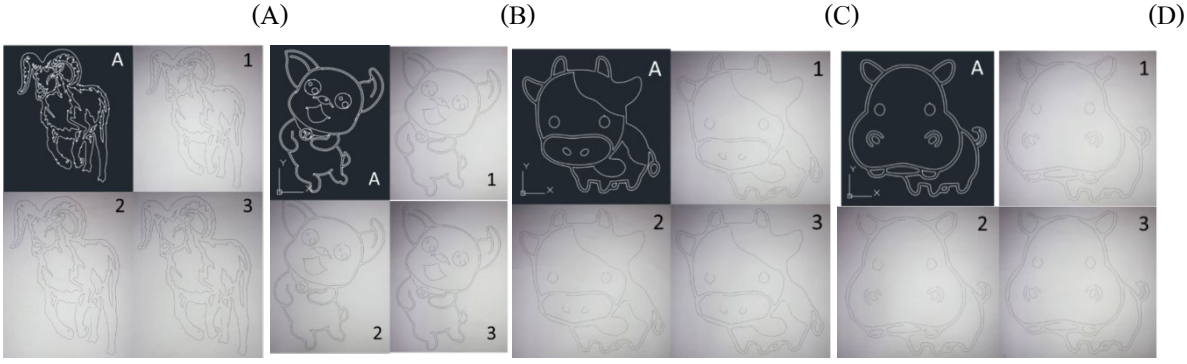


Fig. 12 Image prototype used for testing, Goat (A); Dog (B); Cow (C); hippopotamus (D)

สรุป

การออกแบบแขนกลร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ภาษาที่ใช้ควบคุมประกอบด้วยภาษา LD และ ST สามารถใช้ร่างภาพขนาดไม่เกิน A3 รูปภาพต้นแบบถูกแปลงเป็นตำแหน่ง X, Y และ Z ด้วยโปรแกรม ALL TO G-Code Converter สำหรับควบคุมมอเตอร์ชนิดเซอร์โวและวาล์วโซลินอยด์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการร่างภาพที่เหมาะสม คือปากกาลูกลื่นหรือปากกาเมจิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ความยาว 11 เซนติเมตร ซึ่งภาพที่ถูกร่างจากแขนกลจะมีความสมบูรณ์เหมือนกับภาพต้นแบบ การเร่งความเร็วในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ชนิดเซอร์โว สามารถกำหนดผ่านคำสั่ง Set_LI ผลที่ได้คือค่า Set LI ของมอเตอร์แกน X และแกน Y มีค่าสูงสุดไม่เกิน 60,000 ซึ่งจะทำให้เวลาในการร่างภาพใช้เวลาน้อยโดยภาพที่ออกมายังมีความสมบูรณ์เหมือนภาพต้นแบบ สำหรับภาพต้นแบบที่มีความซับซ้อนการกำหนดค่า Set LI ต้องลดลง เพราะถ้าตั้งค่าสูงเกินไป ลายเส้นของภาพที่ถูกแขนกลร่างจะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากมีการขาดหาดของลายเส้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการจัดการพลังงาน (PEAEM) คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

เอกสารอ้างอิง

Baid, P., Kumar. V.M. 2016. A 3 – DOF Robot Arm for Drawing Application. Int. J. Engineering Research & Technology. 4: 1–4.

Haider, A.F.A., Haidar, F.A.Q., Nandha, K. 2011. A Review of Application Industrial Robotic Design. In: proceeding of 9th International Conference on ICT and Knowledge Engineering. Bangkok, Thailand, pp. 105–112.

Kopte1, T. Pai, A. 2015. Programmable Logic Controller and Its Applications. Int. J. Engineering Research and General Science. 3: 1010–1014.

Laurean, B. 2012. Using the Microcontroller and the PLC in a RPP robot control. J. Advanced Materials Research. 463: 1721–1724.

Mole, R.S. 2017. A Literature Review on Structural Properties of Different Types of Robots. GRD J. Global Research and Development Journal for Engineering. 2: 46–51.

Pin, L., Xiaodong, J., Jianshe, F., Hossein, D., Guan, Q., Yihchyun, H., Jay, L. 2018. Prognosability study of ball screw degradation using systematic methodology. J. Mechanical Systems and Signal Processing. 108: 45–47.

Tresset, P.A., Fol Leymarie, F. 2012. Sketches by Paul the Robot. In: proceeding of 8th International Conference on Annual Symposium on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging. Annecy, France, pp. 1–8.

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบตำแหน่งติดตั้งและขนาดของสายดินที่มีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารีเหนือหัวของรถไฟฟ้า

Comparative study of installing positions and sizes of earth wires for effects of electric field produced by an overhead catenary railway electrification system

พรภัส เกิดประดับ[a,*], เด่นชัย วรเศวต[b]

Pornpus Keadpradub[a,*], Denchai Worasawate[b]

[a]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Kasetsart University Rail Engineering Center (KURAIL), Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบตำแหน่งการติดตั้งและขนาดของสายดินที่มีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแคทินารีเหนือหัวของรถไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV ความถี่ 50 Hz ซึ่งมุ่งเน้นวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายออกมาจากสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งติดตั้งและขนาดของสายดิน โดยพิจารณาตำแหน่งที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายบริเวณพื้นดินมีค่าน้อยที่สุด โดยพิจารณาผลของค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตร จากพื้นทางวิ่งรถไฟ โดยได้ทำการออกแบบระยะการเลื่อนสายดินในแนวราบและแนวดิ่ง จากการจำลองผลพบว่าบริเวณการติดตั้งสายดินที่ตำแหน่งความสูง 6.5 เมตร และมีระยะห่างในแนวระนาบจากกึ่งกลางของระบบเสาส่งด้านละ 2.4 เมตร นั้นมีค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่ากับ 1.14 kV/m และหากเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินเพิ่มขึ้น 100% จากขนาดเดิม สามารถลดค่าสนามไฟฟ้าได้ โดยค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเท่ากับ 1.11 kV/m

คำสำคัญ: ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า, ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแคทินารี, สนามไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า, สายดิน

Abstract

This paper presents a comparative study on effect of installing positions and sizes of earth wires on electric field produced by an 25 kV 50 Hz overhead catenary railway electrification system. The analysis focuses on the changes of electric field distribution when the installing positions and sizes of the earth wire are varied. The optimum installing position is obtained when the maximum electric field distribution at a height of 1 meter from the rail track is minimal. The simulations are performed by varying the installing positions in both horizontal and vertical direction. The simulated results show that the earth wire installed at a height of 6.5 meters and the horizontal distance of 2.4 meters away from the center pillar system on each side is the optimum position. This gives the electric field of 1.14 kV/m. The results also show that increasing the diameter size of the earth wires to 100% from default size reduces the electric filed to 1.11 kV/m

Keywords: catenary system, earth wire, electric field, railway electrification

คำนำ

เมื่อมีระบบการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบๆ สายตัวนำและกระจายออกมาจากสายตัวนำ สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารีนั้น เป็นระบบการจ่ายไฟฟ้าที่ติดตั้งไปตลอดความยาวของเส้นทางการให้บริการรถไฟฟ้า ซึ่งอาจจะผ่านทั้งในเมือง เขตชุมชน ที่พักอาศัย หรือแหล่งที่อยู่ของสิ่งมีชีวิต จึงต้องมีการป้องกันสนามไฟฟ้าที่กระจายจากสายส่งให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อความปลอดภัยและการส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตบริเวณแนวสายส่งไฟฟ้าให้น้อยที่สุดเช่นกัน โดยการวิจัยนี้จะทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบตำแหน่งติดตั้งและขนาดของสายดินป้องกันที่ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ปรากฏนั้นมีค่าน้อยที่สุดและให้เป็นไปตามค่ามาตรฐาน ICNIRP ที่กำหนดไว้ (ไม่เกิน 5 kV/m) โดยจะมุ่งเน้นถึงปัญหาสนามไฟฟ้า และหาค่าผลเฉลยของค่าสนามไฟฟ้าทำการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า รูปแบบ 1x25 kV 50 Hz (Simple Feeding with Rail Return) ที่ใช้ในโครงการรถไฟฟ้า Airport Rail Link เท่านั้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่งระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารี

การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใต้สายส่งระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารีในบทความนี้จะเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารีรูปแบบ 1×25 kV 50Hz (Simple Feeding with Rail Return) ของโครงการรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ซึ่งระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารีมีสายตัวนำที่ติดตั้งอยู่ในระบบได้แก่ สายตัวนำยึดโยง (Catenary Wire) สายตัวนำสัมผัส (Contact Wire) และสายดิน (Earth Wire) โดยแสดงลักษณะการติดตั้งและระยะต่างๆ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ซึ่งต้องใช้ในการคำนวณ ในแบบจำลอง 2 มิติ แสดงดัง Table 1 และ Fig.1

Table 1 The Calculation on parameter data of catenary system

Conductor No.	Position in *x,y* axis (Meter)		Diameter of wire (Meter)	Voltage (Volt)	Voltage phase angle (Degree)
	x	*y*			
No.1 Contact Wire 1	-2	5.07	0.0123	25000	-60
No.2 Catenary Wire 1	-2	6.67	0.0105	25000	-60
No.3 Contact Wire 2	2	5.07	0.0123	25000	60
No.4 Catenary Wire 2	2	6.67	0.0105	25000	60
No.5 Earth Wire 1	-5.4	6.5	0.0218	0	0
No.6 Earth Wire 2	5.4	6.5	0.0218	0	0

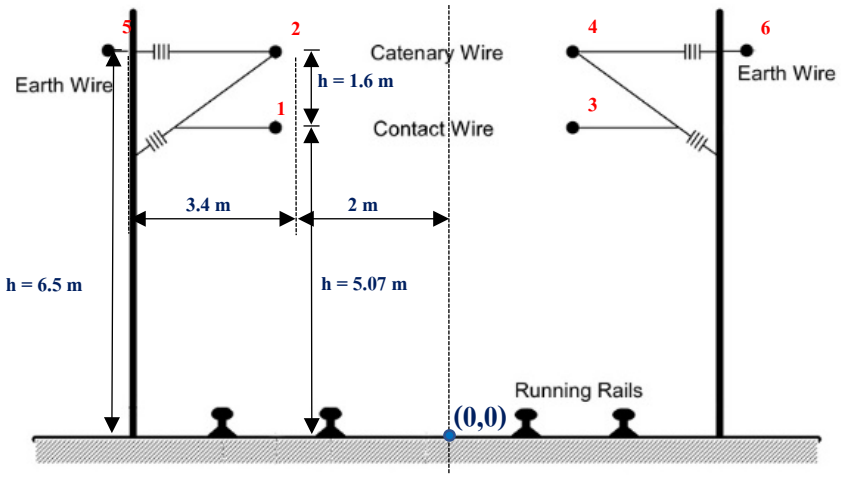


Fig. 1 The Model of simple feeding with rail return type in catenary system

โดยสมมติให้พื้นดินหรือกราวนด์เป็นตัวนำที่ดีชนิดหนึ่งที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ในระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารี ซึ่งประกอบไปด้วย สายตัวนำจำนวน 6 เส้น โดยสายตัวนำแต่ละเส้นที่ถูกติดตั้งบนแนวแกน x และ y ที่กำหนดขึ้นมา โดยแทน x ด้วย $x-x'$ แทน $y+h$ ด้วย $y+y'$ และแทน $y-h$ ด้วย $y-y'$ เมื่อ (x',y') คือตำแหน่งที่ตั้งของสายตัวนำ (x,y) คือ จุดที่ต้องการพิจารณา และ ρ คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าตามสายตัวนำ จะเขียนสมการได้ดัง Equation 1 และ 2

$$V(x,y)=\frac{\rho}{4\pi\varepsilon_0}\ln\left[\frac{(y+y')^2+(x-x')^2}{(y-y')^2+(x-x')^2}\right] \tag{1}$$

$$\vec{E}(x,y)=\frac{-\rho}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{2(y+h)\bar{a}_y+2x\bar{a}_x}{(y+h)^2+x^2}-\frac{2(y-h)\bar{a}_y+2x\bar{a}_x}{(y-h)^2+x^2}\right] \tag{2}$$

ในการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารี ซึ่งประกอบไปด้วยสายตัวนำไฟฟ้าจำนวน 6 เส้น จะต้องหาค่าประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นเสียก่อน เนื่องจากค่าแรงดันที่กระจายจากสายตัวนำแต่ละเส้นจะมีผลต่อตัวนำเส้นอื่นๆ ทำให้ค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำแต่ละเส้นไม่เท่ากัน จึงต้องประยุกต์สมการใหม่เพิ่มเติม ดัง Equation 3

$$V_i(x,y)=\frac{\rho_{Li}}{4\pi\varepsilon_0}\ln\left[\frac{(y+y_i)^2+(x-x_i)^2}{(y-y_i)^2+(x-x_i)^2}\right]=\rho_{Li}Z_i \tag{3}$$

เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนบริเวณรอบขอบสายตัวนำ มีค่าแตกต่างกัน จึงใช้วิธีคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนรอบขอบสายตัวนำทั้งหมด 4 ตำแหน่ง มาทำการเฉลี่ย โดยแสดงวิธีการหา Z_{ji} แสดงดัง Fig. 2 และ Equation 4

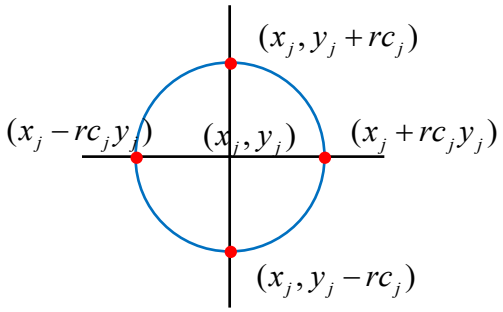


Fig. 2 The 4 points averaging on surface of conductor

$$Z_{ji} = \frac{1}{4}\left[z_i(x_j + rc_j, y_j) + z_i(x_j, y_j - rc_j) + z_i(x_j - rc_j, y_j) + z_i(x_j, y_j + rc_j) \right] \tag{4}$$

จากนั้นทำการแก้สมการที่ 3 เพื่อหาค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าของแต่ละตัวนำ ตามข้อมูล Table1 เนื่องจากค่าแรงดันของสายตัวนำต่างเฟสกัน 120 องศาทางไฟฟ้า จึงต้องคำนวณค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าแบ่งออกเป็นส่วนของค่าจำนวนจริงและค่าจำนวนจินตภาพแยกออกจากกัน แสดงดัง Equation 5 และ 6

$$\begin{bmatrix} \mathrm{Re}[\rho_{L1}] \\ \mathrm{Re}[\rho_{L2}] \\ \mathrm{Re}[\rho_{L3}] \\ \mathrm{Re}[\rho_{L4}] \\ \mathrm{Re}[\rho_{L5}] \\ \mathrm{Re}[\rho_{L6}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathrm{Re}[V_1] \\ \mathrm{Re}[V_2] \\ \mathrm{Re}[V_3] \\ \mathrm{Re}[V_4] \\ \mathrm{Re}[V_5] \\ \mathrm{Re}[V_6] \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} \mathrm{Im}[\rho_{L1}] \\ \mathrm{Im}[\rho_{L2}] \\ \mathrm{Im}[\rho_{L3}] \\ \mathrm{Im}[\rho_{L4}] \\ \mathrm{Im}[\rho_{L5}] \\ \mathrm{Im}[\rho_{L6}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathrm{Im}[V_1] \\ \mathrm{Im}[V_2] \\ \mathrm{Im}[V_3] \\ \mathrm{Im}[V_4] \\ \mathrm{Im}[V_5] \\ \mathrm{Im}[V_6] \end{bmatrix} \tag{6}$$

โดยจะได้ผลลัพธ์ค่าความหนาแน่นของประจุของแต่ละสายตัวนำ ในรูปของเฟสเซอร์

$$\rho_{Li} = \mathrm{Re}[\rho_{Li}] + j\,\mathrm{Im}[\rho_{Li}]$$

นำค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าของสายตัวนำแต่ละเส้นที่ได้มาแทนค่าในสมการที่ 2 โดยแบ่งการคำนวณระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าบริเวณจุดที่ต้องการพิจารณา จากตำแหน่งสายตัวนำแต่ละเส้น แสดงดัง Equation 7 ถึง 12

$$E_{x,real} = \frac{(\rho_{real,i})(x - x_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right]} + \frac{(\rho_{real,i})(x - x_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2 \right]} \tag{7}$$

$$E_{y,real} = \frac{(\rho_{real,i})(y-y_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right]} + \frac{(\rho_{real,i})(y-y_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x-x_i)^2+(y+y_i)^2\right]} \quad (8)$$

$$E_{x,imag} = \frac{(\rho_{imag,i})(x-x_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right]} + \frac{(\rho_{imag,i})(x-x_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x-x_i)^2+(y+y_i)^2\right]} \quad (9)$$

$$E_{y,imag} = \frac{(\rho_{imag,i})(y-y_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right]} + \frac{(\rho_{imag,i})(y-y_i)}{2\pi\varepsilon_0\left[(x-x_i)^2+(y+y_i)^2\right]} \quad (10)$$

จากนั้นนำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากสายตัวนำทั้งหมดมารวมกันตามแนวแกน x และ y จะได้เป็น

$$E_x = \sqrt{(E_{x,real})^2+(E_{x,imag})^2} \quad \text{และ} \quad E_y = \sqrt{(E_{y,real})^2+(E_{y,imag})^2} \quad (11)$$

ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ $\frac{dE^2}{dt} = 0$

ดังนั้น

$$\omega t = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(-\frac{E_x^2\sin 2\theta + E_y^2\sin 2\phi}{E_x^2\cos 2\theta + E_y^2\cos 2\phi}\right) \quad \text{เมื่อ } \omega t_1 = \omega t + (m-1)\frac{\pi}{2}; m = 1,2,3,4$$

เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า โดยพิจารณาผลลัพธ์ที่มีค่ามากที่สุด ดัง Equation 12

$$E_{\max} = \sqrt{(E_x\cos(\omega t_1+\theta)^2 + (E_y\cos(\omega t_1+\phi))^2} \quad \text{และ} \quad angle = \tan\left[\frac{E_y\cos(\omega t+\phi)}{E_x\cos(\omega t+\theta)}\right] \quad (12)$$

การออกแบบการเลื่อนตำแหน่งสายดินป้องกันและการจำลองขนาดของสายดิน

การออกแบบการเลื่อนตำแหน่งสายดินป้องกันเพื่อจำลองผลหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายไฟฟ้าแคทินารี ได้ออกแบบการเลื่อนตำแหน่งสายในแนวแกน *X* และแนวแกน *Y* จากจุดติดตั้งเดิมของระบบ โดยกำหนดให้จุดติดตั้งปัจจุบันของระบบที่ตำแหน่งความสูง 6.5 เมตร และมีระยะห่างในแนวระนาบจากกึ่งกลางของระบบเสาส่งด้านละ 5.4 เมตร (ΔX=0, ΔY=0) ออกแบบเลื่อนตำแหน่งสายดินทั้งสองเส้นอย่างสมมาตรกัน ครั้งละ 0.5 เมตร และกำหนดระยะการเลื่อนสูงสุดจากจุดติดตั้งเดิม ไม่เกิน 3 เมตร โดยในแนวแกน *X* ออกแบบการเลื่อนตำแหน่งสายลักษณะเข้าสู่กลุ่มสายตัวนำ และเลื่อนออกจากกลุ่มสายตัวนำ โดยที่แนวแกน *Y* ออกแบบให้มีการเลื่อนสายในแนวดิ่งในทิศทางเลื่อนตำแหน่งสูงขึ้นจากด้านบนของกลุ่มสายตัวนำเท่านั้นแสดงดัง Fig. 4

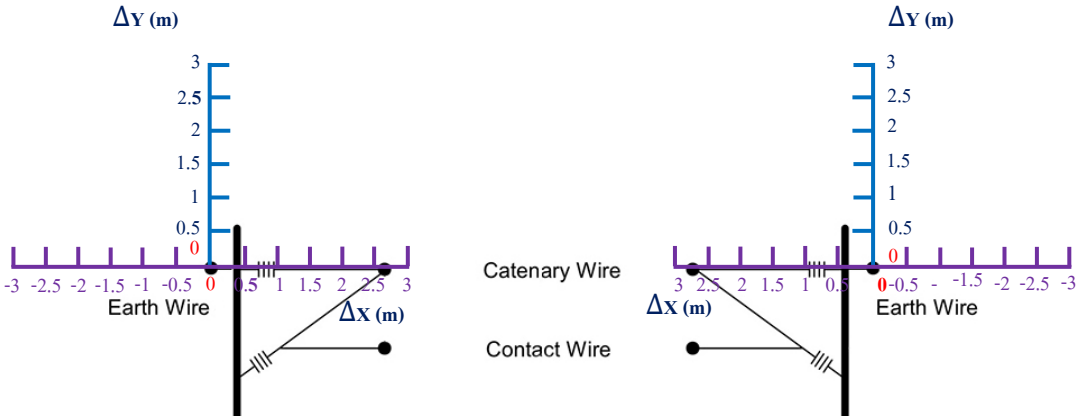
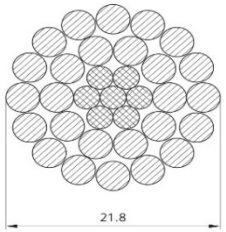


Fig. 3 The Installing positions of the earth wires varied in both horizontal and vertical directions

การออกแบบขนาดสายดินสำหรับใช้ในการจำลองผลต่อค่าสนามไฟฟ้านั้น โดยได้ออกแบบการเพิ่มขนาดและลดขนาดของสายดินในลักษณะเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินที่ติดตั้งปัจจุบัน โดยทำการปรับเพิ่มขนาดสายดินและลดขนาดสายดินสำหรับการจำลองผลครั้งละ 25% ไปจนถึง 100% โดยแสดงค่าการออกแบบสายดิน แสดงดัง Table 2

Table 2 The Design on the increasing and decreasing size of earth wires from default



Default Size diameter = 0.0218 m

Size of Earth wire	Diameter (m)	Size of Earth wire	Diameter (m)
Increase size 25% ↑	0.0273	Decrease size 25% ↓	0.0174
Increase size 50%	0.0327	Decrease size 50%	0.0145
Increase size 75%	0.0382	Decrease size 75%	0.0125
Increase size 100%	0.0436	Decrease size 100%	0.0109

ผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผล

การจำลองผลการเลื่อนตำแหน่งและขนาดของสายดินป้องกัน โดยพิจารณาผลของค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตร จากพื้นทางรถไฟ โดยจากผลการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งติดตั้งสายดินของระบบในปัจจุบันที่พิกัด ($\Delta X = 0,\ \Delta Y = 0$) พบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1.22 kV/m จากนั้นทำการจำลองผล โดยเลื่อนตำแหน่งสายดินไปตามแนวแกน X ในทิศทางเข้าสู่กลุ่มสายตัวนำ พบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงและเลื่อนตำแหน่งสายดินไปตามแนวแกน X ในทิศทางออกสู่กลุ่มสายตัวนำ พบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเทียบกับการเลื่อนตำแหน่งสายดินที่สูงขึ้นจากกลุ่มสายตัวนำตามแนวแกน Y ค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากการจำลองผลเปรียบเทียบตำแหน่งของสายดินตามระยะแนวแกน X ในแต่ละพิกัดนั้น พบว่าผลลัพธ์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบจะเกิดขึ้นน้อยที่สุด ที่พิกัดตำแหน่ง $\Delta Y = 0$ โดยค่าสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นน้อยที่สุดที่ได้จากการออกแบบและทำการจำลองผลเกิดขึ้นที่พิกัด ($\Delta X = 3,\ \Delta Y = 0$) มีค่าเท่ากับ 1.14 kV/m แสดงดัง Fig. 5

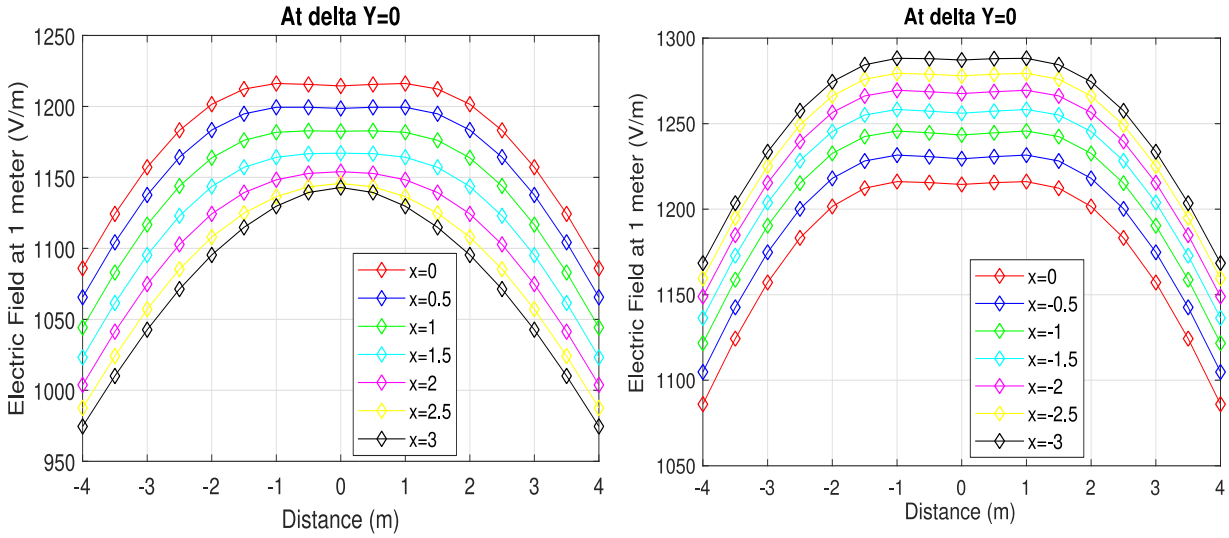


Fig. 4 The Electric field resulting from the installation of earth wire in horizontal and vertical design

จากนั้นทำการทดสอบการเพิ่มขนาดและลดขนาดของสายดินป้องกัน โดยปรับขนาดตามการออกแบบ พบว่า เมื่อปรับเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินจาก 0% ถึง 100% ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินจาก 0% ถึง -100% ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาค่าสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดลองมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินเพิ่มขึ้นจากเดิมจำนวน 100% โดยมีค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1.11 kV/m ความสัมพันธ์ของขนาดสายดินและค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแสดงดัง Fig. 6

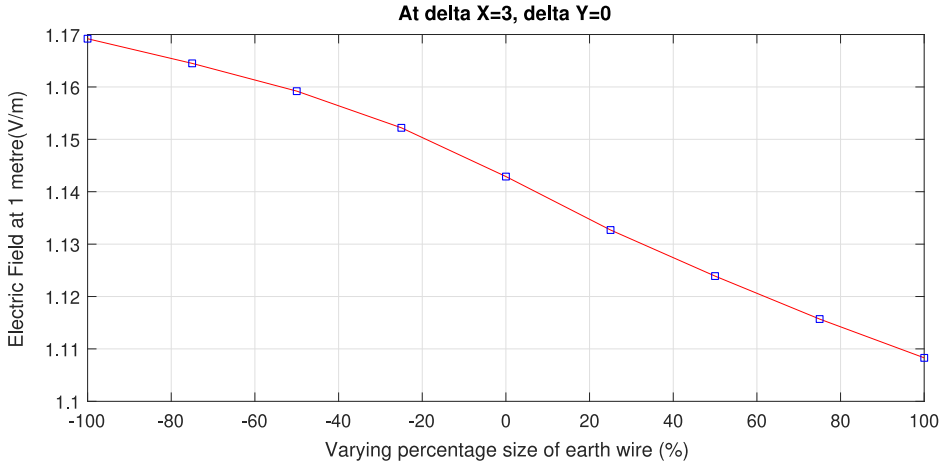


Fig. 5 The Electric field resulting from increasing and decreasing diameter size of earth wire

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแคทินารีเหนือหัวของรถไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ความสูง 1 เมตร จากทางวิ่ง ตามที่ได้ออกแบบระยะห่างและความสูงของการติดตั้งสายดิน สรุปได้ว่าตำแหน่งของสายดินเมื่อติดตั้งอยู่ใกล้ตำแหน่งของสายยึดโยง (Catenary

Wire) จะทำให้สนามไฟฟ้าเข้มมากในบริเวณกลุ่มตัวนำสายไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าน้อยลงในบริเวณใกล้พื้นดิน ดังนั้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินใหญ่ขึ้นทำให้สายดินอยู่ใกล้สายยึดโยงมากขึ้น จึงทำให้สนามไฟฟ้าที่พื้นดินต่ำลง โดยพบว่าที่ตำแหน่ง $\Delta X = 3$ เมตร และ $\Delta Y = 0$ เมตร สายดินถูกติดตั้งห่างจากสายยึดโยง 0.4 เมตร ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1.14 kV/m ซึ่งสามารถลดค่าสนามไฟฟ้าจากเดิมเป็นจำนวน 6.56% และการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิมอีก 100% โดยที่ตำแหน่งติดตั้งสายดินเดียวกันนั้น พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1.11 kV/m สามารถลดค่าสนามไฟฟ้าจากขนาดสายเดิมคิดเป็นเป็นจำนวน 2.63%

จากผลการศึกษาตำแหน่งการติดตั้งสายดินห่างจากสายยึดโยง 0.4 เมตร ทำให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการติดตั้งจริงได้ เนื่องจากมีความสอดคล้องกับระยะห่างความปลอดภัยทางไฟฟ้าของการติดตั้งเป็นไปตามมาตรฐาน EN50119 ซึ่งให้ข้อแนะนำระยะห่างไว้ที่ 0.27 เมตร ทั้งนี้อาจจะนำไปใช้พิจารณาเป็นแนวทางในการติดตั้งบริเวณพื้นที่เฉพาะ อาทิเช่น บริเวณชานชาลาผู้โดยสาร รวมถึงร้านค้าให้บริการบริเวณชานชาลา หรือเขตชุมชนในบางพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสนามไฟฟ้าจากแหล่งอื่นๆ เพื่อลดความสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้ได้มากที่สุดเพื่อความปลอดภัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด

เอกสารอ้างอิง

ปิยะบุตร พฤกษานุบาล. 2541. การศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่อเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ในสถานีไฟฟ้า, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Isaramongkolrak, A., Kerdpradub, P., Wungwattana, K. 2014. Comparative study for the installation of overhead ground wire affecting the electric field of high voltage transmission lines. 2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014). FP2060.

Phayomhom, A., Kasirawut, T., Phontusa, S., Halapee, J., Ainsuk, B., Kveeyarn, K., Rugthaicharoencheep, N., Puttarach, A. 2016. Analysis of electric field and magnetic field from overheadsubtransmission lines affecting occupational health and safety in MEA's power system. GMSARN International Journal 10: 25–32.

Mandic, M., Uglesic, I., Milardic, V. 2012. A study of electromagnetic field from AC 25 kV/50 Hz Contact Line System. I.R.E.E.

หุ่นยนต์เพื่อการศึกษาโดยใช้เทคนิคการเขียนโปรแกรมแบบจับต้องได้โดยการอ่านสเปกตรัมของแสง

Educational robot using tangible programming techniques by reading light spectrum

วัชรินทร์ ขาวบุบผา*, ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว

Watchrin Kaobuppa*, Natavut Kwankeo

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: watchrin.ka@ku.th

บทคัดย่อ

การคิดเชิงคำนวณทักษะพื้นฐานสำหรับการคิดแก้ปัญหาอย่างมีลำดับขั้น สามารถเรียนรู้ได้ผ่านหุ่นยนต์เพื่อการศึกษา โดยใช้งานร่วมกับเทคนิคการเขียนโปรแกรมแบบจับต้องได้ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้คำสั่งที่สามารถจับต้องได้ และสามารถเรียนรู้ได้ง่าย หุ่นยนต์เพื่อการศึกษาที่พัฒนาขึ้นนี้ทำงานโดยใช้งานอุปกรณ์วัดสเปกตรัมของคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในการแปลค่าของแผ่นป้ายคำสั่งสีที่ต่างกัน โดยใช้ระบบสีแบบ HSL ในการแปลค่าสี ซึ่งแยกสีออกได้ 16 กลุ่มสี โดยหุ่นยนต์ประกอบด้วยอุปกรณ์วัด 2 ชุด ทำให้รองรับคำสั่งได้ 256 คำสั่งโดยแสดงผลผ่านล้อและ จอแสดงผล LED

คำสำคัญ: ภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้, สี, หุ่นยนต์, อุปกรณ์วัดสเปคตรัมแสง

Abstract

Computational thinking is a solving problem that it has process to solving. It learns by educational robot that using tangible programming techniques. A tangible programming technique is the use of physical commands and it is an easy technique to learn. In this project, Educational robot has spectral sensor to classify color from color command plate and HSL (hue, saturation, and lightness) color model is base model of classifier. The robot can classify color 16 groups. It has 2 sensor so it has 256 basic command. It shows results from wheel and LED display.

Keywords: color, robot, spectral sensor, tangible programming language

คำนำ

เทคโนโลยีในปัจจุบันมีความเกี่ยวข้องกับระบบดิจิทัล ไม่ว่าจะเป็นระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent) , การประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing) และ หุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมและ การบริการ เพื่อตอบสนองการเติบโตของเทคโนโลยี ประเทศไทยได้ส่งเสริมพื้นฐานทางเทคโนโลยีผ่านหลักสูตรวิชาเทคโนโลยี (วิทยาการคำนวณ) เพื่อพัฒนาพื้นฐานทางเทคโนโลยี การรู้เท่าทันข่าวสารและ การคิดเชิงคำนวณซึ่งการเรียนรู้เกี่ยวกับการคิดเชิงคำนวณและ การเขียนโปรแกรมเป็นทักษะที่สำคัญสำหรับคนรุ่นต่อไป (chaiwongkod, 2019) และ การเรียนรู้การคิดเชิงคำนวณด้วยการโปรแกรมแบบจับต้องได้ (Tangible programming Language) คือการโปรแกรมด้วยการใช้วัสดุแบบจับต้องได้เป็นที่นิยมจากการนำเสนอวิธีการโปรแกรมแบบจับต้องได้ในงานวิจัยเพื่อพัฒนาทักษะการโปรแกรมอย่างง่ายผ่านหุ่นยนต์ (Sapounidis and Demetriadis, 2017) โดยการโปรแกรมแบบจับต้องได้นั้นมีตัวอย่างเช่น งานวิจัยเมื่อปีค.ศ. 2017 ที่ประยุกต์ใช้ภาษาโปรแกรมไมโครไพทอนร่วมกับการใช้ภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้เพื่อให้ผู้เริ่มต้นศึกษาเกี่ยวกับภาษาคอมพิวเตอร์สามารถเรียนรู้ได้ง่ายและ สนุกไปกับการเรียนผ่านการสั่งงานไปบนหุ่นยนต์ (Khamphroo et al., 2017) และ การสั่งงานแขนกลด้วยการเขียนโปรแกรมแบบจับต้องได้และ ทำการสั่งงานตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ทำให้การเรียนรู้สามารถทำได้ง่ายจากการเห็นลำดับและผลลัพธ์จากการสั่งงานได้จริง (Mohammed Abu et al., 2010) จากตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับการโปรแกรมแบบจับต้องได้ การเรียนรู้เกี่ยวกับภาษาโปรแกรมและ พื้นทางการคิดเชิงคำนวณนั้นสามารถทำได้ง่ายสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาผ่านการใช้ภาษาโปรแกรมแบบจับต้องได้ โดยในประเทศไทยได้มีวิธีการพัฒนาทักษะการคิดเชิงคำนวณโดยการเรียนผ่านวิชาเทคโนโลยี (วิทยาการคำนวณ) ในระดับประถมศึกษาตอนต้น โดยใช้วิธีสั่งงานด้วยวิธีแบบจับต้องได้โดยการทดลองสั่งงานผ่านหน้ากระดาษ ซึ่งทำให้การเรียนรู้ยังไม่เต็มประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับการสั่งงานร่วมกับหุ่นยนต์จริง จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงออกแบบหุ่นยนต์ที่สามารถสั่งงานผ่านโปรแกรมแบบจับต้องได้ และใช้สีเป็นตัวแทนของคำสั่งเนื่องจากสีเป็นสิ่งที่เข้าใจได้ง่ายไม่จำเป็นต้องทำความเข้าใจและเรียนรู้ใหม่ และด้วยการใช้การโปรแกรมแบบที่ทำให้เกิดการเรียนรู้การโปรแกรมแบบไม่จำเป็นต้องใช้งานคอมพิวเตอร์จึงทำให้การเรียนรู้สามารถทำได้ง่าย และเป็นการสร้างพื้นฐานการคิดเชิงคำนวณได้โดยอ้างอิงวิธีการเรียนรู้ในรูปแบบเดียวกับที่ใช้ในวิชาเทคโนโลยี (วิทยาการคำนวณ) โดยการสร้างพื้นฐานที่ดีในการโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นจะนำไปสู่การเข้าใจซึ่งเทคโนโลยี และการใช้งานเทคโนโลยีที่กำลังเกิดขึ้นในอนาคต รวมไปถึงการความสามารถในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากมีทักษะการคิดเชิงคำนวณที่ดีแล้ว

อุปกรณ์และวิธีการ

ทดสอบอุปกรณ์วัดสเปกตรัมของแสง

ศึกษาอุปกรณ์วัดสเปกตรัมชนิดหลายย่านความยาวคลื่นของแสง (AS7262) สามารถอ่านได้ทั้งหมดกี่ช่วงความยาวคลื่นและ มีรูปแบบการอ่านค่าแบบใดบ้างและ ทำการทดสอบการอ่านค่าจากสีและ ทำการบันทึกผลค่าที่อ่านได้จากสีมาตรฐาน ได้แก่ ขาว ดำ สีชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 บนมาตรฐาน RGB

แปลงค่าจากอุปกรณ์วัดสเปกตรัมของแสง

แปลงค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัดโดยอ้างอิงมาตรฐานสี HSL จากนั้นทำการทดสอบการอ่านค่าสีจากสีต่างๆ และ ทำการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากการแปลงเทียบกับค่ามาตรฐานเพื่อใช้ประกอบในสมการการแปลงค่าจากอุปกรณ์วัด, ปรับค่าให้สามารถอ่านได้อย่างถูกต้อง

ทดสอบการอ่านค่าสีจากวัสดุการพิมพ์

วัสดุการพิมพ์ได้แก่ กระดาษปอนด์ (Pond Paper) ขนาด 80, 90, 100, 150 แกรม (GSM) และ กระดาษอาร์ต (Art Paper) ขนาด 190 แกรมโดยการพิมพ์สีมาตรฐานเพื่อดูค่าที่อ่านได้จากวัสดุคนละชนิดกัน

กำหนดวิธีการสื่อสารจากสีสำหรับการสั่งงานหุ่นยนต์

กำหนดจำนวนสีและ สีพื้นฐานเพื่อเป็นรหัสสำหรับการนำไปใช้สั่งงานและ เลือกวัสดุเพื่อให้การอ่านค่ามีประสิทธิภาพและ ทำการทดสอบการอ่านค่าในแต่ละรหัสเพื่อทดสอบความถูกต้อง

การควบคุมหุ่นยนต์แบบจับต้องได้

นำรหัสสีสร้างเป็นการควบคุมหุ่นยนต์และ ออกแบบหุ่นยนต์รับและ แสดงผลคำสั่ง เพื่อเป็นตัวอย่างโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์แบบจับต้องได้และ วัดผลการทำงานการตอบสนองคำสั่ง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบอุปกรณ์วัดสเปกตรัมของแสง

อุปกรณ์วัดสามารถวัดค่าได้ 6 ความยาวคลื่น คือ 450, 500, 550, 570, 600 และ 650 นาโนเมตร (AMS, 2017) ดัง Fig. 1 เมื่อนำไปวัดสีมาตรฐานให้ผลออกมาในลักษณะที่สีขาวสะท้อนแสงออกมามากที่สุดในทุกๆความยาวคลื่นซึ่งตรงข้ามกับสีดำและ ในส่วนของสีมาตรฐานอื่นๆ นั้นจะมีค่ามากที่ความยาวคลื่นของสีๆนั้น เช่น สีแดงมีค่ามากสุดที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร และ สีน้ำเงินมีค่ามากสุดที่ 450 นาโนเมตรดัง Table 1

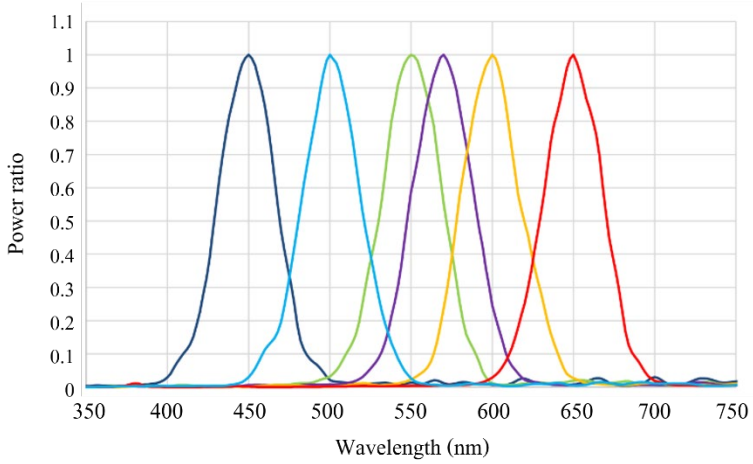


Fig. 1 Spectral Responsivity of Spectral Sensor

Table 1 Result of Color Measuring from Spectral Sensor

Color	Wavelength from Spectral Sensor (nanometer)					
	450	500	550	570	600	650
White	1256	1012	1189	1321	1334	849
Black	179	93	89	122	145	108
Red	208	152	143	245	733	805
Green	249	483	382	340	288	179
Blue	759	422	233	217	191	135
Yellow	228	724	1172	1335	1370	886
Cyan	764	622	345	294	209	139
Magenta	471	165	130	228	740	815

วิธีแปลงค่าจากอุปกรณ์วัด

วิธีแปลงค่าจากอุปกรณ์วัดด้วยมาตรฐาน HSL โดย H คือ สี, S คือ ความเข้มของสี และ L คือ ความสว่าง (Wikipedia, 2020)โดยค่าที่วัดได้เป็นพลังงานแสงที่สะท้อนกลับมา โดยในแต่ละความยาวคลื่นแปรผันตรงกับความเข้มของสีและ สี จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงออกได้ตาม Fig. 2 โดยวิธีการรวมค่าจากเครื่องมือวัดทำโดยการรวมค่าที่ได้ในรูปแบบผลรวมของเวกเตอร์โดยผลรวมที่ได้คือความเข้มของสี (S_H) และ สี (θ_H) ดังที่แสดงใน Equation 1 และ การหาค่าสี (Hue) สำหรับการคำนวณในระบบสมองกลทำได้โดยการแปลงจากรูปแบบ Polar form ให้เป็น Rectangular form โดยมีผลลัพธ์ตาม Equation 2 โดยมุมอ้างอิงที่ใช้สำหรับความยาวคลื่น 450, 500, 550, 570, 600, 650 นาโนเมตร คือ 265, 205, 145, 85, 25, 325 องศา ตามลำดับ โดยได้ค่ามากจากการเก็บค่าจริง และทำการคำนวณย้อนกลับหามุมที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ

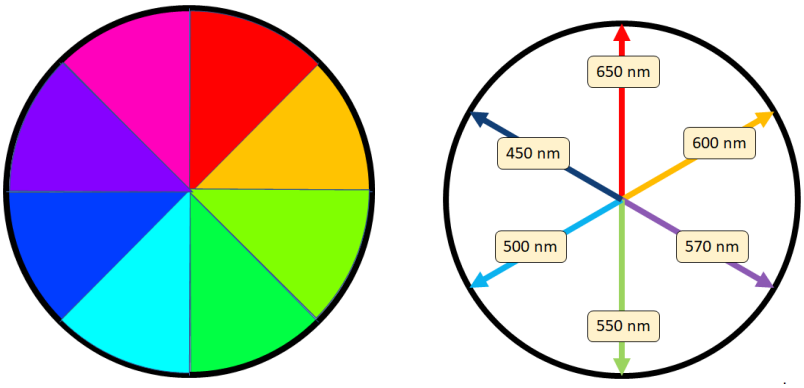


Fig. 2 Hue circle and wavelength distribution hypothesis

$$\mathbf{S_H \angle \theta_H} = \sum \mathbf{S_x \angle \theta_x}. \quad (1)$$

โดยที่ S_x คือ ค่าจากอุปกรณ์วัด ในช่วงความยาวคลื่น x

θ_x คือ ค่ามุมอ้างอิง ในช่วงความยาวคลื่น x

$$\mathbf{Hue} = \mathbf{tan^{-1}}\left(\frac{\sum \mathbf{Si_x}}{\sum \mathbf{Co_x}}\right). \quad (2)$$

โดยที่ Hue คือ ค่าเนื้อของสี

$Si_x = S_x \sin\theta_x$.

$Co_x = S_x \cos\theta_x$.

ผลทดสอบการอ่านค่าสีจากวัสดุการพิมพ์

การสะท้อนของสีจากการพิมพ์บนกระดาษปอนด์หนา 80, 90, 100, 150 และ กระดาษอาร์ตหนา 190 แกรมส่งผลต่อค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดโดยกระดาษที่มีความหนามากกว่าจะให้ค่าการสะท้อนแสงได้ดีกว่ากระดาษที่มีความหนาน้อยกว่า แต่ความแตกต่างของค่าไม่มีผลต่อการแปลงค่าอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยผลจากการวัดค่าด้วยการวัสดุการพิมพ์ต่างๆ มีผลตาม Table 2

Table *2* Result of Paper Reflection Test

Color	Average Value from Spectral Sensor				
	Pond Paper 80 GSM	Pond Paper 90 GSM	Pond Paper 100 GSM	Pond Paper 150 GSM	Glossy Art 190 GSM
White	1160	1132	1197	1220	1257
Black	122	135	150	155	161
Red	381	407	415	439	436
Green	320	321	348	357	342
Blue	326	320	333	370	353
Yellow	952	958	986	1053	1066
Cyan	395	402	433	454	473
Magenta	424	431	466	525	518

วิธีการสั่งงานด้วยสี

Hue ในมาตรฐาน HSL เป็นเกณฑ์ในการกำหนดรหัสสีโดยแบ่งเป็น 16 ช่วง ซึ่งสีที่ใช้ในแต่ละช่วงจะได้ผลลัพธ์ดัง Fig. 3 โดยรหัสที่ได้เป็นตาม Table 3 และค่าทียอมรับได้ต้องมีค่าการสะท้อนกลับเฉลี่ยเมื่อเทียบกับการสะท้อนบนสีขาวอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.8 เท่า โดยหุ่นยนต์จะใช้อุปกรณ์วัดจำนวน 2 ตัวในการอ่านป้ายสีพร้อมกันทั้ง 2 แผ่นป้ายและ ทำการแปลผลจากอุปกรณ์วัดทั้ง 2 และ สร้างเป็นรหัส 2 หลักต่อ 1 คำสั่งจึงทำให้รองรับคำสั่งทั้งหมด 256 คำสั่ง โดยแต่ละป้ายคำสั่งมีการคลาดเคลื่อนของค่าสีอยู่ที่ ±3 องศา จากค่าเฉลี่ย

Table 3 Compare table between color code and hue value

Hue Value	0–22	22–45	45–67	67-90	90-112	112-135	135-157	157-180
Color Code	0 Red	1 Orange	2 Amber	3 Yellow	4 Lime	5 Mint	6 Green	7 Jade
Hue Value	180–202	202–225	225–247	247–270	270–292	292–315	315–337	337–360
Color Code	8 Jungle	9 Teal	A Sky	B Blue	C Pigeon	D Violet	E Purple	F Pink

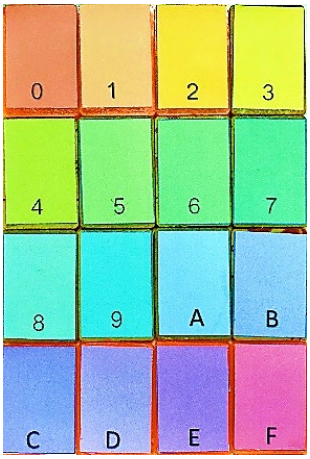


Fig. 3 Color command plate example

การใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ประกอบด้วยส่วนบอร์ดสมองกลฝังตัวชื่อ Kidsmark ที่พัฒนาขึ้นโดยรศ.ณัฐวุฒิ ขวัญแก้วโดยโปรแกรมด้วยภาษาไมโครไพทอน, อุปกรณ์รับค่า (AS7262) ใต้ตัวหุ่นและ ส่วนล้อ (Micro metal geared motor with encoder) พร้อมจอ (LED Matrix) สำหรับแสดงผล โดยหุ่นยนต์จะทำการรับค่าจากสีที่ใต้ฐานตัวหุ่นดัง Fig. 4 โดยการรับค่าจากด้านล่างจะช่วยให้แสงที่รับเป็นแสงที่สะท้อนจากป้ายคำสั่งเพียงเท่านั้นและ ทำการแปลงเป็นรหัสสีเพื่อใช้เป็นคำสั่งในการแสดงผลตามการตั้งค่าโดยตัวหุ่นยนต์สามารถรองรับคำสั่งได้ทั้งสิ้น 256 คำสั่งเป็นรหัสตั้งแต่ 00 ถึง FF ซึ่งคำสั่งพื้นฐานมีตัวอย่างดังนี้ เช่นรหัสสี 04 แทนด้วยคำสั่งเดินหน้า, รหัสสี 40 แทนด้วยคำสั่งถอยหลัง, รหัสสี 09 แทนด้วยเลี้ยวซ้ายและ รหัสสี 90 แทนด้วยคำสั่งเลี้ยวขวาดัง Fig. 5 และ สามารถสร้างเป็นชุดคำสั่งได้โดยการเปิดใช้รูปแบบสั่งงานแบบบันทึกผ่านรหัสสีที่กำหนดไว้จากนั้นป้อนคำสั่งแบบต่อเนื่องและ ทำการสั่งเล่นชุดคำสั่งเป็นการบอกหุ่นยนต์ถึงการจบชุดคำสั่งตาม Fig. 6

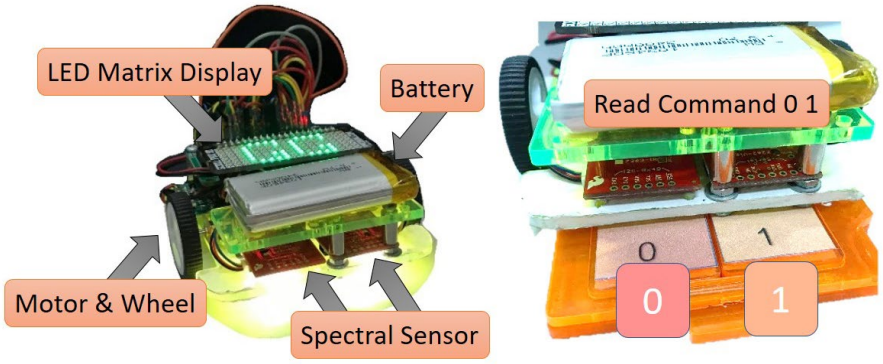


Fig. 4 Prototype robot and method to input color command

Color Code	Color Code	Command	Color Code	Color Code	Command
0	4	Forward	6	0	Backward Right 45°
4	0	Backward	0	7	Zigzag Left
0	3	Rotate Left	7	0	Zigzag Right
3	0	Rotate Right	0	8	Ladder Up
0	9	Turn Left	8	0	Ladder Down
9	0	Turn Right	0	1	Parking Left
0	5	Forward Left 45°	1	0	Parking Right
5	0	Forward Right 45°	0	2	U turn
0	6	Backward Left 45°	2	0	Reverse u turn

Fig. 5 Example color code and command

```
Innitail_Sensor()
WHILE True
    Record = False
    List_of_command = []
    Get Spectal_Sensor_A, Spectal_Sensor_B
    Hue_A = CalculateHUE ( Spectal_Sensor_A)
    Hue_B = CalculateHUE ( Spectal_Sensor_B)
    IF HUE_A = "F" AND HUE_A = "0"
        Record = True
    ELIF HUE_A = "0" AND HUE_A = "F"
        Record = False
    ENDIF
    List_of_command = Add_to_List ( Hue_A,Hue_B, List_of_command)
    IF Record = false
        Action(List_of_command)
        List_of_command = []
    ENDIF
ENDWHILE
```

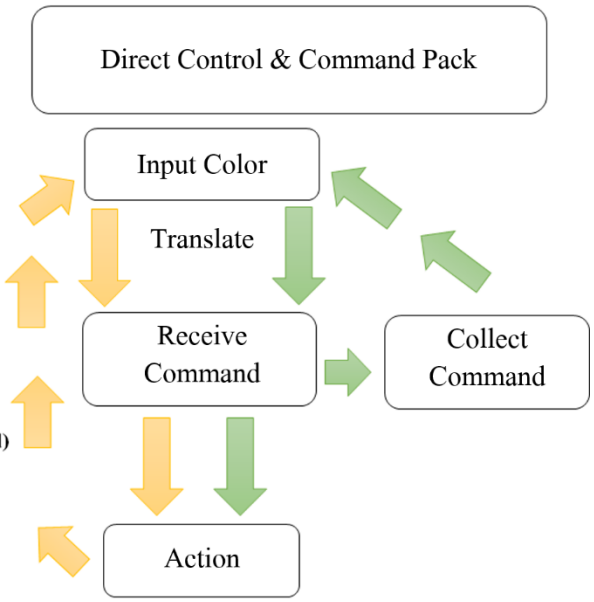


Fig. 6 Command flow

สรุป

หุ่นยนต์สั่งงานด้วยอุปกรณ์*วัดสเปกตรัมของแสง*ด้วยการโปรแกรมแบบจับต้องได้โดยการอ่านค่าจากคำสั่งที่จับต้องได้คือการ์ดสีซึ่งเป็นตัวแทนของทั้งคำสั่งพื้นฐาน และคำสั่งประยุกต์ ซึ่งการใช้งานไม่จำเป็นต้องใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์แต่สามารถนำไปเรียนรู้การคิดเชิงคำนวณได้ จึงเรียกได้ว่าเป็นหุ่นยนต์ที่โปรแกรมแบบจับต้องได้และ การโปรแกรมหุ่นยนต์แบบจับต้องได้สามารถเรียนรู้ง่ายกว่าการโปรแกรมผ่านคอมพิวเตอร์ เพราะการสั่งงานสามารถตอบสนองกันได้อย่างชัดเจน เห็นได้ถึงการผิดพลาดของคำสั่งที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์ ซึ่งจำให้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการคิดเชิงคำนวณและ สามารถพัฒนาไปใช้ในการเขียนโปรแกรมผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ณัฐวุฒิ ขวัญแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาในการทำงาน และคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนพัฒนานวัตกรรมของนิสิตระดับปริญญาโท ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ตามวัตถุประสงค์อย่างครบถ้วน

เอกสารอ้างอิง

วรวิทย์ ไชยวงศ์คต. 2562. ทำไมต้องเรียน วิทยาการคำนวณ. http://teemtaro.com/research/ทำไมต้องเรียน-วิทยาการค/, 10 กันยายน 2563.

AMS. 2017. AS7262 Consumer grade smart 6-Channel VIS sensor. ams Datasheet 1. https://ams.com/as7262, 10 March 2020

Khamphroo, M., Kwankeo, N., Kaemarungsi, K., Fukawa, K. 2017. Integrating micropython-based educational mobile robot with wireless network. Paper presented at the 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE).

Mohammed Abu, Q., Abuhadrous, I., Elaydi, H. 2010. Modeling and simulation of 5 DOF educational robot arm. Paper presented at the 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control.

Sapounidis, T., Demetriadis, S. 2017. Educational robots driven by tangible programming languages: A review on the field. 560: 205–214. DOI:10.1007/978-3-319-55553-9_16

Wikipedia. 2020. Hue. https://en.wikipedia.org/wiki/Hue, 10 March 2020.

การประยุกต์ใช้แบบจำลองชลศาสตร์หนึ่งมิติสำหรับคาดการณ์และเตือนภัยน้ำหลาก: กรณีพื้นที่ศึกษาเทศบาลเมืองน่าน

An application of flood prediction and warning system using one-dimensional hydrodynamic model: Case study of Nan Municipality

ธัญชนก เลิศพิพัฒน์กุล, ดนย์ปภพ มะณี*

Thanchanok Ledpipatkoon, Donpapob Manee*

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

เทศบาลเมืองน่านเป็นพื้นที่หนึ่งในประเทศไทยที่ประสบปัญหาน้ำท่วมขังซ้ำซาก เนื่องจากสาเหตุมีฝนตกติดต่อกันต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2549 ปริมาณน้ำได้เอ่อล้นตลิ่งไหลเข้าท่วมบ้านเรือนราษฎรน่าน ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่บ้านเรือน และพื้นที่เกษตรกรรม การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์น้ำท่วมที่จะเกิดขึ้นในเทศบาลเมืองน่าน โดยการจำลองสภาพการไหลในแม่น้ำน่านตั้งแต่สถานีวัดน้ำท่า N.64 ถึงสถานีวัดน้ำท่า N.13A ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE11 ในการวิเคราะห์สภาพน้ำหลากและพยากรณ์ระดับน้ำล่วงหน้า โดยใช้ 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ 1.แบบจำลองย่อยน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff model) 2. แบบจำลองสภาพการไหล (Hydrodynamic model) และ 3. แบบจำลองพยากรณ์น้ำหลาก (Data Assimilation model) โดยเริ่มพยากรณ์ตั้งแต่วันที่ 20 จนถึงวันที่ 27 สิงหาคม 2549 ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง DA ให้ผลการพยากรณ์ระดับน้ำในช่วง 1 วันล่วงหน้าไปจนถึง 3 วันล่วงหน้า จะมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 99.77, 99.73 และ 99.71 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การพยากรณ์น้ำหลาก, เทศบาลเมืองน่าน, MIKE 11

Abstract

Nan's municipality is one of the frequent inundated area due to the heavy rainfall. The Nan's municipality was flooded with highest inundation depth in 2006. The water level also rised suddenly and flow into the city Nan's and agriculture area nearly. The objective of this study is to forecast the river discharge and water depth in advance using mathematical model namely "MIKE11" which is covered area between two water level gauging station of N.64 and N.13A station. The MIKE11 model consists of 3 sub-model such (i) rainfall-runoff model (ii) hydrodynamic model (iii) data assimilation model. The time of forecast was started from 20th to 27th August 2006. The results were found average accuracy of forecasting results at all stations revealed that for first day forecast, second day forecast, and third day forecast were 99.77, 99.73 and 99.71 respectively

Keywords: flood forecasting, Nan's Municipality, MIKE 11

คำนำ

จังหวัดน่านเกิดปัญหาน้ำท่วมในเทศบาลเมืองน่านอย่างซ้ำซากบ่อยครั้ง โดยประสบน้ำท่วมขัง 4–7 ครั้งในรอบ 10 ปี การเกิดอุทกภัยส่วนใหญ่เกิดจากการมีฝนตกชุกติดต่อกัน ส่งผลให้ระดับน้ำในแม่น้ำน่านล้นตลิ่ง และไหลบ่าเข้าท่วมบ้านเรือนราษฎรในเขตพื้นที่เทศบาลเมืองน่าน ทำให้ประชาชนในพื้นที่ไม่สามารถรับมือได้อย่างทันท่วงที จากสภาพปัญหาอุทกภัยที่เกิดขึ้น (บุษปกร, 2555) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองชลศาสตร์ของระบบแม่น้ำ (HEC-RAS) เพื่อจัดทำแผนที่น้ำท่วมและวางแผนจัดการน้ำท่วม โดยเลือกวิเคราะห์เหตุการณ์น้ำท่วมในลุ่มน้ำน่าน พ.ศ. 2549 ดังนั้นหากมีการพยากรณ์น้ำที่มีความแม่นยำก็จะสามารถเตือนภัยให้ประชาชนในพื้นที่รับมือได้ทันท่วงที โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11-Data Assimilation (DA) เป็นแบบจำลองที่พยากรณ์ปริมาณการไหลและระดับน้ำได้อย่างแม่นยำ โดย (นิพัทธ์, 2562) ได้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11-Data Assimilation พยากรณ์น้ำท่วมในลุ่มน้ำป่าสักตอนบน โดยมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยในการพยากรณ์น้ำล่วงหน้า 1 วัน 2 วัน และ 3 วัน ร้อยละ 96.44 94.55 และ 92.98 ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลอง MIKE11-Data Assimilation ถือเป็นทางเลือกที่ดีในการประยุกต์ใช้เพื่อประกอบการตัดสินใจในการแจ้งเตือนภัย เนื่องจากมีหลักการที่น่าสนใจ น่าเชื่อถือ และมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์น้ำ

พื้นที่ศึกษา

จังหวัดน่านอยู่ในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดน่าน ส่วนใหญ่ประกอบด้วยภูเขาและป่าไม้ ซึ่งมีความลาดชันเกินกว่า 30 องศา มีแม่น้ำสายหลักคือแม่น้ำน่าน โดยมีต้นกำเนิดมาจาก ภูแว เป็นภูเขาที่สำคัญ ตั้งอยู่ทางทิศเหนือของเขตอำเภอปัว (สำนักงานเกษตรจังหวัดน่าน, 2557) โดยการศึกษานี้จะศึกษาบริเวณอำเภอเมืองน่าน พื้นที่ลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 5,291 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุม 6 ลุ่มน้ำย่อย ตั้งแต่สถานีวัดน้ำท่า N.64 ถึงสถานีวัดน้ำท่า N.13A และสถานีวัดน้ำฝน 8 สถานี เพื่อทำการจำลองสภาพการไหลของแม่น้ำน่านด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11 แสดงใน Fig. 1A และแผนผังระบบแม่น้ำน่านตอนบน ใน Fig. 1B

(A) (B)

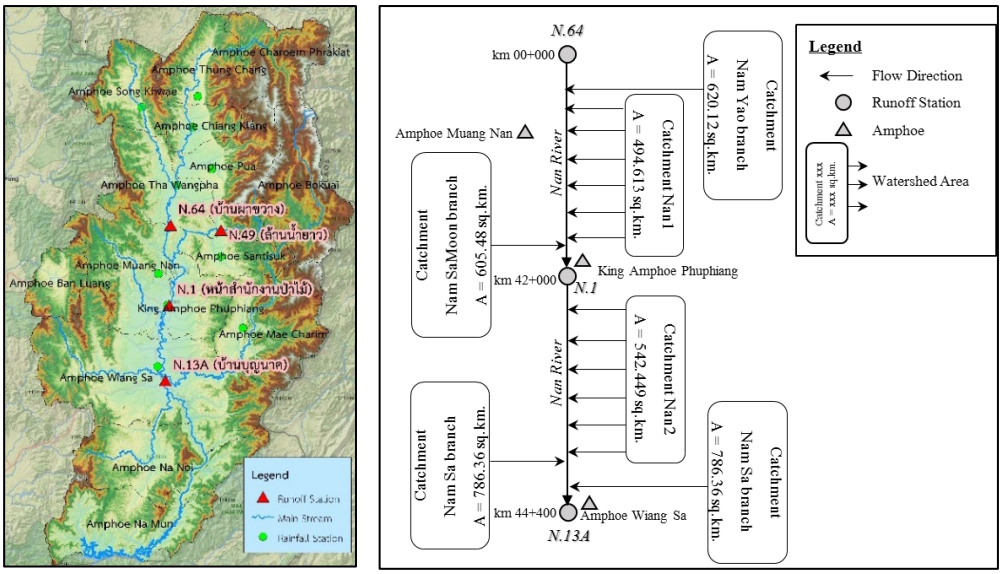


Fig. 1 The locations of rain gage station and discharge station (A) The schematic system at Nan river (B)

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลอง MIKE 11 ซึ่งพัฒนาโดย Danish Hydraulic Institute (DHI) จากประเทศเดนมาร์ก แบบจำลอง MIKE 11 จะประกอบด้วยแบบจำลองย่อยหลายชุด ในการศึกษานี้ใช้ 3 แบบจำลองย่อย คือ

1. แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model, NAM model) เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่จำลองกระบวนการเปลี่ยนน้ำฝนเป็นน้ำท่าที่เกิดขึ้นในระดับลุ่มน้ำ สามารถสร้างพื้นที่รับน้ำเป็นพื้นที่เดียวหรือเป็นลุ่มน้ำขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยหลายพื้นที่รับน้ำ และลำน้ำสาขาที่มีความซับซ้อน (Danish Hydraulic Institute, 2017) และสามารถใช้เพื่อประมาณค่าการไหลเข้าด้านข้างของลุ่มน้ำย่อยของแม่น้ำทั้งหมดแบบไม่มีสถานีวัดน้ำท่า

2. แบบจำลองสภาพการไหล (Hydrodynamic Model, HD model) แบบจำลอง HD model เป็นแบบจำลองที่คำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำแบบ 1 มิติในแม่น้ำ ซึ่งผลการคำนวณจะให้ค่าระดับน้ำและอัตราการไหลในแม่น้ำ โดยใช้ข้อมูลทางกายภาพของลำน้ำเป็นข้อมูลหลัก ได้แก่ โครงข่ายลำน้ำ รูปตัดลำน้ำ อัตราการไหลเข้าด้านข้าง และอาคารบังคับน้ำ

3. แบบจำลองพยากรณ์น้ำ (Data Assimilation model, DA model) เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับคำนวณระดับน้ำหรือปริมาณการไหลล่วงหน้า โดยแบบจำลอง DA model ถือเป็นการเพิ่มความสามารถพิเศษในการปรับผลการคำนวณจากแบบจำลองระบบแม่น้ำ NAM และ HD กับค่าที่ตรวจวัดได้จริง (Observe) ให้มีค่าตรงกัน โดยช่วงเวลาที่กำหนดตามหลักการพยากรณ์น้ำด้วยวิธีนี้นั้น เพียงกำหนดช่วงเวลาในการพยากรณ์ (Time of Forecast, ToF) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาที่จะต้องจัดเตรียมข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยาให้กับแบบจำลองและระยะเวลาที่จะทำการพยากรณ์น้ำในแต่ละครั้ง (runtime) โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลาซึ่งยึดเวลา ToF เป็นตัวแบ่ง (วิษุวัฒก์, 2554) ได้แก่

1) ช่วงเวลาก่อนพยากรณ์ (Hindcast Period) เป็นช่วงเวลาที่มีข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยาที่ตรวจวัดได้

2) ช่วงเวลาพยากรณ์น้ำล่วงหน้า (Forecast Period) เป็นช่วงเวลาที่แบบจำลองจะประมาณค่าขอบเขตได้แก่ ปริมาณน้ำฝนหรือปริมาณการไหลในช่วงพยากรณ์ล่วงหน้า ซึ่งจะนำไปใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition)

การกำหนดสมการในการพยากรณ์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองมีทั้งหมด 2 สมการคือ สมการ Linear Error Forecasting Model และสมการ Non-linear Error Forecasting Model (สรวรรณ, 2561) ในการศึกษานี้ จะใช้สมการ Linear Error Forecasting Model เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายความคลาดเคลื่อน

เกณฑ์การประเมินผลประสิทธิภาพแบบจำลอง

ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง จะเป็นการหาความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่คำนวณได้จากแบบจำลองเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า สำหรับในการศึกษานี้ได้ใช้ค่าทางสถิติที่นำมาวิเคราะห์การเข้ากันได้ของข้อมูลทั้งสองมีทั้งหมด 3 สมการ คือ

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (Coefficient of Determination, R^2) ควรมีค่าตั้งแต่ 0.8 ถึง 1 จึงจะถือว่าการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถคำนวณได้จาก Equation 1

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (Q_{oi} - \overline{Q_o}) \times (Q_{ci} - \overline{Q_c})}{\sum_{i=1}^{N} (Q_{oi} - \overline{Q_o})^2 \times \sum_{i=1}^{N} (Q_{ci} - \overline{Q_c})^2} \right]^2 \quad (1)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของสมดุลน้ำ (Water Balance Error, WBL) เป็นตัวแปรทางสถิติที่แสดงความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าสะสมระหว่างปริมาณน้ำท่าที่คำนวณด้วยแบบจำลองและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สามารถคำนวณได้จาก Equation 2

$$WBL = \frac{\sum_{i=1}^{N} Q_{ci} - \sum_{i=1}^{N} Q_{oi}}{\sum_{i=1}^{N} Q_{oi}} \times 100\% \quad (2)$$

รากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) เป็นตัวแปรทางสถิติที่แสดงความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Absolute Error) ระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สามารถคำนวณได้จาก Equation 3

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (Q_{oi} - Q_{ci})^2} \quad (3)$$

เมื่อ Q_{oi} คือ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงที่เวลา i

Q_{ci} คือ ข้อมูลที่ได้จากการแบบจำลองที่เวลา i

$\overline{Q_o}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง

$\overline{Q_c}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

N คือ จำนวนของชุดข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบ

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการดำเนินงาน

1. ทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการจัดทำแบบจำลองคณิตศาสตร์ 1 มิติ ดังนี้

- ข้อมูลน้ำฝนรายวัน จำนวน 8 สถานี จากกรมชลประทาน เป็นสถานีวัดน้ำฝนที่ผ่านการคัดเลือกโดยวิธีเส้นทับทวี (Double Mass Curve)
- ข้อมูลอัตราการระเหยจากถาดวัด จำนวน 1 สถานี คือ สถานีวัดน้ำท่า N.13A จากกรมอุตุนิยมวิทยา
- ข้อมูลระดับน้ำและปริมาณน้ำท่า จำนวน 3 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า N.64 สถานีวัดน้ำท่า N.1 และสถานีวัดน้ำท่า N.13A
- ข้อมูลโค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับปริมาณการไหล (rating curve) ที่สถานีวัดน้ำท่า N.13A
- ข้อมูลรูปตัดลำน้ำ จำนวน 40 รูปตัด สำรวจโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2551

2. จัดทำแบบจำลองระบบแม่น้ำ เป็นขั้นตอนแรกของการดำเนินงาน โดยครอบคลุมพื้นที่แม่น้ำน่านตอนบน ตั้งแต่สถานีวัดน้ำท่า N.64 ซึ่งเป็นขอบเขตเหนือน้ำของอำเภอเมืองน่าน จนถึงสถานีวัดน้ำท่า N.13A คิดเป็นพื้นที่ 5,291 ตารางกิโลเมตร ระยะทางตามแนวลำน้ำตั้งแต่ขอบเขตด้านเหนือน้ำลงมาถึงขอบเขตด้านท้ายน้ำ 86.4 กิโลเมตร ดังแสดงใน Fig. 1B

3. การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff model, NAM model) โดยใช้ข้อมูลน้ำฝนรายวัน ข้อมูลการระเหย และปริมาณการไหลรายวัน โดยการสอบเทียบเลือกใช้ข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2550–2552 และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง เลือกใช้ข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2553–2555 จำนวน 2 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า N.64 ซึ่งตั้งอยู่บริเวณแม่น้ำน่าน ในเขตอำเภอเมืองน่านตอนบน และสถานีวัดน้ำท่า N.1 ซึ่งตั้งอยู่บริเวณกลางอำเภอเมืองน่าน สำหรับการประเมินผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง จะใช้ค่าดัชนีทางสถิติ 3 ตัวแปร ดังแสดงใน Equation 1–3

4. การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองสภาพการไหล (Hydrodynamic model, HD model) จะใช้ข้อมูลรายวันของปริมาณการไหล ระดับน้ำ และโค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับปริมาณการไหล (rating curve) ที่สถานีวัดน้ำท่า N.13A เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานท้องน้ำ (Manning's n) ที่เป็นตัวแทนของสภาพการไหลของแม่น้ำน่าน โดยการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง เลือกใช้ข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2549 และ พ.ศ. 2554 ตามลำดับ

5. การจัดทำแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (NAM model) ร่วมกับ แบบจำลองสภาพการไหล (HD model) โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองย่อยทั้งสองในการจำลองสภาพการเกิดอุทกภัยในช่วงปี พ.ศ. 2549 โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของระบบแม่น้ำน่าน แสดงได้ดังนี้

- ขอบเขตด้านเหนือน้ำ (upstream boundary) ใช้ปริมาณการไหลรายวันที่สถานีวัดน้ำท่า N.64
- ขอบเขตด้านท้ายน้ำ (downstream boundary) ใช้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับปริมาณการไหล (rating curve) ที่สถานี N.13A
- ปริมาณการไหลเข้าด้านข้างของลุ่มน้ำ (lateral sideflow) ที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่า กำหนดให้ใช้ปริมาณการไหลที่ประเมินได้จากแบบจำลอง NAM จำนวน 6 ลุ่มน้ำย่อย

6. การจัดทำแบบจำลองพยากรณ์น้ำ (Data Assimilation model, DA model) โดยนำแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (NAM model) และแบบจำลองสภาพการไกล (HD model) ที่ผ่านการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์มาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์น้ำในช่วงฤดูน้ำหลาก ปี พ.ศ. 2549 ซึ่งได้พิจารณาที่จุดสถานีวัดน้ำท่า N.1 ในเขตเทศบาลเมืองน่าน ในการจัดทำแบบจำลอง DA model ตั้งค่าช่วงก่อนการพยากรณ์ (Hindcast Period) 7 วันย้อนหลัง และในช่วงหลังการพยากรณ์ (Forecast Period) เท่ากับ 7 วันล่วงหน้าจากวันที่พยากรณ์ (ToF) โดยเริ่มพยากรณ์ในวันที่ 20 สิงหาคม 2549 สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำ จะใช้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้กับค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า

ทำการสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (NAM model) ที่สถานีวัดน้ำท่า N.64 ซึ่งตั้งอยู่บริเวณแม่น้ำน่านสายหลัก เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสม สำหรับเงื่อนไขทางด้านเหนือน้ำและนำเข้าสู่แบบจำลองชลศาสตร์ โดยผลการสอบเทียบ (Calibration) ของแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า N.64 มีค่า R^2 และ WBL เท่ากับ 0.801 และ -10.1% แสดงใน Fig. 2 และผลการตรวจพิสูจน์ (Verification) มีค่า R^2 และ WBL เท่ากับ 0.643 และ 7.6% แสดงใน Fig. 3 ซึ่งผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจทั้งสองช่วง

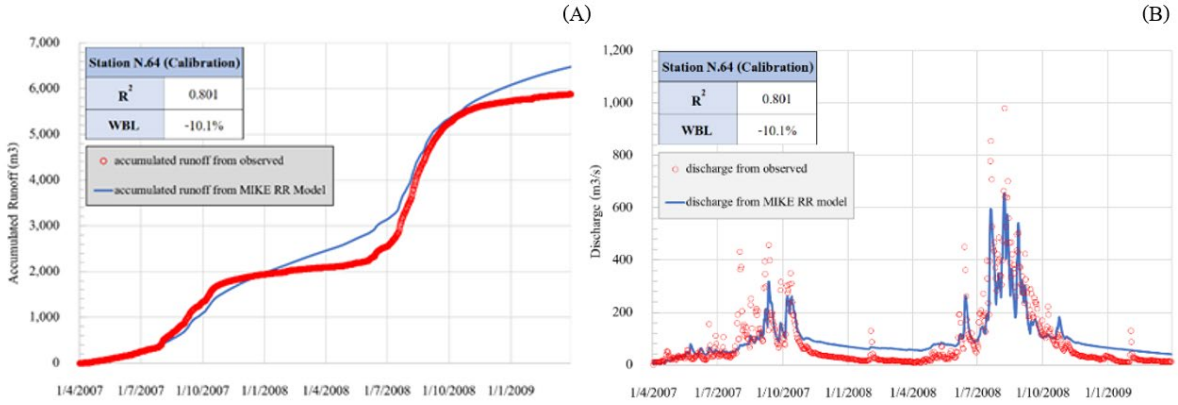


Fig. 2 The comparison between observed and simulated river accumulated runoff (A) and river discharge (B) at N.64 station for calibration of MIKE11-NAM model

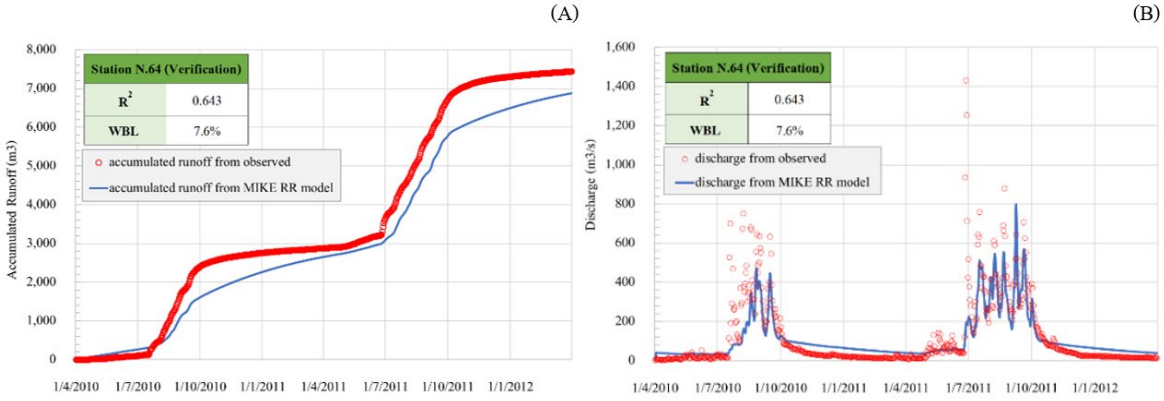


Fig. 3 The comparison between observed and simulated river accumulated runoff (A) and river discharge (B) at N.64 station for verification of MIKE11-NAM model

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองสภาพการไหล

ในการสอบเทียบแบบจำลองสภาพการไหล (HD model) ได้ทำการสอบเทียบในฤดูฝน โดยเลือกเหตุการณ์น้ำท่วมปี พ.ศ. 2549 และตรวจพิสูจน์ในปีพ.ศ. 2554 เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานท้องน้ำ (Manning's n) ของแบบจำลองครอบคลุมเหตุการณ์น้ำท่วมที่เคยเกิดขึ้นได้ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานท้องน้ำ

(Manning's n) ของแม่น้ำน่าน มีค่าเท่ากับ 0.035 ที่สถานีวัดน้ำท่า N.1 โดยผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองระดับน้ำที่สถานีวัดน้ำท่า N.1 ผลการสอบเทียบ (Calibration) ในปี ค.ศ. 2006 ค่า R^2 เท่ากับ 0.979 และค่า RSME เฉลี่ยเท่ากับ 0.01 เมตร และผลการตรวจพิสูจน์ (Verification) และในปี ค.ศ. 2011 ค่า R^2 เท่ากับ 0.942 และค่า RSME เฉลี่ยเท่ากับ 0.09 เมตร ดังแสดงใน Fig. 4 ซึ่งผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์อยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดี เนื่องจากมีค่า RSME เข้าใกล้ศูนย์ และค่า R^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8–1.0

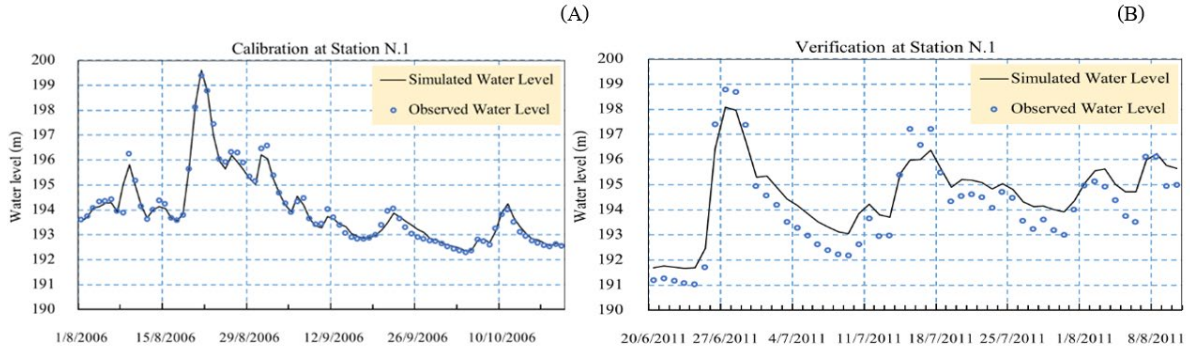


Fig. 4 The comparison between observed and simulated water level of hydrodynamic result at N.1 station (A) calibration (B) verification

ผลการพยากรณ์ระดับน้ำ

การพยากรณ์ระดับน้ำล่วงหน้าซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่วันที่ 20 สิงหาคม 2549 ถึง วันที่ 27 สิงหาคม 2549 ที่สถานีวัดน้ำท่า N.1 ในแม่น้ำน่าน ซึ่งได้สรุปผลค่าความแม่นยำของผลการพยากรณ์ในรูปของค่าคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ตรวจวัดได้จริงกับค่าที่แบบจำลองพยากรณ์น้ำล่วงหน้าออกไปตั้งแต่ 1 ถึง 3 วัน ดังใน Table 1 และได้แสดงกราฟผลการพยากรณ์น้ำของสถานีวัดน้ำท่า N.1 ไว้ใน Fig. 5 จาก Tabel 1 พบว่า แบบจำลอง DA ให้ผลการพยากรณ์น้ำเป็นที่น่าพอใจในระดับดีมาก โดยผลการพยากรณ์ระดับน้ำในช่วง 1 วันล่วงหน้าของสถานีวัดน้ำท่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.23 และอยู่ในช่วง 0.10 ถึง 0.39 สำหรับผลการพยากรณ์น้ำในช่วง 2 วันล่วงหน้ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.27 และอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 0.39 และผลการพยากรณ์น้ำในวันที่ 3 จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.29 และอยู่ในช่วง 0.39 ถึง 0.14 ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อพยากรณ์น้ำล่วงหน้าออกไปหลายมากวันขึ้น

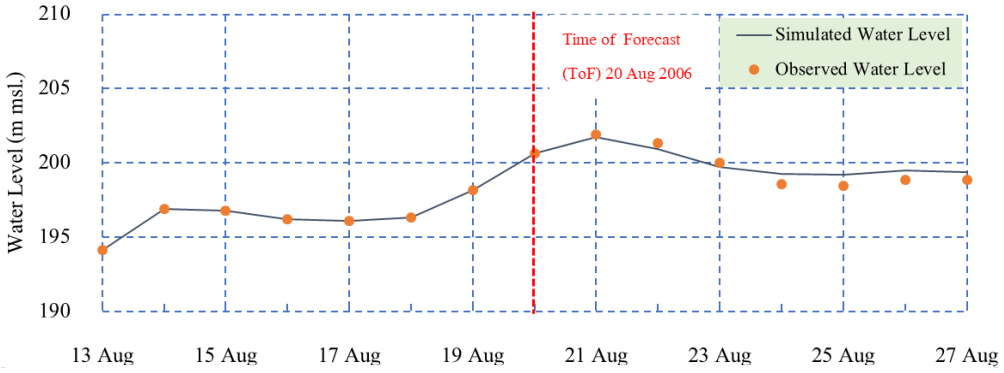


Fig. 5 Flood Forecast Model at N.1 station on 13–27 August 2006 (Time of Forecast 20 August 2006)

Table 1 The error of forecast water level with the DA model during 20–27 August 2006

Time of Forecast	Error between observed and simulated water level (%)		
	Forecast 1 day	Forecast 2 days	Forecast 3 days
20 August 2006	0.10	0.19	0.14
21 August 2006	0.19	0.14	0.33
22 August 2006	0.14	0.33	0.39
23 August 2006	0.33	0.39	0.31
24 August 2006	0.39	0.31	0.27
Maximum error (%)	0.39	0.39	0.39
Minimum error (%)	0.10	0.14	0.14
Average error (%)	0.23	0.27	0.29

สรุป

ลุ่มน้ำน่าน ถึงแม้ว่าจะเป็นแม่น้ำที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก แต่พื้นที่ค่อนข้างเป็นเขาชัน ทำให้มีน้ำป่าไหลป่าเข้าท่วมบ้านเรือนและพื้นที่การเกษตรอยู่บ่อยครั้ง ผลการศึกษาในครั้งนี้ ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์น้ำ และได้ทดสอบกับเหตุการณ์อุทกภัยในปี พ.ศ. 2549 โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานท้องน้ำ (Manning's n) ของแม่น้ำน่านตอนบนเท่ากับ 0.035 โดยแบบจำลองที่พัฒนา มีความแม่นยำในการพยากรณ์สูงสุดในช่วง 1 วันล่วงหน้า ที่ร้อยละ 99.77 แต่ความแม่นยำจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อพยากรณ์ล่วงหน้าออกไปหลายวันมากขึ้น เนื่องจากยังขาดการพยากรณ์ฝนล่วงหน้าที่มีความแม่นยำสูง ดังนั้นเมื่อใดที่มีแนวโน้มจะเกิดอุทกภัยขึ้นในอนาคต แบบจำลอง DA model ถือว่าเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการคาดการณ์แนวโน้มของการเกิดอุทกภัยของลุ่มน้ำน่านตอนบน เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีการแสดงผลที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลฝนพยากรณ์จากหน่วยงานต่าง ๆ จะสามารถพยากรณ์น้ำได้มีความแม่นยำมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ กรมอุตุนิยมวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และส่วนบริหารจัดการน้ำ สำนักงานชลประทานที่ 2 กรมชลประทาน ที่อนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ประกอบการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

นิพัทธ์ ทองประไพ, วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ. 2562. การพยากรณ์น้ำท่วมในลุ่มน้ำป่าสักตอนบนโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11-Data Assimilation. THAICID NATIONAL SYMPOSIUM ครั้งที่ 12: 194–207.

บุษปกร ขันติธีระกวี. 2555. การประยุกต์แบบจำลอง HEC-RAS เพื่อการจัดการน้ำท่วมในลุ่มน้ำน่านส่วนบน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ, กิติพงศ์ ทองเชื้อ. 2554. การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11-Data Assimilation เพื่อการพยากรณ์น้ำท่วมในลุ่มน้ำชีตอนบน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล.

สรวรรณ สมบูรณ์ปัญญา, จิระวัฒน์ กณะสุต, ดนย์ปภพ มะณี, ยุทธนา ตาละลักษมณ์, ณัฐ มาแจ้ง. 2561. การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการพยากรณ์น้ำหลากในลุ่มน้ำเพชรบุรี. ใน: Thaicid National Symposium ครั้งที่ 11: 45–57.

สำนักงานเกษตรจังหวัดน่าน. 2557. ข้อมูลทางกายภาพจังหวัดน่าน. http://www.nan.doae.go.th/general/b2555/book, 3 มกราคม 2564.

DHI Water Environment and Health. 2017. MIKE11-A modelling system for rivers and channels, Reference Manual. DHI, Denmark.

การประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์ของการก่อสร้างทางเชื่อมผืนป่าบนทางหลวงหมายเลข 304

Carbon footprint assessment of the wildlife corridor on Highway 304

พรพิมล สุดจันทึก*, สุชีลา พลเรือง

Pornpimon Sudchanthuek*, Sucheela Polruang

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: Pornpimon.sudc@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 304 ซึ่งประกอบด้วยการก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ป่าข้ามและสะพานยกระดับสัตว์ลอด โดยทำการคำนวณหาปริมาณคาร์บอนฟุตพรินท์ในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลเมตร โดยพิจารณาจากแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกจากการได้มาซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง การขนส่ง และการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากการดำเนินงานของเครื่องจักรในช่วงที่มีการก่อสร้าง จากการคำนวณปริมาณคาร์บอนฟุตพรินท์ที่เกิดจากกิจกรรมก่อสร้างพบว่าในงานก่อสร้างอุโมงค์และงานสะพานยกระดับทางลอดมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 35,231.17 tCO_2e/km และ 17,807.26 tCO_2e/km ตามลำดับ กิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุดในการก่อสร้างอุโมงค์คือ งานชิ้นส่วนผนังอุโมงค์คิดเป็นสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 36.11 % เนื่องจากมีการใช้ปริมาณวัสดุประเภทคอนกรีต เหล็กเสริมจำนวนมากในงานหล่อชิ้นส่วนผนังอุโมงค์และในการก่อสร้างสะพานยกระดับทางลอดกิจกรรมที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคืองานหล่อเสาในพื้นที่ คิดเป็นสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 58.20 % เนื่องจากมีการใช้เหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างสะพานปริมาณมากและมีการขนส่งในระยะทางที่ไกลประมาณ 200 km

คำสำคัญ: การก่อสร้างอุโมงค์, การประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์, ทางเชื่อมผืนป่า

Abstract

The objective of this research was to estimate greenhouse gas (GHG) emission from construction of highway no. 304, which included the construction of tunnel and bridge highway as wildlife corridor. The functional unit was given as kilogram or ton CO_2 equivalent per kilometer of highway construction. The scope of this work included carbon footprint of raw material production, transportation and energy used during the construction period. The results showed that GHG emission of tunnel construction process was higher than those of bridge construction process, which was 35,231.17 tCO_2e/km and 17,807.26 tCO_2e/km, respectively. For tunnel construction, wall construction was an activity with the highest GHG emissions (36.11%) because of high amount of concrete and steel. Whereas for bridge construction, about 58.20 % of GHG was emitted due to amount of steel used for construction and production of reinforced concrete, which must be transported from a warehouse about 200 km away.

Keywords: carbon footprint assessment, tunnel construction, wildlife corridor

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นที่เกิดจากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่จากการดำเนินงานก่อสร้าง เช่น กิจกรรมการผลิตจัดเตรียมวัสดุ กระบวนการก่อสร้าง การขนส่งวัสดุทั้งจากภายในและภายนอกเขตก่อสร้าง และการเกิดการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องจักร ยานพาหนะที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งจากการศึกษาของ Network Rail เรื่องการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์ในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานรางรถไฟในลอนดอนพบว่าค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) ในส่วนของอุโมงค์มีค่า 4–5 เท่าต่อระยะทาง 1 km ของถนนแบบเปิดโล่ง (Pritchard and Preston, 2018)

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากกิจกรรมการก่อสร้างทางเชื่อมผืนป่า หมายเลข 304 อ.กบินทร์บุรี – ปักธงชัย ซึ่งมีรูปแบบการก่อสร้างทางสัตว์ผ่านเป็นลักษณะอุโมงค์สัตว์ข้ามและสะพานยกระดับสัตว์ลอด (บ.เอ็นริช คอนซัลแตนท์, 2558) โดยใช้การประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์ของผลิตภัณฑ์เป็นแนวทางเพื่อหาค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกิจกรรมงานก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ป่าข้ามด้วยวิธีเปิดหน้าดินและถมกลับ (Cut & Cover) และการก่อสร้างสะพานยกระดับสัตว์ลอดเพื่อนำมาเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของลักษณะการก่อสร้างที่มีรูปแบบการก่อสร้างที่แตกต่างกัน แล้วนำผลการประเมินมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาวิธีการก่อสร้างที่สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อไป

วิธีการ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์โดยการใช้วิธีประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์ของผลิตภัณฑ์ มาใช้เป็นแนวทางโดยมีขอบเขตการประเมินตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้เชื้อเพลิงของเครื่องจักรในการดำเนินงาน โดยทำการศึกษาโครงการก่อสร้างทางเชื่อมผืนป่า หมายเลข 304 อ.กบินทร์บุรี–ปักธงชัย ซึ่งมีรูปแบบการก่อสร้างเป็นอุโมงค์สัตว์ข้ามชนิดดินตัดและถมกลับ (Cut & Cover) ความยาวอุโมงค์ 430 เมตร และสะพานยกระดับสัตว์ลอด ความยาวสะพาน 570 เมตร ความสูงโดยเฉลี่ย 8–10 เมตร ขนาด 4 ช่องจราจร ลักษณะโครงสร้างสะพานเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก พื้นสะพานรองรับด้วยคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว U (U-Girder) โดยมีขั้นตอนการประเมินดังรายละเอียดดังนี้

1.การกำหนดขอบเขตและเป้าหมายการประเมิน

ในงานวิจัยนี้พิจารณาจากกระบวนการก่อสร้างที่มีแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกมาจากการได้มาซึ่งวัสดุ การขนส่งวัสดุและการใช้เชื้อเพลิงจากการดำเนินงานของเครื่องจักรในระยะก่อสร้างแสดงดัง Fig. 1 โดยแบ่งเป็นกิจกรรมย่อยตามขั้นตอนการก่อสร้างเพื่อสามารถระบุรายการสิ่งนำเข้าในกระบวนการก่อสร้างได้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบการก่อสร้างอุโมงค์ในลักษณะที่แตกต่างกันโดยรายงานผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลเมตร (tCO_2e/km) โดยแบ่งตามแหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งทางตรงและทางอ้อมได้ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง (Direct Emission) คือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมก่อสร้างโดยตรงภายในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างระยะทาง 2 km ได้แก่ การใช้เชื้อเพลิงของเครื่องจักรในการดำเนินงาน แพลนท์คอนกรีตสำเร็จรูป และยังรวมถึงการขนส่งวัสดุก่อสร้างจากโกดังเก็บวัสดุถึงเขตพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งมีระยะทางประมาณ 200 km

2. แหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (Indirect Emission) คือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้งานของวัสดุก่อสร้างที่ผ่านกระบวนการผลิตจากโรงงานภายนอกพื้นที่ก่อสร้าง โดยเป็นวัสดุสำเร็จรูปพร้อมใช้งานได้แก่ เหล็กเสริม เหล็กโครงสร้าง หิน ดิน ทราย ตะแกรงเหล็กไวร์เมช และผลิตภัณฑ์ก่อสร้างอื่น ๆ

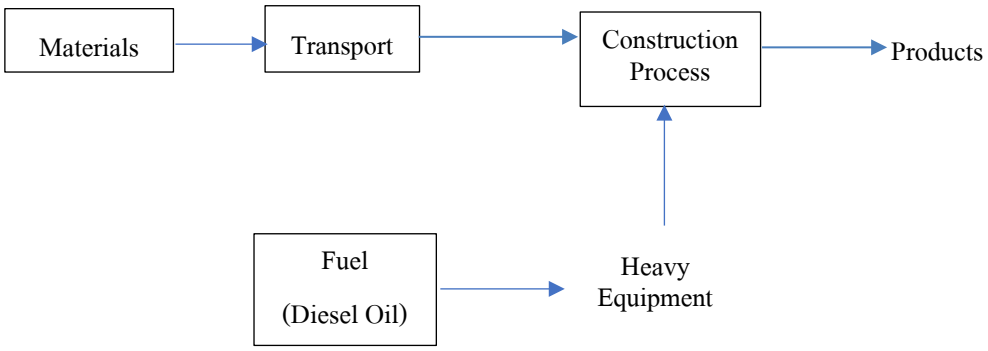


Fig. 1 Scope of construction life cycle study

2.การเก็บข้อมูล

1. การเก็บข้อมูลจากการดำเนินงานก่อสร้างจากผู้รับเหมาและการศึกษากระบวนการก่อสร้าง และรวบรวมบันทึกข้อมูลการดำเนินงาน เช่น รายการแสดงปริมาณวัสดุ ระยะทางการขนส่ง ปริมาณเชื้อเพลิง ชนิดของเครื่องจักร

2. ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือ เช่น องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก และงานวิจัยโครงการก่อสร้างประเภทเดียวกัน

3.การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการก่อสร้างอุโมงค์และสะพานสามารถคำนวณได้จาก Equation 1

$$\text{GHG Emission} = \text{AD} \times \text{Emission Factor} \quad (1)$$

เมื่อ GHG Emission (E) คือปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($kgCO_2e$)

AD (Activity Data) คือ ข้อมูลการดำเนินกิจกรรม

Emission Factor คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ ($kgCO_2e$/unit)

ในการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีการคำนวณโดยพิจารณาได้จากแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกจากการได้มาซึ่งวัสดุ การขนส่ง และการใช้เชื้อเพลิงในการดำเนินการก่อสร้างโดยสามารถคำนวณได้จาก Equations 2–5 ดังนี้ (นิกร, 2555)

E material = ปริมาณวัสดุก่อสร้าง × Emission Factor (2)

E transport (ขาไป) = น้ำหนักวัสดุ (Ton) × ระยะทาง (km) × Emission Factor (3)

E transport (ขากลับ) = $\frac{\text{น้ำหนักวัสดุ (Ton)}}{\text{Equipment load (Ton)}}$ × ระยะทาง (km) × Emission Factor (4)

E Energy = ปริมาณเชื้อเพลิง (l) × Emission Factor (5)

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลแล้วสามารถระบุสิ่งนำเข้าในกิจกรรมการก่อสร้างได้โดยวัสดุก่อสร้างส่วนใหญ่ที่ใช้ได้แก่ คอนกรีตสำเร็จรูป เหล็กเส้น ตะแกรงเหล็กไวร์เมช ทรายถม หินคลุก และอื่นๆ ทำการขนส่งวัสดุจากแหล่งจัดเก็บวัสดุต่างๆมายังแหล่งจัดเก็บวัสดุของโครงการเป็นระยะทางประมาณ 200 km และจากแหล่งจัดเก็บวัสดุของโครงการไปบริเวณพื้นที่ก่อสร้างอุโมงค์และสะพานมีระยะทาง 2 km ในการดำเนินกิจกรรมงานดิน งานติดตั้งจะมีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากกการทำงานของเครื่องจักรหนักชนิดเครื่องยนต์ดีเซล เช่น การใช้รถแบคโฮ รถบดอัดดิน รถบรรทุก รถเครน เป็นต้น ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมดังกล่าว

ผลการวิจัย

จากการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยในงานก่อสร้างอุโมงค์ทางสัตว์ข้ามชนิดดินตัดและถมกลับ (Cut & Cover) ความยาวอุโมงค์รวม 430 m สามารถแบ่งกิจกรรมการก่อสร้างได้เป็น 6 ขั้นตอน คือ 1. งานปรับพื้นที่ 2. งานเจาะเสาเข็ม 3.งานชิ้นส่วนอุโมงค์สำเร็จรูป 4. งานโครงสร้างอุโมงค์ 5. งานปากทางเข้าอุโมงค์ 6. งานถมหลังอุโมงค์ และการก่อสร้างสะพานยกระดับสัตว์ลอดความยาว 570 m. ลักษณะโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ประกอบด้วยกิจกรรมก่อสร้างหลัก 5 ขั้นตอนคือ 1. งานปรับพื้นที่ 2.งานเจาะเสาเข็ม 3. งานโครงสร้างสะพาน เช่น เสา คาน 4. งานแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตสำเร็จรูป 5. งานราวกันสะพาน โดยพิจารณาจากแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการดำเนินกิจกรรมการก่อสร้าง โดยมีขอบเขตตั้งแต่การได้มาซึ่งวัสดุ การขนส่ง และการเผาไหม้พลังงานเชื้อเพลิงจากการดำเนินงานก่อสร้าง สามารถแสดงผลการคำนวณได้ดังตาราง Table 1, Table 2 และ Table 3

Table 1 Emission of Tunnel Construction (total distance 0.43 km)

Activity	Raw Materials (tCO_2e)	Fuel (tCO_2e)	Transport (tCO_2e)	Total GHG Emission (tCO_2e)
Clearing	140.25	75.21	4.08	219.53
Bored Pile	3,818.28	61.61	18.82	3,898.71
Precast Concrete Panel	5,258.03	50.74	161.07	5,469.84
Structure	2,414.01	32.79	12.08	2,458.88
Entrance Area	2,174.10	87.31	1.69	2,263.11
Backfill for tunnel	128.02	428.69	282.62	839.33
Total GHG Emission	13,932.68	736.36	480.36	15,149.40

Table 2 Emission of Bridge Construction (total distance 0.57 km)

Activity	Raw Materials (tCO_2e)	Fuel (tCO_2e)	Transport (tCO_2e)	Total GHG Emission (tCO_2e)
Clearing	0.15	36.04	9.50	45.69
Bored Pile	1,638.37	61.38	7.97	1,707.72
Structure	5,398.60	160.37	348.28	5,907.26
Precast Concrete Slab	1,893.03	41.23	270.22	2,204.47
Barrier	152.89	108.73	23.37	285.00
Total GHG Emission	9,083.04	407.75	659.34	10,150.14

Table 3 Comparison of GHG emissions during Tunnel & Bridge in carbon dioxide equivalent (tCO_2e/km)

Source	Tunnel	% GHG emissions of Tunnel	Bridge	%GHG emissions of Bridge
Raw Materials	32,401.59	91.97	15,935.16	89.49
Fuel	1,712.46	4.86	715.36	4.02
Transport	1,117.12	3.17	1,156.74	6.49
Total	35,231.17	100.00	17,807.26	100.00

จากการคำนวณพบว่าการก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ข้ามมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คือ 15,149.40 tCO_2e และรูปแบบสะพานยกระดับสัตว์ลอด มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ 10,150.14 tCO_2e ดังแสดงใน Table 1 และ 2 เมื่อเทียบในหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลเมตร การก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ข้ามความยาว 0.43 km ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะเท่ากับ 35,231.17 tCO_2e/km และการก่อสร้างสะพานยกระดับสัตว์ลอดมีความยาว 0.57 km ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะเท่ากับ 17,807.26 tCO_2e/km ซึ่งเมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกทั้ง 3 แหล่งตาม Table 3 พบว่าสาเหตุหลักของการปล่อยปริมาณคาร์บอนฟุตพรินท์จากทั้งสองโครงสร้างคือการได้มาซึ่งวัสดุก่อสร้างในปริมาณมากถึงมากกว่า 90% และกิจกรรมที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคืองานหล่อชิ้นส่วนอุโมงค์และโครงสร้างสะพานเนื่องจากมีปริมาณการใช้วัสดุประเภทคอนกรีต เหล็กเส้นในปริมาณมาก โดยในกระบวนการผลิตวัสดุก่อสร้างทั้ง 2 ชนิด มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงถึง 317 $kgCO_2e/m^3$ (อบก., 2559) และ 1.76 $kgCO_2e$/kg (คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพรินท์ของผลิตภัณฑ์, 2554) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกทางตรงและทางอ้อมโดยคำนวณจากขอบเขตของการดำเนินกิจกรรมงานก่อสร้าง เช่น แหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกทางตรงที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งวัสดุ และปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องจักร และแหล่งกำเนิดมลพิษทางอ้อมเกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากปริมาณการใช้วัสดุก่อสร้างสำเร็จรูปที่พร้อมใช้งาน เช่น เหล็ก หิน ทราย ตะแกรงเหล็ก ฯลฯ พบว่าปริมาณการปล่อยคาร์บอน

ฟุตพรินท์จากการก่อสร้างอุโมงค์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดมลพิษทางตรงคิดเป็นสัดส่วน 38 % และแหล่งกำเนิดมลพิษทางอ้อมมีปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพรินท์คิดเป็นสัดส่วน 62 % แหล่งกำเนิดมลพิษทางอ้อมส่วนใหญ่มาจากวัสดุก่อสร้างสำเร็จรูปที่ผ่านกระบวนการผลิตในโรงงานจากโรงงานภายนอกพื้นที่ก่อสร้าง เช่น แผ่นชิ้นส่วนอุโมงค์สำเร็จรูป เหล็ก และการก่อสร้างสะพานมีการปล่อยคาร์บอนฟุตพรินท์จากแหล่งกำเนิดมลพิษทางตรงคิดเป็นสัดส่วน 54 % และแหล่งกำเนิดทางอ้อมคิดเป็นสัดส่วน 46 % ส่วนใหญ่เกิดจากแหล่งกำเนิดมลพิษทางตรงซึ่งเกิดจากการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปในเขตก่อสร้าง ในงานหล่อเสาในพื้นที่และงานเทพื้นคอนกรีต

เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในงานอุโมงค์ต่างประเทศ

จากการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ข้ามซึ่งมีรูปแบบการก่อสร้างแบบเปิดหน้าดินและถมกลับ (Cut & Cover) ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยในต่างประเทศที่มีการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกการการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีวิธีการก่อสร้างที่ต่างกัน เนื่องจากในการประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์ของการก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ข้าม ยังไม่มีงานวิจัยที่แพร่หลายผู้วิจัยจึงเลือกกรณีศึกษาการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันประกอบด้วยงานวิจัยในต่างประเทศ 4 กรณีศึกษา เป็นการก่อสร้างอุโมงค์ในงานโครงสร้างพื้นฐานรางรถไฟ นำมาเปรียบเทียบกับการก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ข้าม (Wildlife Overpass)ในงานวิจัยนี้ ดังรายละเอียด Table 4 โดยในแต่ละงานวิจัยได้ทำการประเมินจากแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการก่อสร้าง ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัสดุ ขนส่ง และการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการดำเนินงานเหมือนกัน จากลักษณะอุโมงค์ที่มีรูปแบบแตกต่างกันจึงกำหนดหน่วยการทำงาน (Functional Unit) ให้แสดงผลในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเลนต่อกิโลเมตร (tCO_2e/lane/km) แสดงผลการเปรียบเทียบได้ดัง Table 5 ลักษณะข้อมูลของโครงการก่อสร้างอุโมงค์รูปแบบต่าง ๆประกอบด้วยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ที่ใช้สำหรับในงานศึกษานี้ประกอบด้วย 3 วิธี มีรายละเอียดดังนี้

1. วิธีเปิดหน้าดินและถมกลับ (Cut & Cover) คือการขุดเปิดหน้าดินแล้วสร้างอุโมงค์หลังจากนั้นจึงทำการกลบดินทับ เป็นวิธีก่อสร้างที่ง่ายที่สุดเหมาะกับร่องเขาที่มีลักษณะตื้น มีพื้นที่กว้าง

2. วิธีขุดเจาะอุโมงค์ด้วยเครื่องจักร Tunnel Boring Machine (TBM) คือการเจาะนำใต้ดินแล้วติดตั้งชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จค้ำยันเอาไว้รอบโพรงเพื่อป้องกันการทรุดตัวของดินกลบอุโมงค์ ซึ่งหัวเจาะจะทำการเจาะผ่านดินอย่างช้า ๆ แล้วถูกขนย้ายออกมาโดยสายพานลำเลียง

3. วิธีขุดเจาะอุโมงค์ด้วยเครื่องจักร New Austrian Tunneling Method (NATM) ซึ่งจะทำการฉีดพ่นคอนกรีต มีความยืดหยุ่นในการนำมาใช้กับอุโมงค์ได้หลายรูปร่างและใช้ได้กับอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่มาก

กรณีศึกษา

จากการก่อสร้างอุโมงค์รูปแบบต่าง ๆนำมาศึกษาหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้จากกรณีศึกษาดังนี้

1. The Devil's Slide Tunnel (DST) เป็นอุโมงค์รางรถไฟในโครงการ California High Speed Rail (CAHSR) ซึ่งเป็นการก่อสร้างโครงสร้างระบบรางรถไฟพื้นฐานเพื่อรองรับรถไฟความเร็วสูงในเมืองแคลิฟอเนียร์ ระยะทางรวม 138 กิโลเมตร มีขอบเขตการประเมินในช่วงที่มีการดำเนินการก่อสร้าง

2. Channel Tunnel Rail Link (CTRL) เป็นโครงการก่อสร้างระบบรางพื้นฐาน เพื่อรองรับรถไฟความเร็วสูงในประเทศอังกฤษ ประกอบด้วยการก่อสร้างอุโมงค์คู่รางเดี่ยวระยะทาง 7 กิโลเมตร

3. Crossrail Project เป็นโครงการก่อสร้างรางรถไฟในกรุงลอนดอน มีขอบเขตการประเมินการปล่อยคาร์บอนจากการผลิตวัสดุ การขนส่งวัสดุไปกำจัด การใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการก่อสร้างทั้งทางตรงและทางอ้อม และการทำงานของเครื่องจักรขุดเจาะ ใช้ฐานข้อมูล Emission Factor จาก DEFRA's Guidance (2008)

4. Sheikn Zayed Tunnel เป็นโครงการก่อสร้างปรับปรุงถนน Al Salam เพื่อปรับปรุงการจราจรและขยายเขตเมืองในเมืองอาบูดาบี ประเทศสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ มีลักษณะเป็นทางลอด Underpass

Table 4 Specification for tunnels

Tunnel Name	Tunnel Construction	length (km.)	Diameter (km)	Number of lane	Type of Tunnel
DST	NATM	49	9	1	Twin Bore
CTRL	TBM	7	7.15	1	
Cross rail	TBM	17	6.2	1	
Sheikn Zayed Tunnel	Cut and cover	3.6	15	4	
Wildlife Overpass (this study)	Cut and cover	0.43	18.04	2	

Table 5 Comparison GHG emissions for different method of tunnel

Tunnel Name	Material	% GHG emission of material	Transport	% GHG emission of transport	Fuel for heavy equipment	% GHG emission of Fuel	tCO_2e /lane/km
DST	9,859.00	76.00	2,247.00	17.00	911.00	7.00	13,016.00
CTRL	8,457.00	60.00	29.00	1.0	5,500.00	39.00	13,986.00
Cross rail	15,303.00	65.00	1,309.00	6.00	7,040.00	30.00	23,652.00
Sheikn Zayed Tunnel	8,606.25	85.00	N/A		1,518.75	15.00	10,125.00
Wildlife Overpass (this study)	8,100.40	90.16	279.28	3.88	428.11	5.95	8,808.73

จากผลการเปรียบเทียบในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเลนต่อกิโลเมตร(tCO_2e/lane/km) ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีรูปแบบการก่อสร้างต่างกันทั้งในงานวิจัยนี้และงานวิจัยจากต่างประเทศซึ่งมีการประเมินในกระบวนการก่อสร้าง โดยพิจารณาแหล่งกำเนิดจากการได้มาซึ่งวัสดุ การขนส่ง และการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องจักร พบว่าการก่อสร้างอุโมงค์ Cross rail และ CTRL ที่มีวิธีการก่อสร้างแบบ TBM มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่าวิธีอื่น คือ 23,652.00 และ 13,986.00 tCO_2e/lane/km

ตามลำดับ รองลงมาคือการก่อสร้างอุโมงค์ DST ที่มีวิธีการก่อสร้างแบบ NATM มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 13,016.00 tCO_2e/lane/km และวิธีการก่อสร้างอุโมงค์แบบ Cut & Cover ในการก่อสร้างอุโมงค์ Wildlife Overpass (งานวิจัยนี้) และอุโมงค์ Sheikn Zayed มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 8,808.73 และ 10,125.00 tCO_2e/lane/km ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก วิธีการก่อสร้างอุโมงค์แบบเปิดหน้าดินแล้วถมกลับมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการได้มาซึ่งวัสดุสูงสุดคือ 90.16% (Wildlife Overpass) และ 85% (Sheikn Zayed Tunnel) ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณการใช้วัสดุชนิดคอนกรีตสำเร็จรูปและเหล็กเส้นสำหรับการหล่อชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก ในขณะที่วิธีการก่อสร้างอุโมงค์แบบ NATM และ TBM มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้เครื่องจักรสูงกว่าวิธีการก่อสร้างอุโมงค์แบบ Cut & Coverโดยมีค่าเท่ากับ 7–39% ดังแสดงในตาราง Table 5 เนื่องจากมีการใช้เครื่องจักรแบบหัวเจาะขนาดใหญ่ในการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเนื่องเป็นเวลานาน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีอื่นๆในงานวิจัยจากต่างประเทศกับในงานวิจัยนี้ที่ใช้วิธีการก่อสร้างแบบเปิดหน้าดินแล้วถมกลับในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเลนต่อกิโลเมตร ดังแสดงในตาราง Table 5 พบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุดในงานวิจัยจากต่างประเทศมีค่ามากกว่างานวิจัยนี้ประมาณ 1.2–2.7 เท่า เนื่องจากมีรูปแบบวิธีการก่อสร้างที่ต่างกันซึ่งเกิดจากลักษณะภูมิประเทศในแต่ละที่ไม่เหมือนกัน ชนิดของเครื่องจักรที่ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งการใช้เครื่องจักรแบบหัวเจาะจะใช้ระยะเวลาดำเนินงานนานซึ่งทำให้มีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงมากตามไปด้วย

สรุป

จากผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการก่อสร้างทางเชื่อมผืนป่าสรุปได้ว่าในกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์สัตว์ป่าข้ามและสะพานยกระดับสัตว์ลอดขึ้นอยู่กับขนาดของสิ่งก่อสร้าง เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของอุโมงค์ ปริมาณการใช้วัสดุก่อสร้าง ระยะทางการขนส่ง และปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งแต่ละรูปแบบมีลักษณะและวิธีการก่ออสร้างที่มีรูปแบบแตกต่างและซับซ้อนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ตามจุดประสงค์ของการใช้งาน เทคนิคและวิธีการก่อสร้าง เครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งปัจจัยทั้งหมดขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิประเทศ โดยในงานวิจัยนี้แหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดมาจากการได้มาซึ่งวัสดุซึ่งมีมากถึง 90% ดังนั้นแนวทางสำหรับการลดปริมาณปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงควรพิจารณารูปแบบการก่อสร้างที่มีการใช้วัสดุในปริมาณที่เหมาะสมตามการออกแบบและกำหนดแผนการใช้ปริมาณวัสดุให้พอดีต่อปริมาณงาน เพื่อลดการเกิดของเสียจากวัสดุก่อสร้าง และเลือกวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าวัสดุชนิดเดียวกัน ด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมในกระบวนการก่อสร้างในระยะก่อสร้าง ซึ่งประเมินจากมาตรฐาน IPCC ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระดับปานกลาง ที่อาจเกิดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น ภายหลังจากโครงการแล้วเสร็จส่งผลกระทบต่อสัตว์ป่าต่อการใช้ประโยชน์พื้นที่จากแนวเชื่อมผืนป่าส่งผลให้สัตว์ป่าเสียชีวิตจากการถูกรถชนน้อยลงและสามารถใช้พื้นที่แนวเชื่อมผืนป่าเพื่อขยายพันธุ์และสามารถหาแหล่งอาหารแหล่งที่อยู่อาศัยเพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณข้อมูลจากกรมทางหลวงและบริษัท อิตาเลียนไทย จำกัด (มหาชน) ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลและให้คำแนะนำสำหรับข้อมูลการดำเนินงานก่อสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการด้านเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตปริ้นของผลิตภัณฑ์. 2554. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตปริ้นของผลิตภัณฑ์. พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

นิกร เจียมวรพงศ์. 2555. การศึกษากระบวนการก่อสร้างโครงการคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับบ้านพักอาศัยที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อโดยใช้การประเมินคาร์บอนฟุตพรินท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สิริกานตย์ นิธิศักดิยานนท์. 2559. การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าโดยใช้การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. 2559. Emission Factor. http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/, 20 มีนาคม 2562.

Chang, B., Kendall, A. 2011. Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system. J. Sci. Transportation. 16: 429–434.

James, A., Pritchard, J.P. 2018. Understanding the contribution of tunnels to the overall energy consumption of and carbon emissions from railway. J. Sci. Transportation. 65: 551–563.

Alzard, M.H., Maraqa, M.A., Chowdhury, R., Khan, Q., Albuquerque, F.D.B., Mauga, T.I., Aljunadi, K.N. 2019. Estimation of greenhouse gas emissions produced by road projects in Abu Dhabi, United Arab Emirates. J. Sustainability 11: 2367. doi.org/10.3390/su11082367

การวิเคราะห์หาปริมาณไมโครพลาสติกของเสื้อผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ถูกปล่อยจากกระบวนการซักผ้า

Fibrous microplastics released from washing processes of polyester fabric

สาธิตา แก้วเขียว*, สุชีลา พลเรือง

Satita Kaeokhiao*, Sucheela Polruanga

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: Satita.kae@ku.th

บทคัดย่อ

ในการศึกษาได้ทำการหาปริมาณไมโครพลาสติกชนิดเส้นใยที่ถูกปล่อยจากการซักเสื้อโพลีเอสเตอร์ 100% โดยการใช้เครื่องซักผ้าเทียบกับการซักผ้าด้วยมือ ในการทดลองได้ทำการเก็บน้ำทิ้งจากขั้นตอนการซักผ้าด้วยผงซักฟอกและน้ำทิ้งจากขั้นตอนการล้างผ้ามาผ่านตะแกรงขนาดรู 300 และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ พบว่าการซักด้วยเครื่องมีปริมาณเส้นใยเฉลี่ยจากน้ำซักและน้ำล้างผ้าค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร มากกว่าน้ำทิ้งจากการซักด้วยมือ 27.62 % และ 5.81 % ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณเส้นใยเฉลี่ยที่ถูกปล่อยจากการซักด้วยเครื่อง 1.66 และ 1.43 มิลลิกรัม และซักด้วยมือจำนวน 1.20 และ 1.35 มิลลิกรัมจากน้ำซักและน้ำล้างผ้าที่ค้างบนตะแกรง 300 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยเส้นใยดังกล่าวมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 17.72 และ 15.66 ไมโครเมตร ความยาวเฉลี่ย 1.57 และ 1.59 มิลลิเมตร จากน้ำซักผ้าและน้ำล้างผ้าตามลำดับ แต่การซักด้วยมือมีปริมาณเส้นใยจากน้ำซักค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 20 ไมโครเมตร มากกว่าน้ำซักจากเครื่องซักผ้า 31.16% คิดเป็นปริมาณเส้นใยเฉลี่ยที่ถูกปล่อยจากการซักด้วยเครื่อง 1.62 และ 2.02 มิลลิกรัมและซักด้วยมือจำนวน 2.35 และ 1.83 มิลลิกรัมจากน้ำซักและล้างผ้าที่ค้างบนตะแกรง 20 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยเส้นใยดังกล่าวมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 17.49 และ 17.65 ไมโครเมตร และความยาวเฉลี่ย 1.21 และ 1.29 มิลลิเมตร จากน้ำซักและล้างผ้า ตามลำดับ

คำสำคัญ: น้ำทิ้งจากการซักผ้า,โพลีเอสเตอร์,ไมโครพลาสติก

Abstract

The objective of this study was to evaluate the amount of fibrous microplastics released from washing machine compared to handwashing of 100% polyester T-shirts. In the experiments, the effluent collected from discharged detergent water and rinse water were sieved through 300 and 20 μm meshes, consecutively. The results showed that fibrous microplastics found in discharged detergent water and rinse water from washing machine stayed on the 300 μm mesh were higher than those from hand washing by 27.62% and 5.81%, respectively. The estimated amount of fibrous microplastics from discharged detergent water and rinse water from washing machine were 1.66 and 1.43 mg, where those from handwashing were 1.20 and 1.35 mg, respectively. The average size of fibers from discharged detergent water and rinse water were 17.72 and 15.66 μm in diameter, and 1.57 and 1.59 mm in length. On the contrary, fibrous microplastics found in discharged detergent water from hand washing stayed on the 20 μm mesh were higher than those from washing machine by 31.16 % . The estimated amount of fibrous microplastics from discharged detergent water and rinse water from washing machine were 1.62 and 2.02 mg, where those from handwashing were 2.35 and 1.83 mg, respectively. The average size of fibers from discharged detergent water and rinse water were 17.49 and 17.65 μm in diameter, and 1.21 and 1.29 mm in length.

Keywords: wastewater from washing process, polyester, microplastic

คำนำ

ปัจจุบันพลาสติกเข้ามามีบทบาทรอบตัวมากมาย ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในชีวิตประจำวันทำจากพลาสติก เนื่องจากพลาสติกสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายด้วยต้นทุนการผลิตต่ำและนำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น บรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ในครัวเรือน ของเล่นเด็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ด้วยปริมาณพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นและการจัดการขยะที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงก่อให้เกิดขยะพลาสติก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังมีภัยพลาสติกอีกรูปแบบหนึ่ง ที่เรียกว่าไมโครพลาสติก ไมโครพลาสติกเป็นพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร ไมโครพลาสติกมีที่มาจากหลายแหล่ง เช่น เกิดจากการเสียดสีของยางรถยนต์กับถนน หรือสีที่ใช้ทาอาคารหรือยานพาหนะ เม็ดพลาสติกที่เป็นวัสดุตั้งต้นของการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก เม็ดพลาสติกที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด หรือแม้กระทั่งผ้าที่ทำจากใยสังเคราะห์ ไมโครพลาสติกเหล่านี้ สามารถลอดผ่านจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียลงสู่ทะเลได้ อีกทั้งขยะพลาสติกที่มีขนาดใหญ่ที่ล่องลอยอยู่ในทะเลเมื่อถูกรังสียูวีจากดวงอาทิตย์ จะสลายโครงสร้างเป็นชิ้นเล็กลงได้ กลายเป็นไมโครพลาสติก

การปนเปื้อนของไมโครพลาสติกที่พบในสิ่งแวดล้อมส่วนหนึ่งมาจากการซักเสื้อผ้าที่ผลิตมาจากเส้นใยสังเคราะห์ โดยหลุดออกมาจากการซักผ้า นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการทดสอบเสื้อผ้าที่ทำจากพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ acrylic, polyester และ cotton-polyester เพื่อจะดูว่าเสื้อผ้าที่ผลิตจากใยสังเคราะห์ประเภทไหน มีชิ้นส่วนหลุดออกมาเยอะที่สุด โดยการนำเครื่องซักผ้าไปติดตั้งเครื่องกรองพิเศษ เพื่อจะจับและวัดปริมาณไมโครพลาสติกที่หลุดออกมาจากการซักผ้า ซึ่งได้ข้อสรุปของการทดลองพบว่า เสื้อผ้าที่มีใยผ้า acrylic มีเศษชิ้นส่วนหลุดออกมาเยอะที่สุดที่ 728,789 เส้นใยต่อการซัก 1 ครั้ง (Napper and Thompson, 2016)ในการซักผ้าแต่ละครั้ง จะมีเส้นใยจากไมโครพลาสติกหลุดออกมา เนื่องจากเครื่องซักผ้าส่วนใหญ่จะไม่มีเครื่องกรองที่สามารถดักจับไมโครพลาสติกเหล่านี้ได้ จึงทำให้เศษต่าง ๆ จากเสื้อผ้าของเราโดนระบายทิ้งไปกับน้ำ จากนั้นไมโครพลาสติกบางส่วนก็จะเดินทางต่อไปยังโรงบำบัดน้ำเสีย ซึ่งอาจจะไม่สามารถถูกกำจัดได้หมด เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อกำจัดของแข็งที่มีขนาดเล็กมากที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เช่น ไมโครพลาสติก จึงทำให้ไมโครพลาสติกเหล่านี้หลุดไปยังแหล่งน้ำธรรมชาติ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาปริมาณไมโครพลาสติกจากการซักเสื้อผ้าพอลิเอสเตอร์ 100% ด้วยเครื่องซักผ้าฝาบน และการซักผ้าด้วยมือ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยไมโครพลาสติกจากวิธีการซักที่แตกต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

1.) เครื่องซักผ้าฝาบน SAMSUNG รุ่น WA75H4000SG/ST 2.) เสื้อโพลีเอสเตอร์ 100%

3.) ตะแกรง (Sieve) ขนาด 330 ไมโครเมตร และ 20 ไมโครเมตร 4.) ผงซักฟอกและกะละมัง

อุปกรณ์การวิเคราะห์

1.) เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) 2.) ชุดกรองสูญญากาศ 3.) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง

4.) ตู้อบ 105 องศาเซลเซียส 5.) ตู้ดูดความชื้น 6.) กระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาดรูกรอง 11 ไมครอน

7.) กล้อง stereo microscope รุ่น Stemi 2000-C

วิธีการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลองและ 1 ชุดควบคุม ชุดการทดลอง 2 ชุด คือชุดการทดลองที่ซักด้วยเครื่องซักผ้า (เสื้อตัวที่ 1 และ 2) และการซักด้วยมือ (เสื้อตัวที่ 3 และ 4) และชุดควบคุมการทดลอง (เสื้อตัวที่ 5 และ 6) คือการแช่ผ้าทิ้งไว้ในน้ำซักและน้ำล้างโดยไม่ได้มีการปั่นหรือขยี้ผ้า โดยน้ำหนักเสื้อตัวที่ 1–6 ดังนี้ 93.2465 กรัม, 86.2690 กรัม, 79.6036 กรัม, 84.5092 กรัม, 79.6036 กรัม และ 89.2054 กรัม ตามลำดับ ทำการซักตัวละ 20 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งของการทดลอง จะใช้ปริมาณน้ำซักเท่ากับ 22.5 ลิตรและน้ำล้างเท่ากับ 27.5 ลิตร ปริมาณน้ำที่ใช้ในแต่ละครั้งและแต่ละชุดของการทดลองเท่ากัน ทั้งในการซักด้วยเครื่อง ซักด้วยมือและชุดควบคุม ในการเก็บตัวอย่างในแต่ละครั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์ ได้เก็บน้ำทิ้งจากการซักผ้าด้วยวิธีการซักด้วยเครื่องซักผ้า ซักด้วยมือ และชุดควบคุม โดยได้ทำการเก็บแยกน้ำทิ้งจากขั้นตอนการซักผ้าด้วยผงซักฟอก (รวมน้ำที่ออกมาจากการบิดผ้า) และขั้นตอนการล้างผ้า (รวมน้ำที่ออกมาจากขั้นตอนการบิดผ้า) จากนั้นนำน้ำดังกล่าวมาผ่านตะแกรง ขนาด 300 ไมโครเมตร และขนาด 20 ไมโครเมตร โดยให้ตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร อยู่ข้างบนและขนาด 20 ไมโครเมตร อยู่ข้างล่าง หลังจากนั้นเก็บน้ำจากตะแกรงแต่ละขนาด ใส่ในขวดขนาด 600 มิลลิลิตร โดยแยกขวดกันระหว่างน้ำที่ได้จากตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตรและตะแกรงขนาด 20 ไมโครเมตร ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งมีปริมาณน้ำ ปริมาณ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวัดความขุ่น และการชั่งน้ำหนักเส้นใยที่อยู่บนตะแกรง ทำการบันทึกผล และวิเคราะห์ผลการทดลอง

วิธีการวิเคราะห์

1.การวัดความขุ่น เติมน้ำตัวอย่างขนาด 600 มิลลิลิตร ที่ได้จากการทดลอง ลงในหลอดขนาด 15 มิลลิลิตร โดยมีการเขย่าขวดเพื่อให้เส้นใยเกิดการกระจายตัว และนำมาวัดความขุ่น ด้วยเครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter) หลังจากนั้นทำการบันทึกผลการวิเคราะห์ เมื่อได้ผลการวิเคราะห์แล้วให้เทตัวอย่างน้ำกลับคืนลงในขวด 600 มิลลิลิตร

2.ชั่งน้ำหนักเส้นใย นำกระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาดรูกรอง 11 ไมครอน พรมด้วยน้ำกลั่น และวางบนถ้วยอลูมิเนียม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที แล้วมาเข้าตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 20 นาที เพื่อไล่ความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่ที่ผ่านตู้อบความชื้นแล้วในหน่วยมิลลิกรัม จำนวน 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย และบันทึกผล เขย่าตัวอย่างน้ำ เทตัวอย่างน้ำที่ผ่านการวัดความขุ่นแล้วผ่านกระดาษกรองที่เตรียมไว้ลงกระดาษกรอง ด้วยชุดกรองสุญญากาศ อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง จำนวน

*3.*ครั้งแล้วหา ค่าเฉลี่ย และบันทึกผล

Table 1 Average turbidity of suspended fibrous microplastics in DI water (20 washing cycles): from detergent discharge

Turbidity – microplastics released from detergent discharge on a 300 µm-mesh sieve	Washing machine		Handwashing		Control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (NTU)	0.65	0.59	0.96	0.79	0.72	0.76
Average 2 Samples (NTU)	0.62		0.87		0.74	
% Turbidity - handwashing more than washing machine	29.18					
Turbidity – microplastics released from detergent discharge on a 20 µm-mesh sieve	Washing machine		Handwashing		Control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (NTU)	0.92	0.97	1.72	1.45	0.90	0.74
Average 2 Samples (NTU)	0.94		1.59		0.82	
% Turbidity -handwashing more than washing machine	40.44					

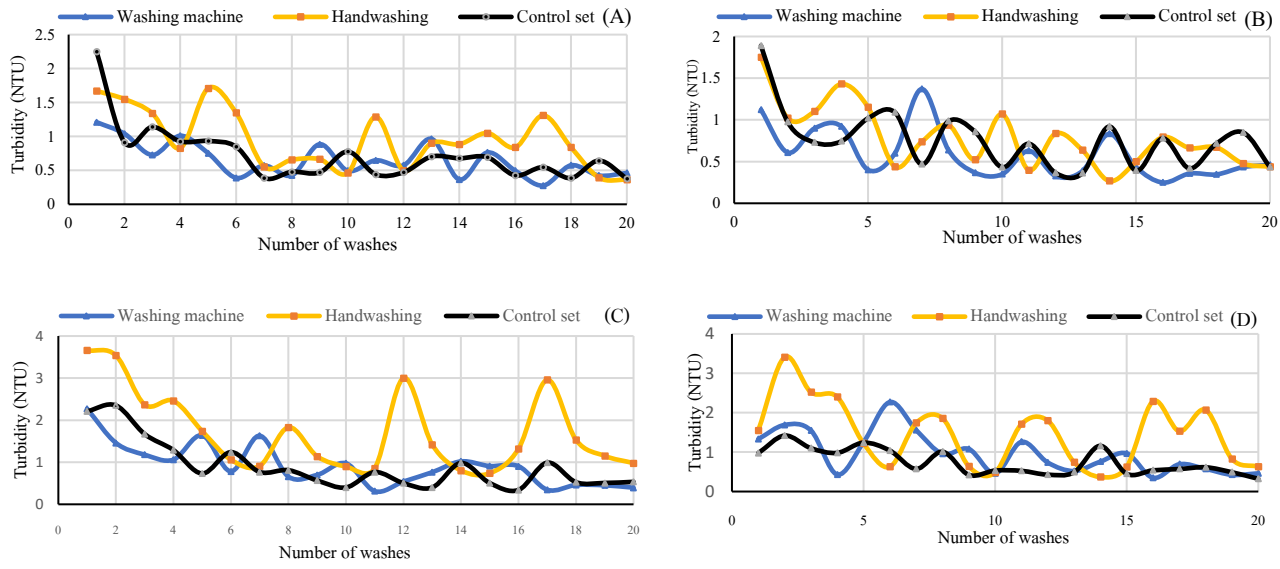


Fig. 1 Average turbidity of suspended fibrous microplastics in DI water (20 washing cycles): from detergent discharge; microplastics on a 300 µm-mesh sieve: (A) and (B), microplastics on a 20 µm-mesh sieve: (C) and (D)

Table 2 Average turbidity of suspended fibrous microplastics in DI water (20 washing cycles): from rinse water

Turbidity – microplastics released from rinse water on a 300 µm-mesh sieve	Washing machine		Handwashing		Control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (NTU)	0.51	0.63	0.55	0.54	0.48	0.45
Average 2 Samples (NTU)	0.57		0.54		0.47	
% Turbidity - washing machine more than handwashing	4.65					
Turbidity – microplastics released from rinse water on a 20 µm-mesh sieve	Washing machine		Handwashing		Control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (NTU)	0.61	1.07	1.07	1.04	0.64	0.57
Average 2 Samples (NTU)	0.84		1.05		0.60	
% Turbidity -handwashing more than washing machine	20.35					

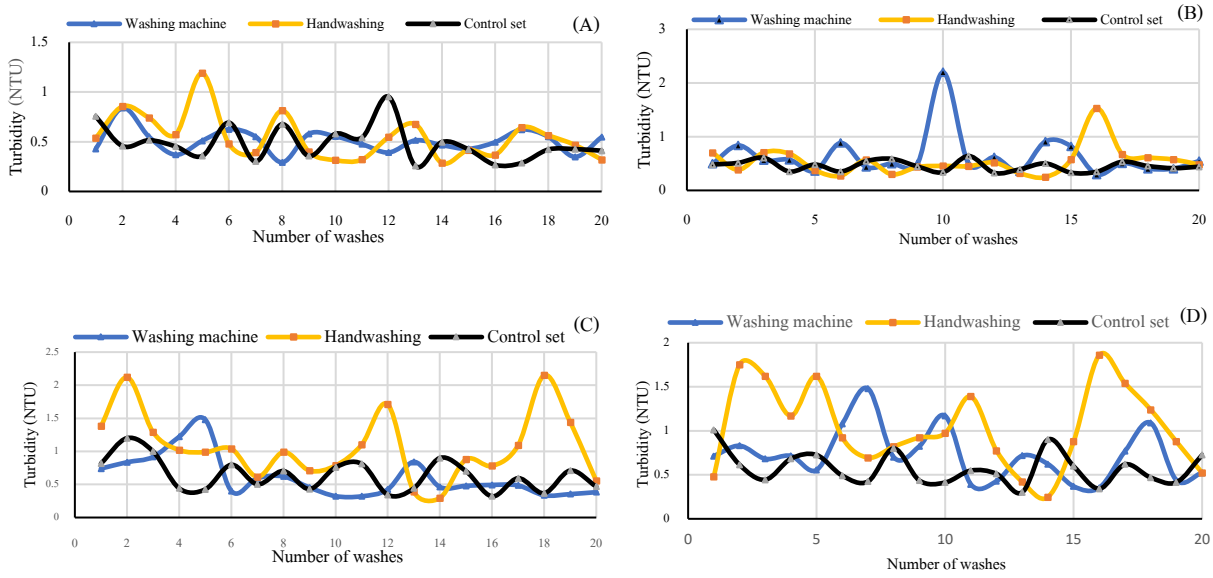


Fig. 2 Average turbidity of suspended fibrous microplastics in DI water (20 washing cycles): from rinse water; microplastics on a 300 µm-mesh sieve: (A) and (B), microplastics on a 20 µm-mesh sieve: (C) and (D)

จากค่าเฉลี่ยจะเห็นได้ว่าค่าความขุ่นของน้ำผ่านตะแกรงขนาด 20 ไมโครเมตรทั้งซักและล้างผ้ามีค่าความขุ่นที่มากกว่าขนาด 300 ไมโครเมตร แสดงดัง Table 1 และ Table 2 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับจำนวนครั้งที่ซักโดยการแช่ผ้าพบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ เมื่อจำนวนครั้งที่ซักมากขึ้นไปจนถึง 20 ครั้งความขุ่นมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (ณัฏฐ์นรี และ วริษา, 2562) แสดงดัง Fig. 1 และ Fig. 2

Table 3 Average amount of fibrous microplastics released from detergent discharge (20 washing cycles)

Amount of fibrous microplastics released from detergent discharge on a 300 μm-mesh sieve	Washing machine		Handwashing		Control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (mg)	1.75	1.57	1.03	1.37	1.05	0.85
Average 2 Samples (mg)	1.66		1.20		0.95	
% amount of fibrous microplastics from washing machine more than those from handwashing	27.62					
Amount of fibrous microplastics released from detergent discharge on a 20 μm-mesh sieve	Washing machine		Handwashing		Control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (mg)	1.61	1.62	2.85	1.85	1.15	0.93
Average 2 Samples (mg)	1.62		2.35		1.04	
% amount of fibrous microplastics from handwashing more than those from washing machine	31.16					

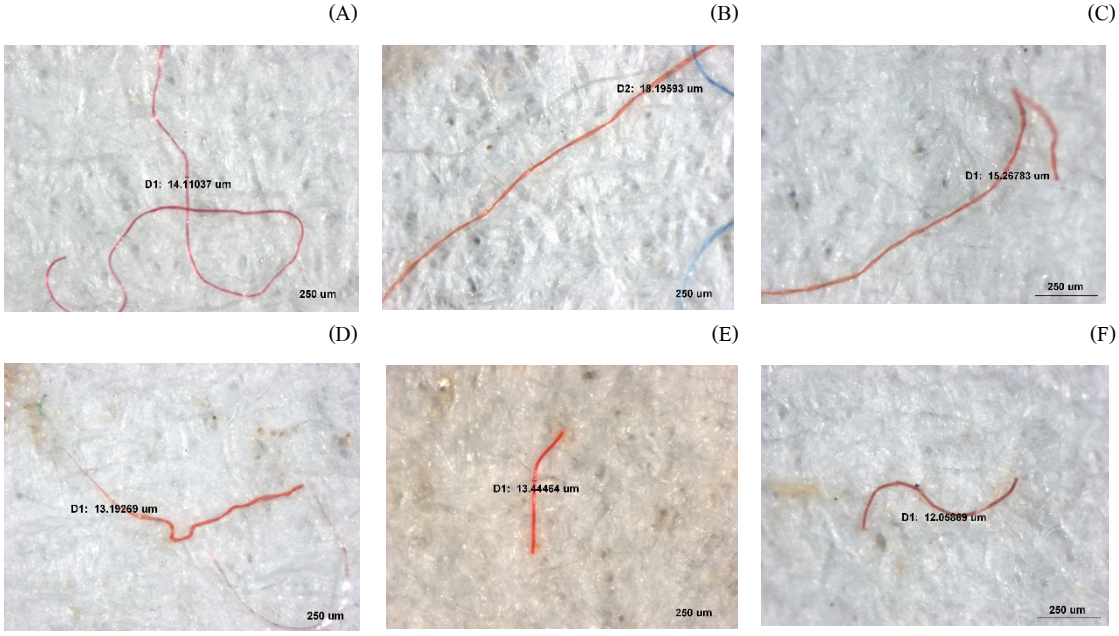


Fig. 3 Fibrous microplastics from detergent discharge; on a 300 μm-mesh sieve: washing machine (A), handwashing (B), control set (C); and on a 20 μm-mesh sieve: washing machine (D), handwashing (E), control set (F)

Table 4 Average amount of fibrous microplastics released from rinse water (20 washing cycles)

Amount of fibrous microplastics released from rinse water on a 300 μm-mesh sieve	washing machine		handwashing		control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (mg)	1.44	1.43	1.60	1.10	0.52	0.53
Average 2 Samples (mg)	1.43		1.35		0.53	
% amount of fibrous microplastics from washing machine more than those from handwashing	5.81					
Amount of fibrous microplastics released from rinse water on a 20 μm-mesh sieve	washing machine		handwashing		control set	
	T-shirts[1]	T-shirts[2]	T-shirts[3]	T-shirts[4]	T-shirts[5]	T-shirts[6]
Average (mg)	2.34	1.69	1.69	1.96	0.67	0.75
Average 2 Samples (mg)	2.02		1.83		0.71	
% amount of fibrous microplastics from washing machine more than those from handwashing	9.26					

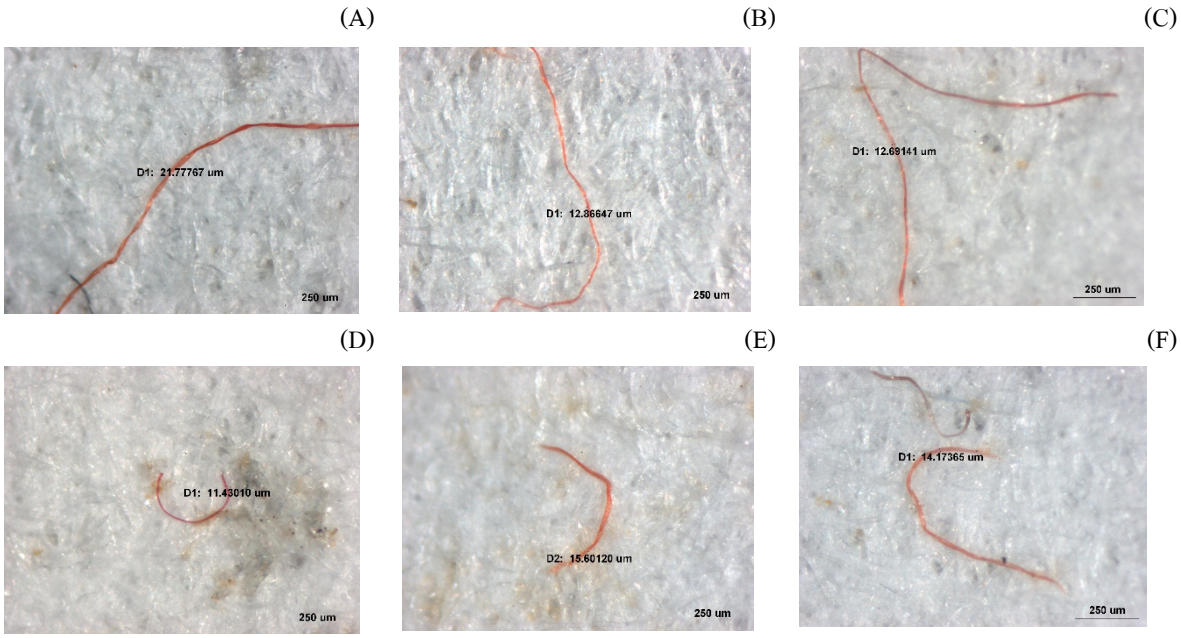


Fig. 4 Fibrous microplastics from rinse water; on a 300 μm-mesh sieve: washing machine (A), handwashing (B), control set (C); and on a 20 μm-mesh sieve: washing machine (D), handwashing (E), control set (F)

ผลการศึกษาขนาดเส้นใยโดยเฉลี่ย พบว่าเส้นใยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 300 μm มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 17.72 และ 15.66 μm ความยาวเฉลี่ย 1.57 และ 1.59 mm จากน้ำซักผ้าและน้ำล้างผ้าตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นใยใกล้เคียงกับที่ค้างบนตะแกรงขนาด 20 μm มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 17.49 และ 17.65 μm และความยาวเฉลี่ย 1.21 และ 1.29 mm จากน้ำซักและล้างผ้า ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบหาปริมาณเส้นใยจากการซักด้วยเครื่องและซักด้วยมือพบว่า โดยเฉลี่ยการซักด้วยเครื่องซักผ้าจะปล่อยเส้นใย มากกว่าการซักด้วยมือ ยกเว้นเส้นใยจากน้ำซักผ้า ที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 20 μm โดยเฉลี่ยแล้วจะปล่อยเส้นใยจากการซักด้วยมือมากกว่าการซักด้วยเครื่อง แสดงดัง Table 3 และ Table 4

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณเส้นใยที่มีขนาด 20–300 ไมครอน มีปริมาณมากกว่าเส้นใยที่มีขนาดใหญ่กว่า 300 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (MERMAID, 2017) โดยความต่างของปริมาณเส้นใยที่ขนาดต่างกันนี้จะเห็นได้ชัดมากกับการซักมือ โดยอาจเป็นผลจากแรงในการใช้มือขยี้ที่ควบคุมได้ยากและอาจทำให้เส้นใยขนาดเล็กหลุดออกมาได้มากกว่าการซักเครื่อง

สรุป

ไมโครพลาสติกชนิดเส้นใยจากผ้าใยสังเคราะห์สามารถปะปนกับน้ำทิ้งจากการซักผ้าด้วยเครื่องซักผ้า การซักด้วยมือ และการแช่ผ้าทิ้งไว้ โดยพบว่าทั้งในน้ำซักผ้าและน้ำล้างผ้ามีไมโครพลาสติกชนิดเส้นใยปะปนอยู่ นอกจากนี้ขนาดของเส้นใยโดยเฉลี่ยที่พบทั้งในน้ำซักผ้าและน้ำล้างผ้าทั้งที่ค้างบนตะแกรงขนาด 20 และ 300 ไมโครเมตรมีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากปัจจัยที่ทำให้เส้นใยค้างบนตะแกรงนอกจากขึ้นกับขนาดของเส้นใยแล้วยังขึ้นกับลักษณะที่เส้นใยสัมผัสตะแกรงด้วย (แนวตั้งฉาก แนวเฉียง หรือแนวนอน)

จากผลการวิเคราะห์พบว่าความขุ่นและปริมาณของเส้นใยมีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กเป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ โดยผลการทดลองมีความสอดคล้องกันคือ เมื่อจำนวนครั้งในการซักเพิ่มมากขึ้นความขุ่นของน้ำทิ้งทั้งจากขั้นตอนการซักและการล้างผ้าจะน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (MERMAID, 2017) แสดงให้เห็นว่าในการซักครั้งแรกจะมีการปล่อยไมโครไฟเบอร์ออกมามาก อาจจะมีการดำเนินการซักผ้าที่มีการควบคุมก่อนวางจำหน่าย (การจับไมโครไฟเบอร์ที่ปล่อยออกมา) และสามารถเป็นแนวทางในการนำไปหาวิธีการลดปริมาณไมโครพลาสติกได้ ลดการผลิตและการใช้เสื้อผ้าใยสังเคราะห์หาวิธีที่ทำให้ไมโครไฟเบอร์หลุดร่วงจากเนื้อผ้าน้อยที่สุด ผู้ผลิตเครื่องซักผ้าควรออกแบบเครื่องซักผ้าที่มีฟิลเตอร์กรองไมโครไฟเบอร์ออกจากน้ำทิ้ง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำปรึกษา เพื่อการดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ณัฏฐ์นรี นีระวงศ์, วริษา วงศ์เจียมรัตน์. 2562. การวิเคราะห์ไมโครพลาสติกจากผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ถูกปลดปล่อยลงสู่น้ำทิ้งในกระบวนการซักผ้า. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ และคณะ. 2562. มลสารไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำเสียดิบและระบบบำบัดน้ำเสีย, http://www.ej.eric.chula.ac.th/content/6109/59, 16 พฤษภาคม 2563.

สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเลและป่าชายเลน คณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัย บูรพา. 2557. รายงานฉบับสมบูรณ์ การสำรวจและจำแนกตัวอย่างขยะทะเลประเภทไมโครพลาสติก, https://www.dmcr.go.th/upload/dt/file/file-3095-20170516149490539755 9.pdf, 16 พฤษภาคม 2563.

MERMAIDS.2017. Microfiber release from clothes after washing, https://www.plasticsoupfoundation.org/wp-content/uploads/2017/07/Position-Paper.Microfiber-release-from-clothes-after-washing.PSF_.pdf, 16 พฤษภาคม 2563.

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

Friasa, J.P.G.L., Sobrala, P., Ferreirab, A.M. 2010. Organic pololutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast. Mar. Pollut. Bull 60: 1988–1992. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.030

Zarfl, C., Fleet, D., Fries, E., Galgani, F., Gerdts, G., Hanke, G., Matthies, M. 2011. Microplastics in oceans. Mar. Pollut. Bull. 62: 1589–1591. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.02.040

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

การประเมินก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โรงควบคุมคุณภาพน้ำขนาดใหญ่ในพื้นที่กรุงเทพมหานครจำนวน 8 โรง

Estimation of greenhouse gases from 8 central municipal wastewater treatment plants in Bangkok

ธิดารัตน์ มาละวรรณา*, สุชีลา พลเรือง

Thidarad Malawanna*, Sucheela Polruang

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: thidarad.m@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำเสียชุมชนขนาดใหญ่ จำนวน 8 โรง ของกรุงเทพมหานครฯ ปี 2560 เพื่อหาค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนในหน่วยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปริมาตรน้ำเสีย ($kgCO_2eq./m^3$) จากการศึกษาพบว่า มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 0.1838–0.7152 $kgCO_2eq./m^3$ เกิดจากกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2 ทาง คือทางตรง ได้แก่ การย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบที่อยู่ในช่วง 0.0253-0.0610 $kgCO_2eq./m^3$ และทางอ้อม ได้แก่ การใช้ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1454–0.6233 $kgCO_2eq./m^3$ (การปลดปล่อยมากที่สุด) การใช้สารเคมีอยู่ในช่วง 0.00002–0.00037 $kgCO_2eq./m^3$ การย่อยสลายของกากตะกอนในน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 0.0019–0.0054 $kgCO_2eq./m^3$ และการขนส่งกากตะกอนไปกำจัด อยู่ในช่วง 0-0.0009 $kgCO_2eq./m^3$ โรงที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คือโรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งครุ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นกับคุณภาพน้ำขาเข้า ประเภทและประสิทธิภาพของระบบ คุณภาพน้ำทิ้งและตะกอน เป็นต้น

คำสำคัญ: ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน, ก๊าซเรือนกระจก, ภาวะโลกร้อน

Abstract

The Objective of this research was to estimate greenhouse gas (GHG) emission from 8 large municipal wastewater treatment plants (WWTP) in Bangkok in 2017. The functional unit was given as kilogram carbon dioxide equivalent per cubic meter wastewater ($kgCO_2eq./m^3$). During this period, the total amount of GHG was 0.1838–0.7152 $kgCO_2eq./m^3$. Direct GHG emission was 0.0253–0.0610 $kgCO_2eq./m^3$, which was the degradation of organic matter in wastewater. Indirect GHG emissions, included electricity consumption, chemical use, degradation of sludge existing in treated effluent, and transportation of sludge to the central sludge treatment plant, were 0.1454–0.6233, 0.00002–0.00037, 0.0019-0.0054 and 0-0.0009 $kgCO_2eq./m^3$, respectively. The result showed that Thungkru wastewater treatment plant had the highest GHG emission. GHG emission from WWTP depends on several factors, including wastewater characteristics, type and efficiency of WWTP, treated effluent, sludge property etc.

Keywords: domestic wastewater treatment, greenhouse gases, global warming

คำนำ

ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ทวีความรุนแรงและส่งผลกระทบเป็นวงกว้าง โดยสาเหตุส่วนหนึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) โดยทาง Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Michiel et al., 2006). ระบุว่าระบบบำบัดน้ำเสียถูกกำหนดเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะก๊าซ CH_4 และ N_2O โดยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการที่มีการใช้ไฟฟ้าของระบบ โดยเฉพาะในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ ระบบเติมอากาศเป็นส่วนหนึ่งที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด (Polruang et al., 2018) ปัจจุบันกรุงเทพมหานครมีระบบบำบัดน้ำเสียรวมขนาดใหญ่ ทั้งหมด 8 แห่งได้แก่ โรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยา รัตนโกสินทร์ ช่องนนทรี หนองแขม ทุ่งครุ ดินแดง จตุจักร และศูนย์การศึกษาและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมบางซื่อ โดยสามารถบำบัดน้ำเสียได้รวมทั้งสิ้น 1,112,000 m^3/day ปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้จริงในปี 2560 เท่ากับ 866,414 m^3/day (สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร, 2561) ระบบบำบัดน้ำเสียแต่ละชนิดมีกระบวนการทำงานและการเดินระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน จำนวน 8 โรงใหญ่ของกรุงเทพมหานครฯ ในปี พ.ศ. 2560 ใช้แนวทางการประเมินของ U.S.EPA (2010) และแนวทางการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมขององค์กร (2561) โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์และประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เพื่อหาค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร รวมทั้งวิเคราะห์แนวโน้มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อไป

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินก๊าซเรือนกระจกของโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร จำนวน 8 โรง ใช้ข้อมูลในปี 2560 โดยขอบเขตการศึกษารวบรวมข้อมูลกิจกรรมด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น อัตราการไหลของระบบบำบัดน้ำเสีย (m^3/day) ปริมาณความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) ก่อนและหลังบำบัด (mg/l) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ก่อนและหลังบำบัด (mg/l) เป็นต้น ส่วนข้อมูลกิจกรรมด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ปริมาณการใช้ไฟฟ้า สารเคมี และการเดินทางขนส่ง เป็นต้น เริ่มตั้งแต่กระบวนการรับน้ำเสียเข้าสู่ระบบ กระบวนการบำบัดน้ำเสีย การปล่อยน้ำหลังการบำบัดออกสู่สิ่งแวดล้อม และการขนส่งกากตะกอนน้ำเสียไปบำบัด

การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

วิธีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้แนวทางการประเมินของ U.S.EPA (2010) และแนวทางการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมขององค์กร (2561)

1) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง

เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ได้แก่ CO_2 และ CH_4 โดย CO_2 เป็นก๊าซพื้นฐานที่สามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ ขณะที่ CH_4 เกิดขึ้นจากการบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ และ N_2O เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นและดีไนตริฟิเคชั่น โดยมีปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียที่เข้าระบบเป็นตัวกำหนดการปลดปล่อย N_2O ซึ่งมีวิธีการในการประเมิน CO_2 CH_4 และ N_2O ที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสีย ดัง Equations 1–3 และมีสมการที่ใช้ประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในรูปแบบของศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential : GWP) ในหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร ดัง Equation 4

$$CO_2\ (kgCO_2eq/m^3) = 10^{-6} \cdot Q_{ww} \cdot OD \cdot Eff_{OD} \cdot CF_{CO2} \cdot [(1\text{-}MCFww \cdot BG_{CH4})(1\text{-}\lambda)] \quad (1)$$

$$CH_4\ (kgCO_2eq/m^3) = 10^{-6} \cdot Q_{ww} \cdot OD \cdot Eff_{OD} \cdot CF_{CH4} \cdot [(MCFww \cdot BG_{CH4})(1\text{-}\lambda)] \quad (2)$$

$$N_2O\ (kgCO_2eq/m^3) = Q_{ww} \cdot TKN_i \cdot EF_{N2O} \cdot 44/28 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

และ $$GHG\ emission\ (kgCO_2eq/m^3) = \sum_{i=1}^{n} (GHGi \cdot GWPi) \quad (4)$$

โดยที่ CO_2, CH_4 และ N_2O คืออัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซไนตรัสออกไซด์ ($kgCO_2eq/m^3$) ตามลำดับ, Q_{ww} คืออัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบบำบัด (m^3/hr), OD คือค่าความต้องการออกซิเจนของน้ำเสียเข้าระบบได้แก่ค่า BOD_5 หรือ COD (g/m^3), Eff_{OD} คือประสิทธิภาพของระบบบำบัด, CF_{CO2} คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อหน่วยความต้องการออกซิเจน เท่ากับ 1.375 gCO_2/g oxygen demand, CF_{CH4} คือก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อหน่วยความต้องการออกซิเจน เท่ากับ 0.5 gCH_4/g oxygen demand, BG_{CH4} คือสัดส่วนของคาร์บอนในมีเทนต่อก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (ค่า default = 0.65), ค่า MCF_{ww} คือค่าปรับแก้ของก๊าซมีเทนและ λ คือผลผลิตมวลชีวภาพ โดยในกรณีที่ประสิทธิภาพการกำจัด BOD มากกว่าหรือเท่ากับ 85% MCF_{ww} มีค่า และ λ มีค่าเท่ากับ 0 และ 0.65 ตามลำดับ ในกรณีที่ประสิทธิภาพการกำจัด BOD น้อยกว่า 85% ค่า MCF_{ww} และ λ เท่ากับ 0.3 และ 0.45 ตามลำดับ, TKN_i คือปริมาณค่า TKN ของน้ำเสียเข้าระบบบำบัด (g/m^3), EF_{N2O} คือค่าการปลดปล่อยของก๊าซไนตรัสออกไซด์ เท่ากับ 0.005 g N emitted as N_2O/g TKN, 44/28 คือค่าการแปลงน้ำหนักมวลโมเลกุล (g N_2O/g N emitted as N_2O), GHG คืออัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq.$), GHGi คือปริมาณก๊าซเรือนกระจกของก๊าซแต่ละชนิด (kg), GWPi คือค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดโลกร้อนของก๊าซแต่ละชนิด (ค่า GWPi ของ CO_2 CH_4 และ N_2O มีค่าเท่ากับ 1, 25 และ 298 ตามลำดับ)

2) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม

การประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า กิจกรรมการใช้สารเคมี และกิจกรรมจากการขนส่งกากของเสียไปกำจัด มีแนวทางการคำนวณจากสมการเดียวกันดัง Equation 5 แต่มีการเลือกใช้ข้อมูลกิจกรรมและค่าการปลดปล่อย (EF) ที่ต่างกัน

$$GHG\ Emission = Activity\ data \times Emission\ Factor \quad (5)$$

โดยที่ กิจกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า GHG Emission คือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงาน ($kgCO_2$ eq./kWh), Activity data คือปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh), กิจกรรมการใช้สารเคมี GHG Emission คือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้สารเคมี ($kgCO_2$ eq./kg), Activity data คือ

ปริมาณการใช้สารเคมี (kg), กิจกรรมการขนส่งกากของเสียไปกำจัด GHG Emission คือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่ง ($kgCO_2$ eq.), Activity data คือปริมาณขยะ (ton/เดือน) โดยค่า Emission Factor ของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยการผลิต ในกิจกรรมการใช้ไฟฟ้า การใช้สารเคมี และการขนส่งกากของเสียไปกำจัดแสดงใน Table 1

Table 1 Emission Factor of electricity consumption, chemical use, degradation of sludge existing in treated effluent, and transportation of sludge to the central sludge treatment plant

Information	Unit	Emission Factor ($kgCO_2eq./Unit$)
Electricity	kWh	0.5986[a]
Alum (WWT)	kg	0.2770[b]
Anionic polymer (WWT)	kg	0.3500[b]
Cation polymer (WWT)	kg	1.4300[b]
รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก 8.5 ตัน Full load	ton-km	0.0653[a]
รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก 8.5 ตัน No load	km	0.4069[a]

[a] ตารางแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (UPDATE: กุมภาพันธ์ 2563)

[b] ตารางแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (2554)

นอกจากนี้การประเมินก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมยังรวมถึงก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายของกากตะกอนในน้ำทิ้งที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AS มีการประเมิน CO_2 เพียงชนิดเดียวจากการย่อยสลายของกากตะกอนในน้ำทิ้ง โดยใช้สมการการคำนวณของ Shahabadi et al. (2009) Equation 6

$$M_{CO2,Sludge\ Degradation} = 0.58\ gCO_2 / gVSS \bullet P^{D}_{Degradable\ SS\ eff\ Sludge} \quad (6)$$

โดยที่ $M_{CO2,Sludge\ Degradation}$ คืออัตราการเกิดของ CO_2 จากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (gCO_2 eq./day), $P^{D}_{Degradable\ SS\ eff\ Sludge}$ คือปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่คงเหลือในน้ำทิ้ง(gVS)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงต่อหน่วยปริมาตรน้ำเสีย

ผลการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกของโรงควบคุมคุณภาพน้ำเสีย กรุงเทพมหานคร จำนวน 8 โรง ปี 2560 มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง โดยการคำนวณกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย มีก๊าซที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมได้แก่ CO_2 CH_4 และ N_2O (Fig. 1) พบว่าในการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงอยู่ในช่วง 0.0253-0.0610 $kgCO_2eq/m^3$ โดยโรงควบคุมคุณภาพน้ำที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงมากที่สุดคือ ช่องนนทรี รองลงมาคือ ศูนย์การศึกษาและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมบางซื่อ และดินแดง

Fig. 1 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงแยกตามชนิดของก๊าซ ผลจากการคำนวณพบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก CO_2, CH_4 และ N_2O มากที่สุดคือ รัตนโกสินทร์ ช่องนนทรี

และศูนย์การศึกษาและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมบางซื่อ ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยา ทุ่งครุ จตุจักร และศูนย์การศึกษาและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมบางซื่อ มีค่าการปลดปล่อยก๊าซ CH_4 เท่ากับ 0 เนื่องจากในปี 2560 โรงควบคุมคุณภาพน้ำทั้ง 4 แห่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์มากกว่าหรือเท่ากับ 85% จัดเป็นระบบบำบัดแบบใช้อากาศที่มีประสิทธิภาพในการดำเนินระบบที่ดีส่งผลให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CH_4 ที่ได้จากการคำนวณ (สมการที่ 2) มีค่าเป็น 0 เนื่องจากค่า MCF เท่ากับ 0 ในขณะที่หากประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบมีค่าต่ำกว่า 85% จัดเป็นระบบบำบัดแบบใช้อากาศที่มีประสิทธิภาพในการดำเนินระบบที่ไม่ดีมากนัก นั่นคือสามารถมีก๊าซ CH_4 เกิดขึ้นได้ (ค่า MCF มีค่ามากกว่า 0) เช่นมีการเติมอากาศไม่เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

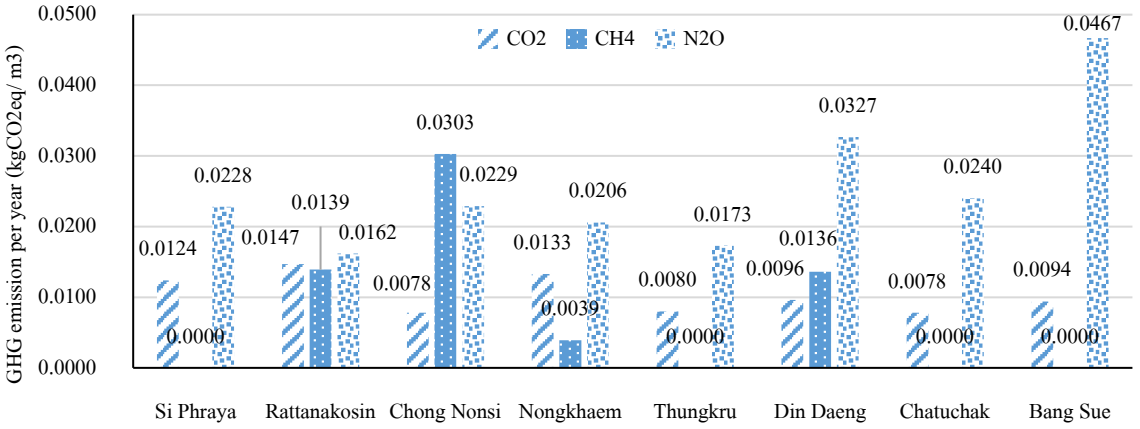


Fig. 1 Direct greenhouse gas emission from wastewater treatment plants in 2560 (2017) ($kgCO_2eq/m^3$)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำแต่ละแห่ง พบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำที่บำบัดน้ำเสียปริมาณมาก จะมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากตามไปด้วย นอกจากนี้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงยังขึ้นกับประเภทของระบบ และความสามารถในการบำบัด BOD และ TKN อีกด้วย โดยในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ สารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายและเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซ CO_2 โดยจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ (Aerobic bacteria) ก๊าซ CH_4 มีโอกาสเกิดขึ้นได้เล็กน้อยจากสภาวะไร้อากาศในบางจุดของระบบเติมอากาศ ส่วนก๊าซ N_2O เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนตริฟิเคชันและ ดีไนตริฟิเคชัน (IPCC, 2006) (Fig. 2) แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำของกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ.2560 จำแนกตามประเภทของก๊าซเรือนกระจก ($tonCO_2eq$) พบว่าก๊าซ N_2O มีส่วนสำคัญต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสีย แม้ว่าก๊าซ N_2O ที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่มาก แต่เนื่องจากค่าศักยภาพการเกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซ N_2O มีค่าเป็น 298 เท่าของก๊าซ CO_2 จากผลการศึกษาของ IPCC โดยคาดการณ์ว่าการปลดปล่อย N_2O จากทางตรงมีน้อยกว่าทางอ้อม (IPCC, 2006) แต่ในระบบบำบัดน้ำเสียหลายแห่งเป็นระบบบำบัดขั้นสูง (Advanced treatment) ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียโดยการกำจัดสารอาหาร สี กลิ่น และสิ่งเจือปนอื่นๆที่หลงเหลือจากการบำบัด เช่น สารอินทรีย์ การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย เป็นต้น เพื่อให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก หรือสามารถระบายสู่แหล่งรองรับน้ำโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (สุเทพ, 2552) ดังนั้นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบขั้นสูงแล้วจึงมีปริมาณสารอาหารที่หลงเหลือ

อยู่ลดลงส่งผลให้ N_2O ที่จะเกิดขึ้นจากการปลดปล่อยทางตรงลดลงด้วยซึ่งจะตรงกันข้ามกับการคาดการณ์ของ IPCC, 2006 ว่า N_2O จะปลดปล่อยจากทางอ้อมมากกว่าในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนทั่วไป

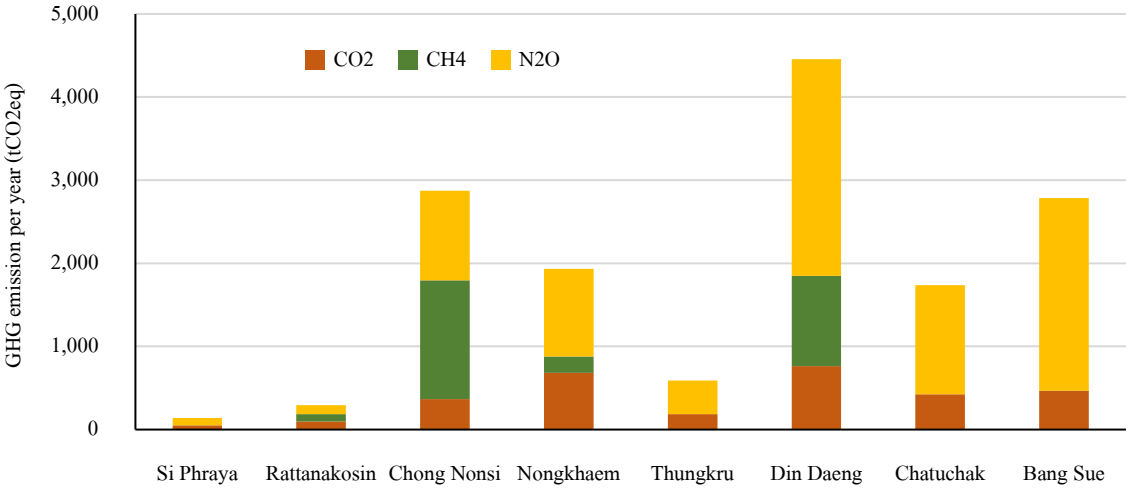


Fig. 2 Direct greenhouse gas emission from wastewater treatment plants in 2560 (2017) (tonCO_2eq)

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมต่อหน่วยปริมาตรน้ำเสีย

จากกิจกรรม ของระบบบำบัดน้ำเสีย ที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม ได้แก่ การใช้ไฟฟ้า การใช้สารเคมี การย่อยของกากตะกอนในน้ำทิ้ง และการขนส่งกากตะกอนไปกำจัด พบว่า กิจกรรมการใช้ไฟฟ้าเป็นกิจกรรมที่ปลอดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมสูงสุด เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานครเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ โดยการเติมอากาศมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเทียบกับกิจกรรมการใช้ไฟฟ้าอื่น (Polruang et al., 2018) จากผลการประเมินพบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด รองลงมาคือดินแดง และช่องนนทรี มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.6233, 0.5121 และ 0.5022 kgCO_2eq/m^3 ตามลำดับ (Fig. 3)

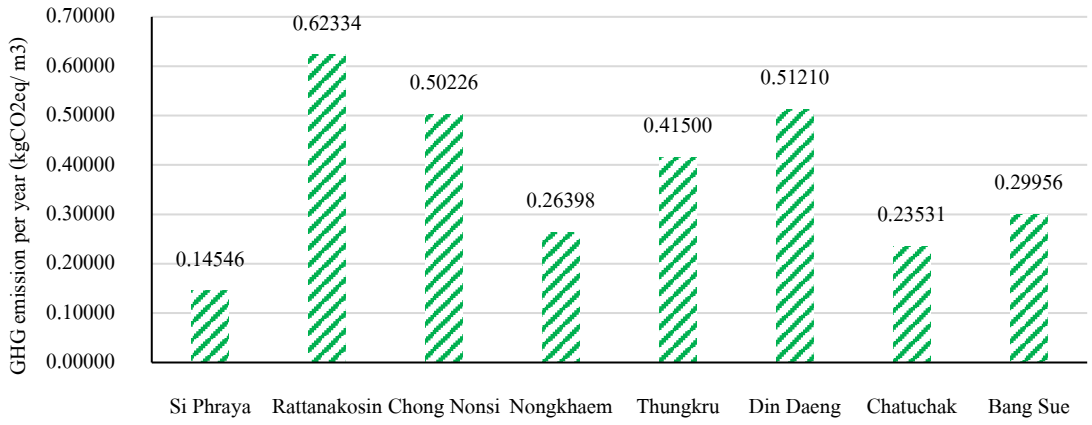


Fig. 3 Indirect greenhouse gas emission from electricity consumption

กิจกรรมการย่อยของกากตะกอนในน้ำทิ้ง พบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด รองลงมาคือ ดินแดง และศูนย์การศึกษาและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมบางซื่อ มีค่าการปลดปล่อยก๊าซ

เรือนกระจก เท่ากับ 0.0054, 0.0036 และ 0.0027 $kgCO_2eq/m^3$ โดยการย่อยของกากตะกอนในน้ำทิ้งเกิดขึ้นเมื่อมีตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ในรูปของแข็งแขวนลอยระเหย ปะปนในน้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ อาจถูกทับถมและเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายในแหล่งน้ำสาธารณะได้ ซึ่งการลดปริมาณน้ำทิ้งโดยการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในส่วนนี้ได้ (Fig. 4)

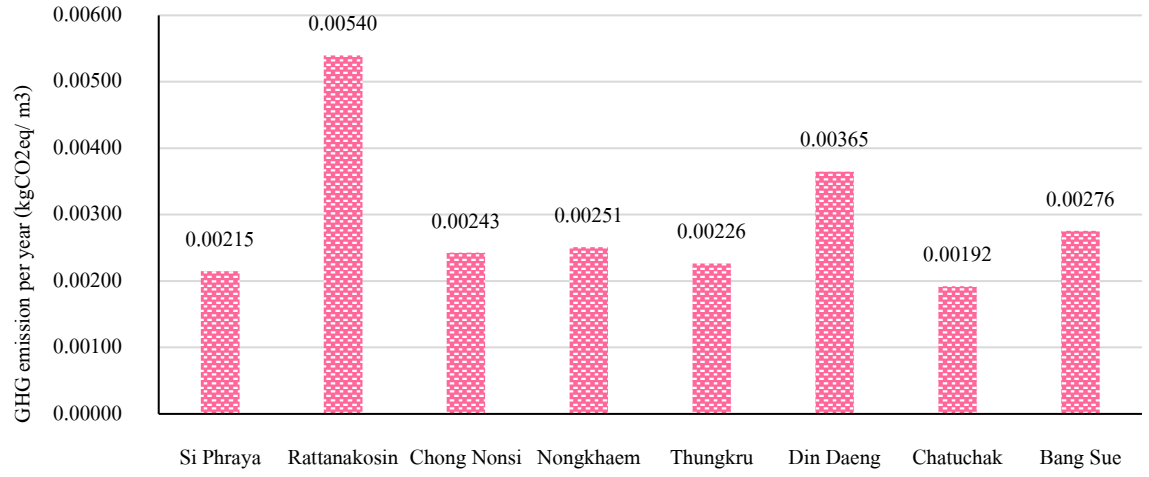


Fig. 4 Indirect greenhouse gas emission from Degradation of sludge existing in treated effluent

กิจกรรมการใช้สารเคมี พบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด รองลงมาคือ ทุ่งครุ และสี่พระยา มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.00037, 0.00020 และ 0.00011 $kgCO_2eq/m^3$ ตามลำดับ โดยสารเคมีหลักที่ใช้เพื่อรวมตะกอนให้ตะกอนมีความเข้มข้นมากขึ้น ช่วยลดปริมาตรของกากตะกอนที่ขนส่งลงได้ ส่งผลต่อจำนวนเที่ยวที่ใช้ในการขนส่งจึงลดลงตามไปด้วย (Fig. 5)

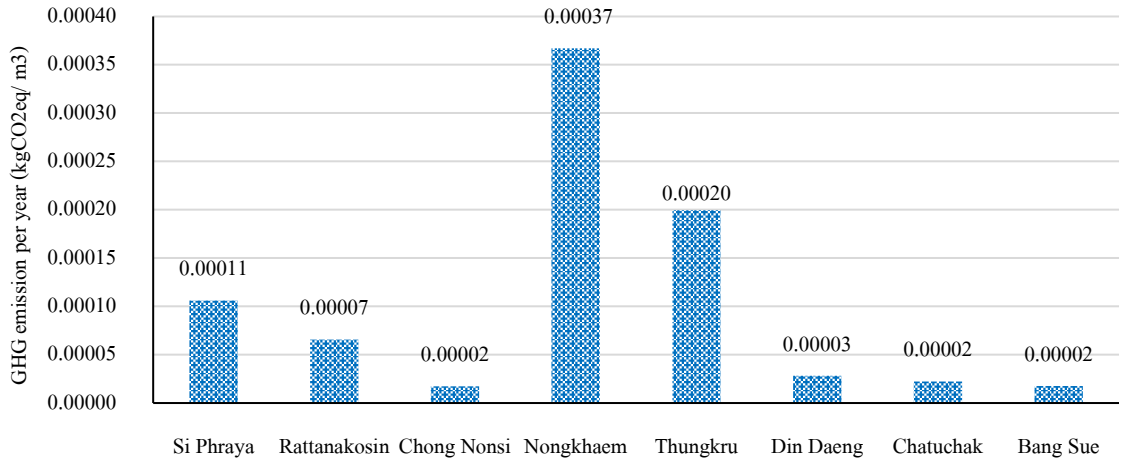


Fig. 5 Indirect greenhouse gas emission from chemical use

การขนส่งกากตะกอนไปกำจัด พบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยา มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด รองลงมาคือ จตุจักร และทุ่งครุ มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.0009, 0.0004 และ 0.0003 $kgCO_2eq/m^3$ ตามลำดับ โดยการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งกากตะกอนไปกำจัด ขึ้นกับระยะทางที่ใช้ในการขนส่ง

กากตะกอนจากแต่ละโรงควบคุมคุณภาพน้ำส่งไปบำบัดยังโรงบำบัดตะกอนหนองแขม จำนวนเที่ยวที่ใช้ในการขนส่ง และน้ำหนักของตะกอนที่บรรทุก (Fig. 6)

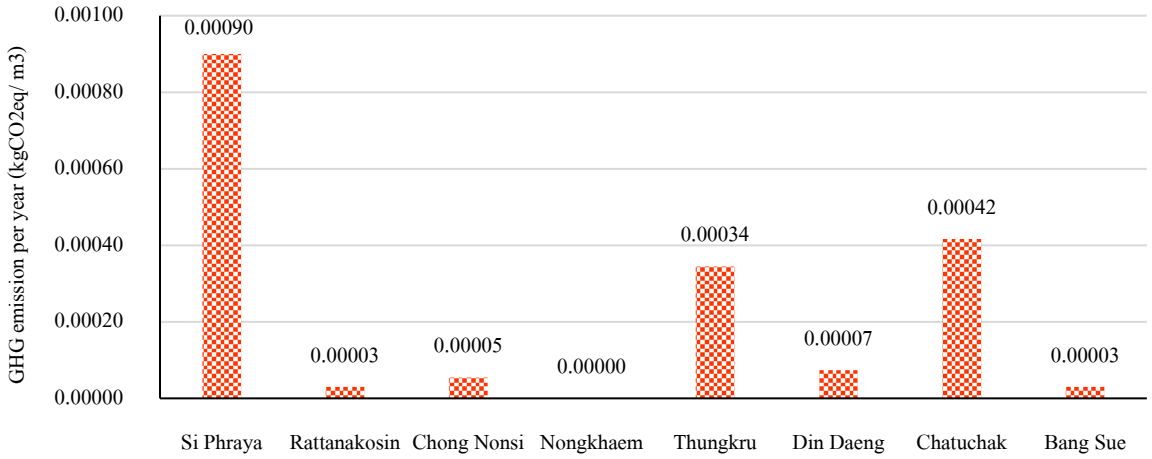


Fig. 6 Indirect greenhouse gas emission from Transportation of sludge to the central sludge treatment plant

การประเมินเปรียบเทียบงานวิจัยการประเมินก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมชุมชน (ศิริพร, 2556) พบว่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมรายโรงปี 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 0.1597-0.2787 $kgCO_2eq./m^3$ ซึ่งใน ปี 2560 มีค่า 0.1838–0.7152 $kgCO_2eq./m^3$ มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2–3 เท่า โดยพบว่าในปี 2554 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมการใช้ไฟฟ้ามากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามแนวทางเดียวกับงานวิจัยนี้ โดยสัดส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าปี 2554 และ 2560 เฉลี่ยทุกโรงคิดเป็นประมาณ 71% และ 87% ตามลำดับ อย่างไรก็ดีพบว่าปัจจัยหลักของการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้ไฟฟ้าในปี 2554 เทียบกับปี 2560 อาจมาจากการเก็บข้อมูลที่ดีมากขึ้น ทำให้สามารถรวบรวมปริมาณการใช้ไฟฟ้าของแต่ละหน่วยเครื่องจักร หรือกระบวนการที่ครอบคลุมและแม่นยำขึ้น และส่วนหนึ่งอาจเป็นผลจากเครื่องจักรที่มีอายุมากขึ้นทำให้ต้องใช้ไฟฟ้ามากขึ้น นอกจากนี้ค่า Emission factor การใช้ไฟฟ้าของปี 2560 (EF = 0.5986) มีค่าเพิ่มขึ้นจากปี 2554 (EF = 0.5610) โดยรวมจึงส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกปี จากการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมในปี 2560 เพิ่มขึ้นจากปี 2554 อย่างเห็นได้ชัด พิจารณาผลการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นเทียบกับผลการศึกษาอื่นๆ พบว่าผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียชุมชน เป็นระบบแบบใช้อากาศ และลักษณะน้ำเสียที่ใกล้เคียงกัน (Monteith et al., 2005) ทำให้ผลการประเมินที่ได้มีความใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วง 0.228–0.245 $kgCO_2eq./m^3$

สรุป

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประเมินจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำเสีย ขนาดใหญ่ กรุงเทพมหานคร จำนวน 8 โรง ปี พ.ศ. 2560 ส่วนใหญ่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการใช้ไฟฟ้า (ทางอ้อม) มากที่สุด อยู่ในช่วง 0.14546-0.62334 $kgCO_2eq./m^3$ เมื่อเทียบกับกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ (ทางตรง) อยู่ในช่วง 0.02536-0.06100 $kgCO_2eq./m^3$ การย่อยของกากตะกอนในน้ำทิ้ง(ทางอ้อม)อยู่ในช่วง 0.00192-0.0054 $kgCO_2eq./m^3$ การใช้สารเคมี(ทางอ้อม)อยู่ในช่วง 0.00002-0.00037 $kgCO_2eq./m^3$ และการขนส่งกากตะกอนไปกำจัด (ทางอ้อม) อยู่ในช่วง 0–0.00090 $kgCO_2eq./m^3$ ตามลำดับ

โรงควบคุมที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คือโรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งครุ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นกับคุณภาพน้ำขาเข้า ประเภทและประสิทธิภาพของระบบ คุณภาพน้ำทิ้งและตะกอน เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานครฯ สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ระบบบำบัดน้ำเสีย. 2561.

ศิริพร ปุ่นอุดม. 2556. การประเมินก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมชุมชน: กรณีศึกษาโรง ควบคุมคุณภาพน้ำใน กรุงเทพมหานคร. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์. 2552. เทคโนโลยีน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ , กรุงเทพฯ.

สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ, รายงานประจำปี. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2561, สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2561. แนวทางการประเมินประสิทธิภาพองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (Local Performance Assessment: LPA) เรื่อง รายงานข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก. พิมพ์ครั้งที่ 1.

Monteith, H.D., Sahely, H.R., MacLean, H.L., Bagley, D.M. 2005. A rational procedure for estimation of greenhouse-gas emissions from municipal wastewater treatment plants. Water Environ. Res. 77: 390–403

Michiel, R.J., Doorn, M., Towprayoon, S., Vieira, S., Irving, W., Palmer, C., Pipatti, R., Wang, C.J.I.P.O.C. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge.

Polruang, S., Sirivithayapakorn, S., Talang, R.P.N.J.J.O.C.P. 2018. A comparative life cycle assessment of municipal wastewater treatment plants in Thailand under variable power schemes and effluent management programs. 172: 635–648.

Shahabadi, M.B., Yerushalmi, L., Haghighat, F. 2009. Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. Water research 13: 2679–2687

การสลายตัวของสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2

Degradation of dye from the photocatalytic oxidation process with TiO_2 as the catalyst

ธนกฤต บรรเจิดธีรกูล*, สัญญา สิริวิทยาปกรณ์

Tanakrit Buntjertterakul*, Sanya Sirivithayapakorn

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: tanakrit.bu@ku.th

บทคัดย่อ

การย่อยสลายสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG) และเมทิลีนบลู (MB) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน (5 และ 10 ppm) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และแสงยูวีเอ (UV-A) ถูกศึกษาโดยใช้การเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง (Abs) และค่าความเข้มสีในหน่วย ADMI เป็นดัชนีชี้วัด โดยการทดสอบเริ่มต้นด้วยการทดลองในที่มืด 45 นาที ต่อด้วยการทดลองในที่มีแสง 60 นาที จากผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของ 5 ppm-MG และ 5 ppm-MB มีค่าลดลงประมาณ 99.00% สำหรับค่า ADMI ค่าที่ตรวจวัดได้ของ 5 ppm-MG และ 5 ppm-MB คือ 50 และ 150 ADMI ตามลำดับ ในกรณีของความเข้มข้น 10 ppm ค่าการลดลงของความเข้มข้น (Abs) และ ADMI ของ 10 ppm-MG มีค่าใกล้เคียงกับกรณีของ 5 ppm-MG แต่สำหรับ 10 ppm-MB ค่าการลดลงของความเข้มข้น (Abs) คือ 84.70% และค่า ADMI คือ 650 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อัตราการย่อยสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของสีย้อม MG เร็วกว่าสีย้อม MB

คำสำคัญ: ไทเทเนียมไดออกไซด์, โฟโตคะตะไลติก, มาลาไคท์กรีน, เมทิลีนบลู, ยูวีเอ

Abstract

Degradation of Malachite Green (MG) and Methylene Blue (MB) dyes with different initial concentrations (5 and 10 ppm) *via* photocatalytic oxidation process in the presence of titanium dioxide (TiO_2) powder and UV light were investigated. The change in absorbance (Abs) and color intensity in the unit of ADMI was used as indicator to evaluate dye degradation. The photocatalytic test was carried out in the dark for 45 minutes and followed by 60 minutes under UV-A light. The results showed that the concentration value of 5 ppm-MG and 5 ppm-MB decreased approximately 99.00%. For ADMI color value, the measured value of 5 ppm-MG and 5 ppm-MB was 50 and 150 ADMI, respectively. In case of 10 ppm concentration, the decrease in concentration (Abs) and ADMI color values of 10 ppm-MG were similar to that of 5 ppm-MG, but for 10 ppm-MB, the decrease in concentration (Abs) value was observed as 84.74% and ADMI color value was 650. With these results, it can be concluded that photocatalytic degradation rate of MG dye is faster than MB dye.

Keywords: malachite green, methylene blue, photocatalytic, titanium dioxide, UV-A

คำนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้สารเคมีในกลุ่มสีย้อมเป็นหลัก ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีการตรวจพบสีย้อมปนเปื้อนอยู่เสมอ แหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนสีย้อมส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามและปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำมีไม่เพียงพอทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ (Charoenlarp and Prabphane, 2015) นอกจากผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม สีย้อมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำยังก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อทั้งสิ่งมีชีวิตในน้ำและมนุษย์ที่ใช้แหล่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคเพราะสีย้อมบางชนิดมีสารก่อมะเร็ง (Ngadi et al., 2013; Hassaan and Nemr, 2017) เมื่อพิจารณาผลกระทบต่าง ๆ เหล่านี้ การศึกษาเพื่อหาวิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่มีสีย้อมปนเปื้อนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงมีความสำคัญ

โดยทั่วไป กระบวนการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนออกจากน้ำทิ้งมี 3 รูปแบบ คือ กระบวนการทางกายภาพ เช่น การดูดซับและการตกตะกอน กระบวนการทางชีวภาพ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี เช่น การเติมคลอรีนและการเติมโอโซน (Katheresan et al., 2018) อย่างไรก็ตาม กระบวนการข้างต้นไม่ใช่การย่อยสลายสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำ แต่เป็นการเปลี่ยนสถานะของสีย้อมให้อยู่ในรูปของตะกอน นอกจากนี้กระบวนการกำจัดสีย้อมบางประเภทเป็นสาเหตุของการเกิดสารมลพิษอุบัติใหม่ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการบำบัดต่อไป เช่น การเติมคลอรีน (Arslan et al., 2000; Chaudhuri and Sur, 2000; Stock et al., 2000) ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยพยายามศึกษาและค้นหาวิธีการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำ ที่ไม่ก่อให้เกิดผลพลอยได้ที่เป็นสารมลพิษ หนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันสำหรับการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำ คือ กระบวนการโฟโตคะตะไลติก กระบวนการนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ (Herrmann et al., 1993) และก่อให้เกิดมลพิษน้อยกว่าเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งกระบวนการนี้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงร่วมด้วย ในปัจจุบันตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) (Ajmal et al., 2014) เนื่องจากเมื่อพิจารณาทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์ วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากที่สุด ทั้งในเรื่องราคา คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี และประสิทธิภาพของในการย่อยสลายสารมลพิษ (Fujishima et al., 2000)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความแตกต่างของความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมสองชนิดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยสีย้อมมาลาไคท์กรีน (Malachite Green, MG, $C_{23}H_{25}ClN_2$) และเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB, $C_{16}H_{18}ClN_3S$) เป็นสีย้อมที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเป็นสีย้อมที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs) และหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสี(American Dye Manufacturers Institute, ADMI) เทียบกับเวลา โดยพิจารณาความสัมพันธ์ภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงการมีและไม่มีแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต เอ (Ultraviolet A, UV-A)

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2; KemAus; 99%; AR Grade) สีย้อมมาลาไคท์กรีน (Malachite Green (MG); LOBA CHEMIE PVT.LTD.) สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue (MB); KemAus) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH; KemAus; 97%, AR Grade)

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 5 และ 10 ppm โดยใช้สีย้อมแต่ละชนิด (MG และ MB) ผสมกับน้ำกลั่น

การทดสอบการสลายตัวของสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

การทดลองถูกจัดให้อยู่ในถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic reactor, Fig. 1) ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสง UV-A (OSRAM, 300W, 315–400 nm, 1000 $\mu W/cm^3$) และระยะห่างระหว่างบีกเกอร์และหลอดไฟเท่ากับ 15 cm โดยทำการทดลองดังนี้ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ 200 mL ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 250 mL จากนั้นเติมผง TiO_2 ความเข้มข้น 1 g/L ทำการทดลองในสภาวะที่ไม่มีแสงเป็นเวลา 45 นาที จากนั้นทำการทดลองในสภาวะที่มีแสง โดยแบ่งเป็นการทดลองที่ระยะเวลา 0, 5, 10, 20, 40 และ 60 นาที ในระหว่างการทดลองมีการปั่นกวนด้วย magnetic stirrer ตลอดเวลา เก็บน้ำตัวอย่างตามเวลาเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป สำหรับชุดการทดลองควบคุม ทำการทดลองตามรูปแบบการทดลองข้างต้น โดยแบ่งเป็นชุดทดลองที่ใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ไม่มีการฉายแสง UV-A (กำหนดให้ ทำการทดลองในสภาวะที่ไม่มีแสงเป็นเวลา 45 นาที และกวนผสมต่อในสภาวะที่ไม่มีแสงอีก 60 นาที) ชุดการทดลองที่ไม่มีการใช้ TiO_2 แต่มีการฉายแสง UV-A (กำหนดให้ ทำการทดลองในสภาวะที่ไม่มีแสงเป็นเวลา 45 นาที และกวนผสมต่อในสภาวะที่มีแสงอีก 60 นาที)

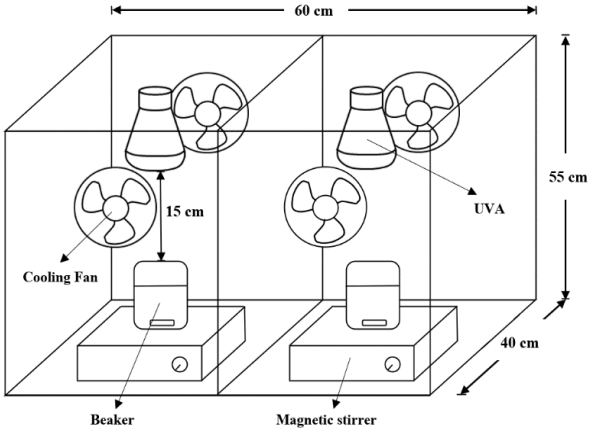


Fig. 1 Photocatalytic reactor

การตรวจวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ก่อนทำการตรวจวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง ทำการแยกผง TiO_2 ออกจากน้ำตัวอย่างด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) เก็บตัวอย่างน้ำส่วนใส (Supernatant) เพื่อทำการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs) และหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสี (American Dye Manufacturers Institute, ADMI) ด้วย UV-Vis Spectrophotometer (HACH, DR 5000) การวิเคราะห์ค่า Abs ของสีย้อม MG และ MB นั้น ทำการวัดค่า Abs ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 615 และ 665 nm ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ค่า ADMI ใช้วิธีมาตรฐาน APHA 2120F

เมื่อได้ค่า Abs และ ADMI จากการวิเคราะห์ ทำการหาค่าความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำ (C) ด้วยการเทียบค่าที่ตรวจวัดได้กับกราฟมาตรฐาน (Standard Curve) ใช้ค่า C_t/C_0 ที่ได้ (C_t คือ ความเข้มข้น ณ เวลานั้น ๆ และ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น) ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า Abs และ ADMI เทียบกับเวลา

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาการย่อยสลายสีย้อม MG

จากการศึกษาการย่อยสลายสีย้อม MG ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 ppm (ADMI เริ่มต้นเท่ากับ 1500 และ 2900 ตามลำดับ) โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ด้วย Photocatalytic Reactor ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสง UV-A และผง TiO_2 พบว่า กระบวนการนี้สามารถลดความเข้มข้น (Abs) และค่า ADMI ของสีย้อม MG ที่ความเข้มข้น 5 ppm ได้เท่ากับ 100.00% และ 96.70% ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 10 ppm มีค่าเท่ากับ 99.80% และ 98.30% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของการทดลองชุดนี้ (Fig. 2) พบว่า ค่าความเข้มข้น (Abs) และ ADMI มีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน

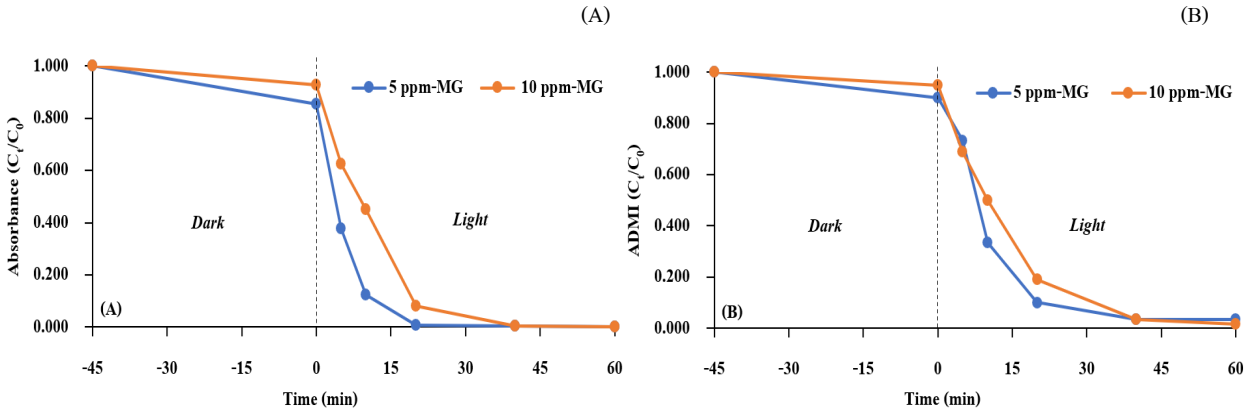


Fig. 2 Relationships between (A) the changes inabsorbance values of the MG containing solution and various reaction times, and (B) the changes in ADMI color values of MG containing solution and various reaction times.

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ไม่มีการฉายแสง UV-A (กรณีที่ 1, Fig. 3A) และชุดการทดลองที่ไม่มีการใช้ TiO_2 แต่มีการฉายแสง UV-A (กรณีที่ 2, Fig. 3(B)) พบว่า สำหรับกรณีที่ 1 ความเข้มข้น (Abs) ของ 5 ppm-MG และ 10 ppm-MG ลดลงประมาณ 28.70% และ 11.00% ตามลำดับ และสำหรับกรณี

ที่ 2 ความเข้มข้น (Abs) ของ 5 ppm-MG และ 10 ppm-MG ลดลงประมาณ 19.80% และ 8.60% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของการทดลอง 2 กรณีนี้ (Fig. 3) พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือแสงเพียงอย่างเดียวสามารถลดปริมาณสีย้อม MG ในน้ำได้เล็กน้อย โดยการลดลงนี้เกิดจากกระบวนการดูดซับจากความสามารถในการดูดซับของผงตัวเร่งปฏิกิริยาและการย่อยสลายด้วยแสง UV-A ซึ่งเป็นการยืนยันว่า สีย้อม MG สามารถถูกกำจัดได้ด้วยการดูดซับและถูกย่อยสลายได้ด้วยแสง UV-A ในกรณีของการลดลงของค่า ADMI นั้น พบว่า มีแนวโนม้ลดลงไปในทิศทางเดียวกัน (ไม่มีการนำเสนอผลการวิเคราะห์)

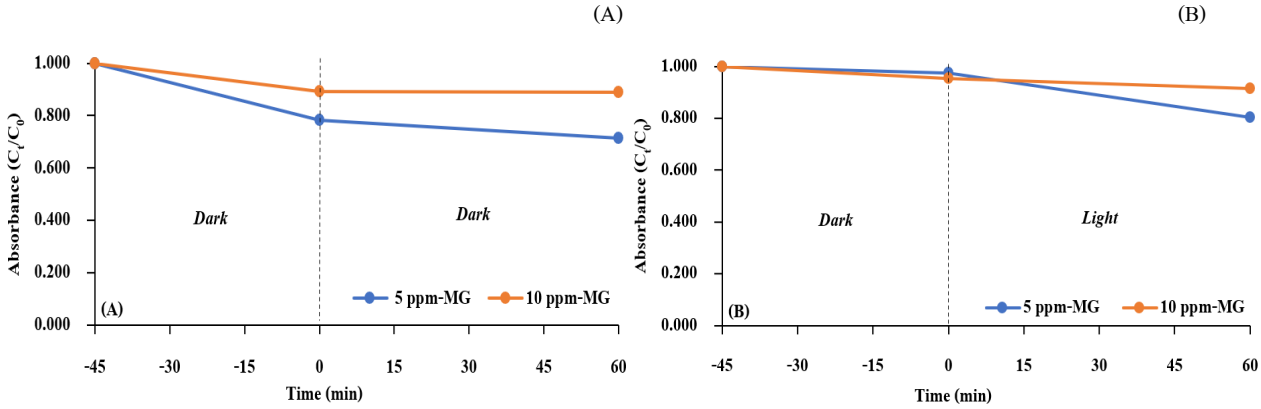


Fig. 3 Relationships between the changes in absorbance values of the MG containing solution and various reaction times. (A) with TiO_2 and UV-A turned off (B) without TiO_2 and UV-A turned on

ผลการศึกษาการย่อยสลายสีย้อม MB

จากการศึกษาการย่อยสลายสีย้อม MB ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 ppm (ADMI เริ่มต้นเท่ากับ 1750 และ 2900 ตามลำดับ) โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ด้วย Photocatalytic Reactor ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสง UV-A และผง TiO_2 พบว่า กระบวนการนี้สามารถความเข้มข้น (Abs) และค่า ADMI ของสีย้อม MG ที่ความเข้มข้น 5 ppm ได้เท่ากับ 99.40% และ 91.40% ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 10 ppm มีค่าเท่ากับ 84.70% และ 77.60% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของการทดลองชุดนี้ (Fig. 4) พบว่า ค่าความเข้มข้น (Abs) และ ADMI มีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ไม่มีการฉายแสง UV-A (กรณีที่ 1, Fig. 5A) และชุดการทดลองที่ไม่มีการใช้ TiO_2 แต่มีการฉายแสง UV-A (กรณีที่ 2, Fig. 5B) พบว่า สำหรับกรณีที่ 1 ความเข้มข้น (Abs) ของ 5 ppm-MB และ 10 ppm-MB ลดลงประมาณ 33.70% และ 20.60% ตามลำดับ และสำหรับกรณีที่ 2 ความเข้มข้น (Abs) ของ 5 ppm-MB และ 10 ppm-MB ลดลงประมาณ 11.20% และ 5.90% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของการทดลอง 2 กรณีนี้ (Fig. 5) พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวสามารถลดปริมาณสีย้อม MB ในน้ำได้ โดยการลดลงนี้เกิดจากกระบวนการดูดซับจากความสามารถในการดูดซับของผงตัวเร่งปฏิกิริยา แต่การใช้แสง UV-A เพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดปริมาณสีย้อม MB ได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองนี้เป็นการยืนยันว่า สีย้อม MB สามารถถูกกำจัดได้ด้วยการดูดซับแต่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยแสง UV-A ในกรณีของการลดลงของค่า ADMI นั้น พบว่า มีแนวโนม้ลดลงไปในทิศทางเดียวกัน (ไม่มีการนำเสนอผลการวิเคราะห์)

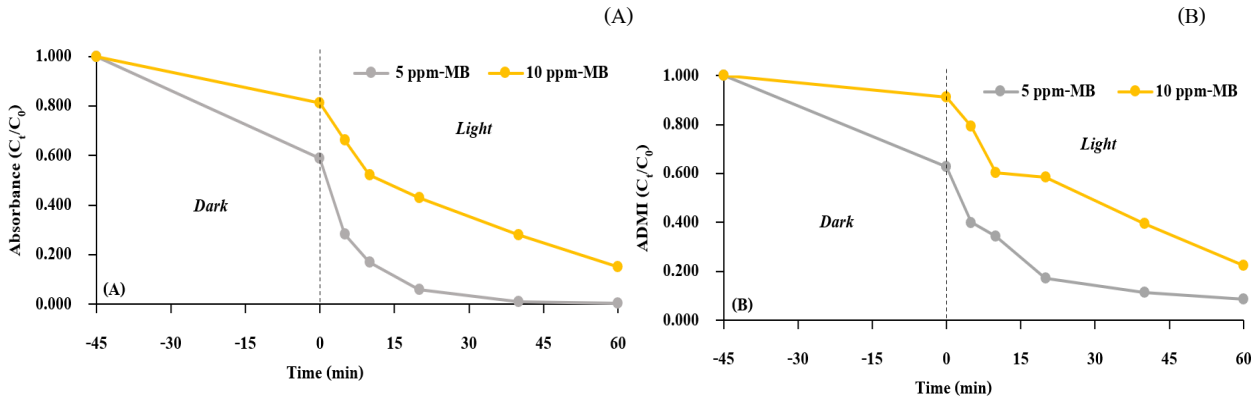


Fig. 4 Relationships between (A) the changes in absorbance values of the MB containing solution and various reaction times, and (B) the changes in ADMI color values of MG containing solution and various reaction times

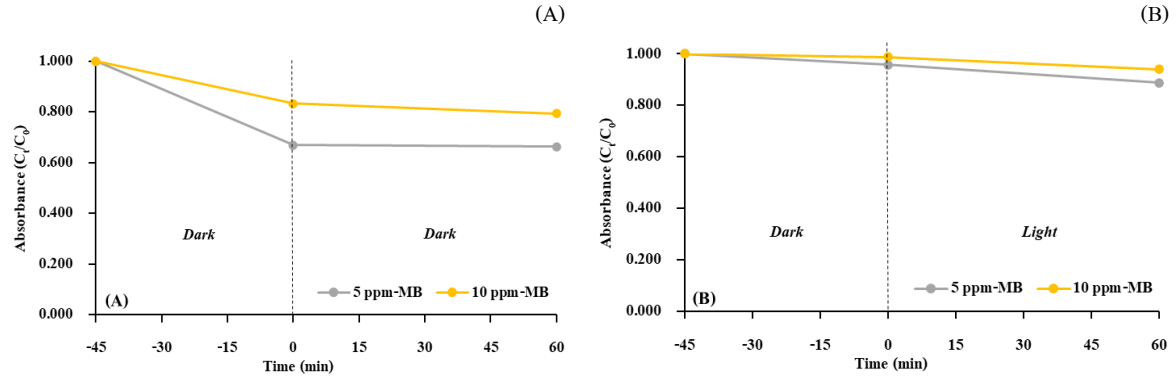


Fig. 5 Relationships between the changes in absorbance values of the MB containing solution and various reaction times. (A) with TiO_2 and UV-A turned off (B) without TiO_2 and UV-A turned on

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม MG และ MB ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก พบว่า กระบวนการนี้ทำให้ความเข้มสีของสีย้อมทั้งสองชนิดลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจาก เมื่อพลังงานจากแสง UV-A มีค่ามากพอที่จะกระตุ้นแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ โดยทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน จากนั้นที่แถบวาเลนซ์เดิมจะเกิดโฮลขึ้น ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ Hydroxyl Radicals (•OH) และ Superoxide Radicals ($\bullet O_2^-$) ซึ่งตัวออกซิไดซ์เหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้ (Srinivasan and Somasundaram, 2003) โดยสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์จะถูกออกซิไดซ์ด้วย •OH และ $\bullet O_2^-$ ทำให้ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง

จากผลการทดลองทั้งหมดข้างต้นนั้น กระบวนการโฟโตคะตะไลติกสามารถย่อยสลายสีย้อม MG ได้ดีกว่า MB เนื่องจาก มีความเป็นไปได้ว่า โครงสร้างสีย้อมที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดการย่อยสลายที่แตกต่างกัน อีกทั้งเมื่อพิจารณาผลกระทบจากกระบวนการดูดซับด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา สีย้อม MG สามารถถูกดูดซับด้วยผง TiO_2 ได้น้อย

กว่าสีย้อม MB ทำให้อนุภาคสีสามารถเคลื่อนที่และสัมผัสกับผง TiO_2 และแสงได้ดีกว่า ถึงแม้ว่ากระบวนการดูดซับหรือดูดติดผิวสามารถทำให้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเกิดได้เร็วขึ้น แต่กระบวนการดูดซับที่มากเกินไป ส่งผลให้ผง TiO_2 มีพื้นที่รับสัมผัสน้อยลง ทำให้พื้นผิวในการรับแสงน้อยลง และการย่อยสลายจะเกิดช้าลงตามไปด้วย

นอกจากนี้ กระบวนการดูดซับของผง TiO_2 มีผลต่อการลดลงของความเข้มสีของสีย้อมในน้ำอย่างชัดเจน แสง UV-A มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อม MG มากกว่า MB เพราะสีย้อม MB ส่วนใหญ่ถูกดูดซับด้วยผง TiO_2 ทำให้การรับสัมผัสแสงของอนุภาคสี MB น้อยกว่า MG ค่า Abs และ ADMI มีความแปรผันตามกัน ประสิทธิภาพในการลดความเข้มสีของสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่ำจะสูงกว่าสีย้อมที่มีความเข้มข้นสูง เพราะเมื่อความเข้มสีของสีย้อมในน้ำสูงขึ้น ค่า Abs และ ADMI จะสูงขึ้นตาม เนื่องจากจำนวนอนุภาคสีที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการบดบังแสงที่ส่องลงมา ส่งผลให้ผง TiO_2 ได้รับพลังงานแสง UV-A ไม่ทั่วถึง ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมลดลง

สรุป

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกสามารถย่อยสลายสีย้อม MG และ MB ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกดังกล่าวนี้จำเป็นต้องใช้ทั้งกระบวนการดูดซับและพลังงานแสงควบคู่กันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุด กระบวนการโฟโตคะตะไลติกสามารถย่อยสลายสีย้อม MG ได้ดีกว่า MB อาจเป็นผลจากความแตกต่างของโครงสร้างโมเลกุลและผลกระทบจากกระบวนการดูดซับด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา สุดท้ายนี้ ความเข้มข้นของสีย้อมมีผลโดยตรงต่อกระบวนการย่อยสลาย โดยประสิทธิภาพในการลดความเข้มสีของสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่ำจะสูงกว่าสีย้อมที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้น การย่อยสลายสีย้อมควรมีการลดความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำก่อนการกำจัด เพื่อหลีกเลี่ยงระยะเวลาในการกำจัดที่นานเกินไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์ทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อีกทั้งคำแนะนำและองค์ความรู้จากอาจารย์ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R.N., Idriss, H., Nadeem, M.A. 2014. Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO_2 based photocatalysts: a comparative overview. RSC Adv. 4: 37003–37026.

Arslan, I., Balcioglu, I.A., Tuhkanen, T., Bahnemann, D. 2000. H_2O_2/UV-C and Fe^{2+}/H_2O_2/UV-C versus TiO_2/UV-A treatment for reactive dye wastewater. J. Environ. Eng. 126: 903–911.

Charoenlarp, K, Prabphane, P. 2015. Ecofriendly decolorization of textile wastewater using natural coagulants. Rmutsb Academic Journal 3: 45–55.

Chaudhuri, S.K., Sur, B. 2000. Oxidative decolorization of reactive dye solution using fly ash as catalyst. J. Environ. Eng. 126: 583–594.

Katheresan, V., Kansedo, J., Lau, S.Y. 2018. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. J. Environ. Chem. Eng. 6: 4676–4697.

Fujishima, A., Rao, T.N., Tryk, D.A. 2000. Titanium dioxide photocatalysis. J. Photoch. Photobio. C. 1: 1–21.

Hassaan, M.A., Nemr, A.E. 2017. Health and environmental impacts of dyes: Mini review. American Journal of Environmental Science and Engineering 1: 64–67. doi: 10.11648/j.ajese.20170103.11

Herrmann, J.-M., Guillard, C., Pichat, P., 1993. Heterogeneous photocatalysis: An emerging technology for water treatment. Catal. Today. 17: 7–20.

Ngadi, N., Ee, C.C., Yusoff, N.A. 2013. Removal of methylene blue dye by using eggshell powder. Jurnal Teknologi. 65: 63–71.

Srinivasan, C., Somasundaram, N. 2003. Bactericidal and detoxification effects of irradiated semiconductor catalyst, TiO_2. Curr. Sci. India. 85: 1431–1438.

Stock, N.L., Peller, J., Vinodgopal, K., Kamat, P.V. 2000. Combinative sonolysis and photocatalysis for textile dye degradation. Environ. Sci. Technol. 34: 1747–1750.

การเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟมโพลีสไตรีนภายใต้สภาวะแวดล้อม

The degradation of polystyrene foam in the different environments

พิชญุตม์ บัวทอง*, สุชีลา พลเรือง, วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์

Phichayut Bouthong*, Sucheela Polruang, Varinporn Asokbunyarat

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: phichayut.b@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของชิ้นโฟมโพลีสไตรีน และปัจจัยการเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟมในน้ำทะเลและน้ำกลั่นภายใต้สภาวะแวดล้อมจำลองแบบเร่งที่มีคลื่นและมีแสง/ไม่มีคลื่นแต่มีแสง/ไม่มีคลื่นและไม่มีแสงในระยะเวลา 6 เดือน และตัวอย่างชิ้นโฟมในเดือนที่ 0 เดือนที่ 4 และเดือนที่ 6 จะตรวจวิเคราะห์พื้นผิวและหมู่ฟังก์ชั่นของชิ้นโฟม ผลการทดลอง พบว่าพื้นผิวของชิ้นโฟมในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง ที่ไม่มีคลื่นแต่มีแสง มีการเปลี่ยนแปลงสีพื้นผิวโฟม มีขนาดชิ้นโฟมที่เล็กลง พบรอยแตกที่พื้นผิวโฟม และมีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชั่นของชิ้นโฟม และพื้นผิวของชิ้นโฟมในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่ไม่มีคลื่นและไม่มีแสงไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีพื้นผิวโฟม มีขนาดชิ้นโฟมที่เท่าเดิม ไม่พบรอยแตกที่พื้นผิวโฟม และไม่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชั่นของชิ้นโฟม อาจระบุว่า แสงและคลื่นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่พื้นผิวโฟมและหมู่ฟังก์ชั่นของชิ้นโฟมเนื่องจากการย่อยสลายชิ้นโฟมด้วยปฏิกิริยาโฟโต้ออกซิเดชั่นโดยมีออกซิเจน ความร้อนและแสงอัลตร้าไวโอเลตเป็นปัจจัยสำคัญ และการย่อยสลายชิ้นโฟมด้วยแรงเชิงกล

คำสำคัญ: การย่อยสลาย, โฟม, โพลีสไตรีน

Abstract

The objectives of the research was to study the physical and chemical transformation of polystyrene foam. The factor of polystyrene foam transformation under circumstancing Brine and distilled water sample by using wave/light, without wave/with light, without wave/without light in sixth month. Sample of polystyrene foam in zero, fourth and sixth month analyzation the surface and function group of polystyrene foam the result of the experiment is Surface of Brine sample, distilled water sample under circumstancing of wave/light and without wave/with light the polystyrene foam surface colour is changed size decrease has a fracture on the surface and the function group of polystyrene foam has changed. The Surface of Brine sample, distilled water sample under circumstancing of without wave/without light nothing change on the surface, size has not change, no fracture found and the function group not change. May specify light and wave is the primary factor of physical transformation on the surface of polystyrene foam and function group of polystyrene foam as degradation of polystyrene by photo oxidation reaction with oxygen, heat and the ultraviolet is the primary factor and degradation of polystyrene foam by mechanical force.

Keywords: degradation, foam, polystyrene

คำนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมใช้และมีต้นทุนต่ำ มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีการเติมสารเติมแต่งเพื่อให้โครงสร้างของพลาสติกมีความแข็งแรงและทนต่อการย่อยสลายมากขึ้น ทำให้ขยะพลาสติกเป็นมลพิษที่สำคัญทั่วโลก ในปัจจุบันขยะพลาสติกขนาดเล็กและไมโครพลาสติกเริ่มเป็นประเด็นที่น่าสนใจของนักวิจัยทั่วโลกในเรื่องการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อม เช่น ไมโครพลาสติกในชายหาด ไมโครพลาสติกในน้ำและตะกอนดิน (Zbyszewski and Corcoran, 2010) รวมทั้งไมโครพลาสติกอาจสะสมในสัตว์น้ำ (ปิติพงษ์ และคณะ, 2559) โดยมีปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น แสงแดดและคลื่นน้ำ ทำให้ชิ้นพลาสติกขนาดใหญ่เกิดการแตกหัก ผุกร่อนและย่อยสลายเป็นพลาสติกขนาดเล็กและไมโครพลาสติก (Sun et al., 2020)

ไมโครพลาสติก คือ พลาสติกขนาดเล็กที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร แหล่งกำเนิดของไมโครพลาสติกมาจาก 2 แหล่งกำเนิด คือ พลาสติกที่ผลิตขึ้นมีขนาดเล็กมาก เช่น ไมโครพลาสติกในเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด และไมโครพลาสติกที่มาจากชิ้นพลาสติกขนาดใหญ่เกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโต้ออกซิเดชั่น ทำให้ชิ้นพลาสติกมีขนาดเล็กลงและเข้าสู่แหล่งน้ำทั้งน้ำจืดและน้ำทะเล รวมทั้งสัตว์น้ำอาจกลืนกินไมโครพลาสติก ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว (Brandon et al., 2016)

งานวิจัยครั้งนี้จัดทำเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของชิ้นโฟมโพลีสไตรีน และปัจจัยการเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟมขนาดใหญ่ภายใต้สภาวะแวดล้อม อาทิเช่น แสงอัลตร้าไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ คลื่นน้ำและกระแสน้ำ ชิ้นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ คือ ชิ้นกล่องโฟมใส่อาหารสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร และยาว 1 เซนติเมตร ที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกชนิดโพลีสไตรีน (Polystyrene, PS) แสงอัลตร้าไวโอเลตที่ใช้ คือ แสงสังเคราะห์จากหลอดไฟ UVA คลื่นน้ำและกระแสน้ำจำลองด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) การเปลี่ยนรูปของชิ้นกล่องโฟมใส่อาหารจำลองภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบเร่งที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง ไม่มีคลื่นและไม่มีแสงในระยะเวลา 6 เดือน และเก็บตัวอย่างชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในเดือนที่ 0 เดือนที่ 4 และเดือนที่ 6 เพื่อตรวจวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างชิ้นโฟมโพลีสไตรีนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นของชิ้นโฟมโพลีสไตรีนด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR)

อุปกรณ์และวิธีการ

ชิ้นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ทดสอบ

ชิ้นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ คือ ชิ้นกล่องโฟมใส่อาหารสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร และยาว 1 เซนติเมตร (Fig. 1) ที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกชนิดโพลีสไตรีน (Polystyrene, PS) จำนวน 40 ชิ้น

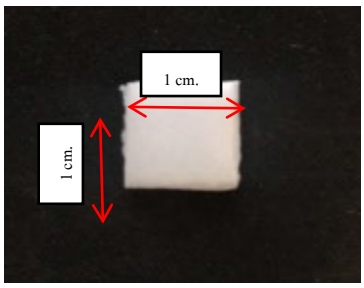


Fig. 1 A piece of foam food container, square 1 cm wide and 1 cm long

อุปกรณ์ที่ใช้จำลองการเปลี่ยนรูปของชิ้นผลิตภัณฑ์พลาสติกภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบเร่ง

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้จำลอง ออกแบบเป็นกล่องสแตนเลสสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 55 เซนติเมตร และยาว 55 เซนติเมตร กล่องสแตนเลสสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการติดตั้งหลอดไฟ UVA-340 พัดลมระบายอากาศ และเครื่องเขย่า (Shaker) (Fig. 2) เครื่องเขย่าออกแบบให้ใส่บีกเกอร์แก้วขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุชิ้นผลิตภัณฑ์พลาสติกขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร และยาว 1 เซนติเมตร และบรรจุน้ำ 160 มิลลิลิตร



Fig. 2 A simulation environmental chamber equipped with a UV340 lamp, Shaker and without Shaker

สภาวะแวดล้อมที่ใช้จำลองการเปลี่ยนรูปของชิ้นผลิตภัณฑ์พลาสติก

การเปลี่ยนรูปของชิ้นกล่องโฟมโพลีสไตรีนจะจำลองภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบเร่งตามเงื่อนไขใน (Table 1) คือ การจำลองชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง

Table 1 Environmental conditions affecting the degradation of polystyrene foam products

Plastic Product	Factors affecting the degradation of polystyrene foam products			Environmental conditions Model
	Water resources	Sea Water	Sunlight	
Polystyrene foam	seawater	✓	✓	Polystyrene foam in seawater with wave and sunlight
		×	✓	Polystyrene foam in seawater without wave and sunlight
		×	×	Polystyrene foam pieces in seawater without waves and without light.
	Distilled water	✓	✓	Polystyrene foam in seawater with wave and sunlight
		×	✓	Polystyrene foam in seawater without wave and sunlight
		×	×	Polystyrene foam pieces in seawater without waves and without light.

แหล่งน้ำ น้ำทะเลที่ชายหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี จะใช้ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้จำลองการเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟมโพลีสไลลีนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบเร่ง น้ำทะเลที่ใช้จะผ่านตะแกรงกรองขนาด 300 ไมครอน และ 75 ไมครอน เพื่อคัดแยก หิน ทราย ขยะ และไมโครพลาสติกในน้ำทะเล

คลื่นน้ำ ติดตั้งเครื่องเขย่า (Shaker) ที่มีขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร และยาว 50 เซนติเมตร ที่สามารถใส่บีกเกอร์แก้วและกำหนดความเร็วรอบได้ (Fig. 2) เพื่อจำลองคลื่นในน้ำ ความเร็วคลื่นในน้ำทะเลบริเวณอ่าวไทย มีค่าเฉลี่ย 10 เซนติเมตรต่อวินาที จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดความเร็วรอบของเครื่องเขย่า และความเร็วรอบของเครื่องเขย่าที่ใช้ทดสอบ คือ 150 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าประมาณ 5 เท่าของความเร็วคลื่นในน้ำทะเล

แสงแดด ติดตั้งหลอดไฟUVA-340 ที่มีขนาดกว้าง 3.25 เซนติเมตร และยาว 58 เซนติเมตร (20 วัตต์ต่อหลอด) จำนวน 5 หลอด ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้จำลองการเปลี่ยนรูปของชิ้นผลิตภัณฑ์พลาสติกภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบเร่ง (Fig. 2) เพื่อจำลองแสงอัลตร้าไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ ความเข้มแสงอัลตร้าไวโอเลตเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ที่จุดเหนือศีรษะ มีค่าประมาณ 36 วัตต์ต่อตารางเมตร จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของความเข้มแสงอัลตร้าไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ และความเข้มแสงของหลอดไฟUVA-340 จำนวน 5 หลอด เท่ากับ 269 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าประมาณ 7.5 เท่าของความเข้มแสงอัลตร้าไวโอเลตจากดวงอาทิตย์

การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่าง

การเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟมโพลีสไตรีนภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบเร่งจะจำลองในระยะเวลา 6 เดือน เพื่อศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นโฟมโพลีสไตรีนตลอดระยะเวลาการทดลอง และเก็บชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในเดือนที่ 0 เดือนที่ 4 และเดือนที่ 6 เพื่อตรวจวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างชิ้นโฟมโพลีสไตรีนด้วยกล้องจุลทรรศน์และมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง ไม่มีคลื่นและไม่มีแสอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของชิ้นโฟมโพลีสไตรีนด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นโฟมโพลีสไตรีนที่มองเห็นด้วยตาเปล่า

ในเดือนที่ 0 (เริ่มต้นการทดลอง)ชิ้นโฟมโพลีสไตรีนที่มีพื้นผิวสีขาวและรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร และยาว 1 เซนติเมตร แช่อยู่ในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่สภาวะแวดล้อมจำลองแบบเร่ง (มีคลื่นและมีแสง/ไม่มีคลื่นแต่มีแสง/ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง) ในเดือนที่ 2 และเดือนที่ 4 ชิ้นโฟมในน้ำทะเลพบเกล็ดเกลือที่พื้นผิวและชิ้นโฟมบางชิ้นในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง มีขนาดเล็กลงและชิ้นโฟมบางชิ้นแตกออกจากชิ้นโฟมรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และชิ้นโฟมในเดือนที่ 4 มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับชิ้นโฟมในเดือนที่ 2 ในเดือนที่ 2 – 6 ชิ้นโฟมในน้ำทะเลที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง พบการเปลี่ยนแปลงของสีพื้นผิวโฟมจากสีขาวเป็นสีเหลือง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของแสงUVAบนพื้นผิวโฟมและมีหมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) เกิดขึ้น

ในเดือนที่ 6 ชิ้นโฟมในน้ำทะเลพบเกล็ดเกลือที่พื้นผิว และชิ้นโฟมในน้ำทะเล และน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง มีขนาดเล็กกว่าชิ้นโฟมในเดือนที่ 4 เนื่องจากการแตกออกจากชิ้นโฟมที่มีขนาดใหญ่ ในเดือนที่ 6 ชิ้นโฟมในน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง พบการเปลี่ยนแปลงของสีพื้นผิวโฟมจากสีขาวเป็นสีเหลือง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของแสงUVAบนพื้นผิวโฟม และมีหมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O)

เกิดขึ้น ในเดือนที่ 0 – 6 ชิ้นโฟมในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ขนาด และสีพื้นผิวชิ้นโฟม Fernández-González et al. (2020) ระบุว่าชิ้นโพลีสไตรีนในสภาวะแวดล้อมที่มีแสงUV และมีอากาศจะเกิดสีเหลืองที่พื้นผิวและมีการย่อยสลายของชิ้นโฟม

การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นโฟมโพลีสไตรีนที่มองเห็นด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในเดือนที่ 0 (เริ่มต้นการทดลอง) พื้นผิวชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่สภาวะแวดล้อมจำลองแบบเร่ง (มีคลื่นและมีแสง/ไม่มีคลื่นแต่มีแสง/ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง) มีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบและไม่มีรอยแตกที่พื้นผิว (Table 2และTable 3) ในเดือนที่ 4 พื้นผิวชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง มีลักษณะพื้นผิวที่แตกออกเป็นชิ้นเล็ก (Table 2 และ Table 3) ในเดือนที่ 6 พื้นผิวชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง มีลักษณะพื้นผิวที่แตกออกเป็นชิ้นเล็กกว่าในเดือนที่ 4 Cai et al. (2018) รายงานผลว่าในเดือนที่ 1 ชิ้นโพลีสไตรีนในน้ำทะเล น้ำกลั่น และอากาศในสภาวะแวดล้อมที่มีแสง UV เริ่มเกิดรอยแตกและเกิดการย่อยสลายของชิ้นโฟมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา และรอยแตกบ่งชี้การสัมผัสที่ยาวนานขึ้นถึงกระบวนการย่อยสลายด้วยกระบวนการโฟโต้ออกซิเดชั่น (Cooper, 2012) ลักษณะพื้นผิวของชิ้นโพลีโพพีลีนที่ถูกออกซิเดชั่นในน้ำทะเลพบว่ามีรอยแตกและหลุมลึกที่พื้นผิว (Zbyszewski and Corcoran, 2010) ในเดือนที่ 0–6 พื้นผิวชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวชิ้นโฟม (Table 2 และTable 3)

Table 2 The degradation of polystyrene in the circumstance environments sea water using wave/light, without wave/with light, without wave/without light

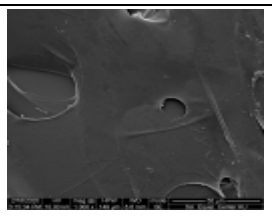
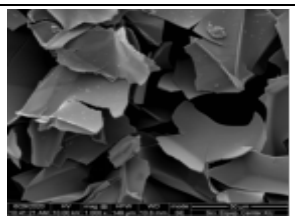
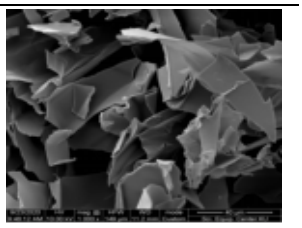
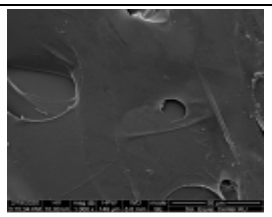
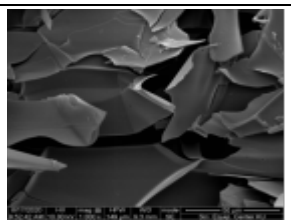
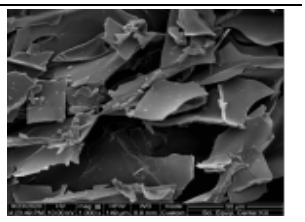
Simulat Enivronments		Polystyrene piece surface appearance		
		Month 0	Month 4	Month 6
Sea water	Sun/wave			
	Sun/N.wave			

Table 2 (continued).

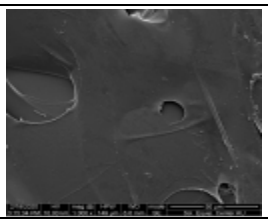
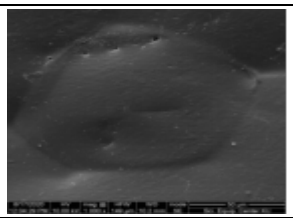
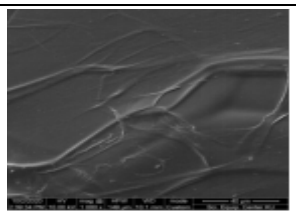
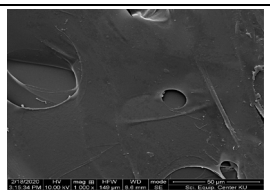
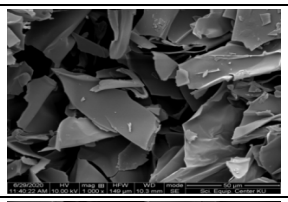
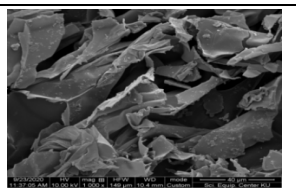
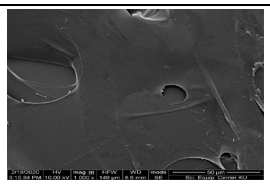
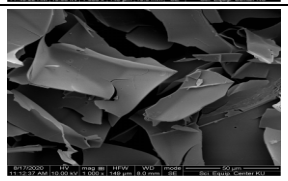
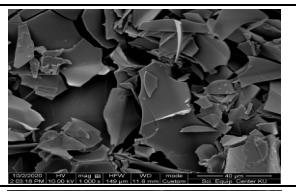
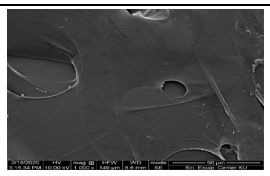
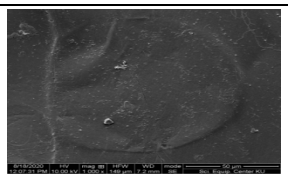
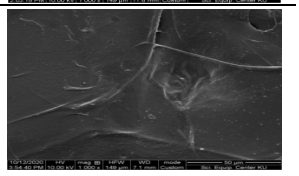
Simulat Enivronments		Polystyrene piece surface appearance		
		Month 0	Month 4	Month 6
Sea water	N.sun/N.wave			

Table 3 The degradation of polystyrene in the circumstance environments distilled water using wave/light, without wave/with light, without wave/without light

Simulat Enivronments		Polystyrene piece surface appearance		
		Month 0	Month 4	Month 6
Distilled water	Sun/wave			
	Sun/ N.wave			
	N.sun/ N.wave			

ผลการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นโฟมในเดือนที่ 0–6 สรุปได้ว่า แสงUVAเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟม เนื่องจากชิ้นโฟมในน้ำที่มีคลื่นและไม่มีคลื่นแต่มีแสง พบรอยแตกแยกของพื้นผิวชิ้นโฟม แต่ชิ้นโฟมในน้ำที่ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวชิ้นโฟม และคลื่นน้ำเป็นปัจจัยรองที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของชิ้นโฟม เนื่องจากชิ้นโฟมในน้ำที่มีคลื่นและไม่มีคลื่นแต่มีแสง พบรอยแตกแยกของพื้นผิวชิ้นโฟม

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นโฟมโพลีสไตรีนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

ในเดือนที่ 0 (เริ่มต้นการทดลอง)ชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่สภาวะแวดล้อมจำลองแบบเร่ง (มีคลื่นและมีแสง/ไม่มีคลื่นแต่มีแสง/ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง) ไม่พบหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) ที่ความยาวคลื่น 3,100–3,700 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) ที่ความยาวคลื่น 1,550–1,810 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชั่น Ethers (C-O) ที่ความยาวคลื่น 1070–1140 cm^{-1} ในเดือนที่ 4 ชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่ไม่มีคลื่น

แต่มีแสง พบหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) ที่ความยาวคลื่น 3100–3700 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) ที่ความยาวคลื่น 1,550–1,810 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชั่น Ethers (C-O) ที่ความยาวคลื่น 1,070–1,140 cm^{-1} ในเดือนที่ 6 ชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง ไม่มีคลื่นแต่มีแสง พบหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) ที่ความยาวคลื่น 3,100–3,700 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) ที่ความยาวคลื่น 1,550–1,810 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชั่น Ethers (C-O) ที่ความยาวคลื่น 1070–1140 cm^{-1}เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชั่นในเดือนที่ 4 (Table 4 และ Table 5) และในเดือนที่ 6 ชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่ไม่มีคลื่นแต่มีแสง พบหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) หมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) และหมู่ฟังก์ชั่น Ethers (C-O) เพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่มีคลื่นและมีแสง และในเดือนที่ 0 – 6 ชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่ไม่มีคลื่นและไม่มีแสง ไม่พบหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) ที่ความยาวคลื่น 3,100–3,700 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group(C=O) ที่ความยาวคลื่น 1,550–1,810 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชั่น Ethers (C-O) ที่ความยาวคลื่น 1,070–1,140 cm^{-1} (Table 4และTable 5)

Table 4 Changed of chemical composition polystyrene in the circumstance environments sea water using wave/light, without wave/with light, without wave/without light

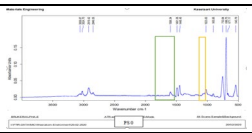
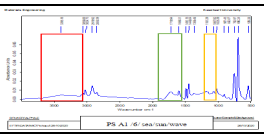
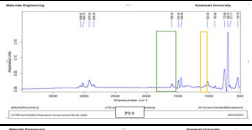
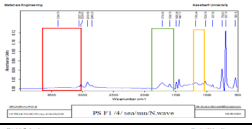
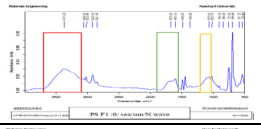
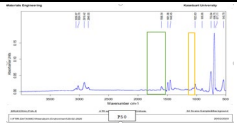
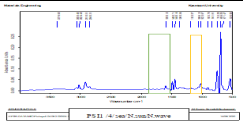
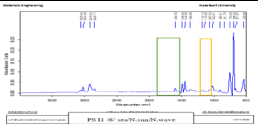
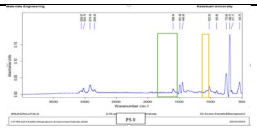
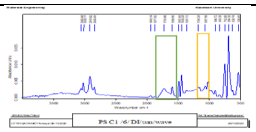
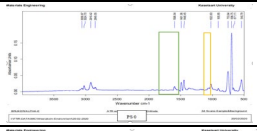
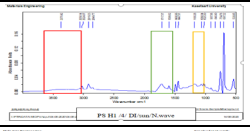
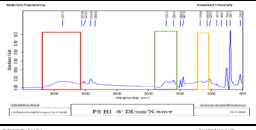
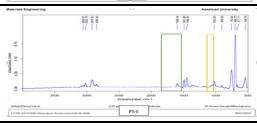
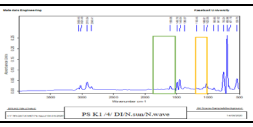
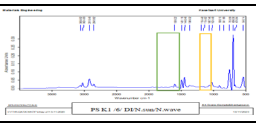
Simulat Enivronments		Polystyrene piece surface appearance		
		Month 0	Month 4	Month 6
Sea water	Sun/wave		N.D.	
	Sun/N.wave			
	N.sun/N.wave			

Table 5 Changed of chemical composition polystyrene in the circumstance environments distilled water using wave/light, without wave/with light, without wave/without light

Simulat Enivronments		Polystyrene piece surface appearance		
		Month 0	Month 4	Month 6
Distilled water	Sun/wave		N.D.	
	Sun/N.wave			
	N.sun/N.wave			

ผลการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นโฟมในเดือนที่ 0 – 6 สรุปได้ว่า แสงUVAเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชั่นของชิ้นโฟม อัณณพ และสมศักดิ์ (2552) Gewert et al. (2015) และ Cai et al. (2018) ระบุว่าหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) และหมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) สามารถบ่งชี้ถึงการย่อยสลายพลาสติกด้วยปฏิกิริยาโฟโต้ออกซิเดชั่น (Photo-Oxidation) โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงอัลตร้าไวโอเลต หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ รายงานผลของ Lenz R et al. (2015) พบว่าชิ้นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเอทิลีน (PET) ในน้ำกลั่นและน้ำทะเลที่มีแสง UV ไม่พบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชิ้น PET

สรุป

ชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นที่สภาวะแวดล้อมจำลองแบบเร่งที่มีคลื่นและมีแสง ที่ไม่มีคลื่นแต่มีแสง พบการเปลี่ยนแปลงสีที่พื้นผิวโฟม (จากพื้นผิวสีขาวเป็นพื้นผิวสีเหลือง) พบชิ้นโฟมมีขนาดที่เล็กลงและเล็กลงมากเมื่อได้รับแสงในระยะเวลาที่นานขึ้น พบรอยแตกที่พื้นผิวโฟม และพบหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) หมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) และหมู่ฟังก์ชั่น Ethers (C-O) ที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อได้รับแสงในระยะเวลาที่นานขึ้นและชิ้นโฟมโพลีสไตรีนในน้ำทะเลและน้ำกลั่นสภาวะแวดล้อมจำลองแบบเร่งที่ไม่มีคลื่นและไม่มีแสงไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีที่พื้นผิวโฟม (พื้นผิวสีขาว) พบชิ้นโฟมมีขนาดที่เท่าเดิม ไม่พบรอยแตกที่พื้นผิวโฟม และไม่พบหมู่ฟังก์ชั่น Hydroxyl group (-OH) หมู่ฟังก์ชั่น Carbonyl group (C=O) และหมู่ฟังก์ชั่น Ethers (C-O) อาจระบุว่า แสงและคลื่นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่พื้นผิวโฟมและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชั่นของชิ้นโฟม เนื่องจากการย่อยสลายชิ้นโฟมด้วยปฏิกิริยาโฟโต้ออกซิเดชั่น (Photo-Oxidation) โดยมีออกซิเจน ความร้อนและแสงอัลตร้าไวโอเลตเป็นปัจจัยสำคัญ และการย่อยสลายชิ้นโฟมด้วยแรงเชิงกล

เอกสารอ้างอิง

ปิติพงษ์ ธาระมนต์, สุหทัย ไพรสานต์กุล, นภาพร เลียดประถม. 2559. การปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในหอยสองฝาบริเวณชายหาดเจ้าหลาว และชายหาดคุ้งวิมาน จังหวัดจันทบุรี. แก่นเกษตร 44 ฉบับพิเศษ 1. หน้า 738–744.

อัณณพ รักรัตน์, สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2552. ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง. ใน: รายงานการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 785–794.

Brandon, J., Goldstein, M., Ohman, M.D. 2016. Long-term aging and degradation of microplastic particles: Comparing in situ oceanic and experimental weathering patterns. Marine Pollution Bulletin. 110: 299–308.

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. Science of the Total Environment. 628–629, 740–747.

Cooper, D.A. 2012. Effects of Chemical and Mechanical Weathering Processes on the Degradation of Plastic Debris on Marine Beaches. PhD Dissertation, University of Western Ontario, London, Canada.

Fernández-González, V., Andrade-Garda, J.M., López-Mahía, P., MuniateguiLorenzo, S. 2021. Impact of weathering on the chemical identification of microplastics from usual packaging polymers in the marine environment. Analytica Chimica Acta. 1142: 179–188.

Gewert, B., Plassmann, M.M., Macleod, M. 2015. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. Environmental Science: Processes & Impacts. 17: 1513–1521.

Lenz, R., Enders, K., Stedmon, C.A., Mackenzie David, M.A., Nielsen, T.G. 2015. A critical assessment of visual identification of marine microplastics using Raman spectroscopy for analysis improvement. Marine Pollution Bulletin. 100: 82–91.

Sun, Y., Yuan, J., Zhou, T., Zhao, Y., Yu, F., Ma, J. 2020. Laboratory simulation of microplastics weathering and its adsorption behaviors in an aqueous environment: A systematic review. Environmental Pollution. 265: 1–11.

Zbysszewski, M., Corcoran, P.L. 2011. Distribution and Degradation of Fresh Water Plastic Particles Along the Beaches of Lake Huron, Canada. Water, Air, & Soil Pollution. 220: 365–372.

การปรับแก้ความเอนเอียงปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM5 ด้วยเทคนิค Quantile Mapping สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำคลองสวนหมาก

Statistical bias correction for precipitation data of CanESM5 model using Quantile mapping technique over Klong Suan Mak river basin

อภิสิทธิ์ นุชอิ้ง, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร์*, เกศวรา สิทธิโชค

Apisit Nuch Ing, Jutithep Vongphet*, Ketvara Sittichok

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับแก้ความเอนเอียงของปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM5 ซึ่งพัฒนาตามเงื่อนไขของรายงาน the Sixth Assessment Report (AR6) โดยคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC) ด้วยเทคนิค Quantile mapping สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำคลองสวนหมาก โดยสถานีตรวจวัดฝนที่เป็นตัวแทนจำนวน 2 สถานี ได้แก่ สถานีกำแพงเพชรและสถานีอุ้มผาง ซึ่งดำเนินการสอบเทียบและทวนสอบข้อมูลปริมาณฝนรายวันในช่วง ค.ศ. 2001–2012 และ 1991–2000 ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า ข้อมูลปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ผ่านกระบวนการปรับแก้ความเอนเอียงมีความแม่นยำมากขึ้นทั้ง 2 สถานี โดยมีค่า R^2 เพิ่มขึ้นและมีค่า RMSE ลดลง ทั้งในช่วงการสอบเทียบและทวนสอบ โดยปริมาณฝนตรวจวัดเฉลี่ยในมีค่าเท่ากับ 1,420 มม.ต่อปี ในขณะที่ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยของแบบจำลองก่อนและหลังการปรับแก้เท่ากับ 2,366 และ 1,592 มม.ต่อปี จากการปรับแก้ความเอนเอียงด้วยวิธี Quantile mapping พบว่า เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปสู่การฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อไป

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, ภาพฉายอนาคตของปริมาณฝน, ลุ่มน้ำคลองสวนหมาก

Abstract

The objective of the research was to correct rainfall bias from the CanESM5 global climate model which was developed under the terms of the Sixth Assessment Report (AR6), by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) by using the Quantile Mapping Technique over the Klong Suan Mak river basin. There are 2 representative meteorological stations, Kamphaengphet and Umphang Station. The calibration and validation of the daily rainfall data was conducted during the years of 2001–2012 and 1991–2000, respectively. As the result, the precipitation data from the global climate model under the bias correction process was more accurate at both stations, with an increasing of R^2 and reducing of RMSE during both the calibration and verification periods. The average annual observed rainfall in the study area was 1,420 mm per year, while the model's average annual rainfall before and after the adjustment was 2,366 and 1,592 mm per year. Evaluating the efficiency of bias correction using Quantile mapping technique was found to be effective. In the future, it could be a guide to project the future of rainfall under climate change.

Keywords: climate change, Klong Suan Mak river basin, the future projection of rainfall

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ที่กำลังเกิดขึ้นทั่วโลก ล้วนส่งผลต่อสภาพแวดล้อมบนโลก เช่น อุณหภูมิ ปริมาณฝน ระดับน้ำทะเลปานกลาง ซึ่งในนิยามของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC) ตามเงื่อนไขรายงานการประเมินครั้งที่ 6 (Sixth Assessment Report, AR6) สาระสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสภาพภูมิอากาศ คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้อุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้น 1.5 องศาเซลเซียส ภายในปี ค.ศ. 2100 (IPCC, 2021)

Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) เป็นโครงการวิจัยที่ศึกษาและรวบรวมแบบจำลองภูมิอากาศโลก ซึ่งอยู่ภายใต้รายงาน AR6 ในปัจจุบัน โดยมีการปรับแก้นิยามของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลกให้สอดคล้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป ประกอบด้วย แบบจำลองภูมิอากาศโลกจำนวนมาก หนึ่งในนั้นคือ แบบจำลองภูมิอากาศโลก The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5) โดยแบบจำลองจะสร้างภาพฉายของสภาพภูมิอากาศในอนาคต ซึ่งใช้ตัวแปรภูมิอากาศจำนวนมากสำหรับแบบจำลอง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น รังสีดวงอาทิตย์ ปริมาณฝน เป็นต้น

ที่ผ่านมามีการศึกษาโดยใช้แบบจำลอง CanESM2 ในระบบ AR5 ทั้งในต่างประเทศ เช่น การศึกษาดัชนีความแห้งแล้งในลุ่มน้ำ Baro (Gebremedhin et al., 2018) ประเทศเอธิโอเปีย และลุ่มน้ำ Langat ประเทศมาเลเซีย (Huang et al., 2016) การฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนในลุ่มน้ำ Thu Bon ประเทศเวียดนาม (Phuong et al., 2020) รวมถึงประเทศไทย เช่น พัลลภ และคณะ (2562) ได้ทำการคัดเลือกความสัมพันธ์ของตัวแปรภูมิอากาศโลกกับข้อมูลภูมิอากาศตรวจวัด ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตรอู่ทอง หรือ การศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำเพชรบุรี (เกศวรา และคณะ, 2561) และ พลเพชร และคณะ (2563) ได้ทำการลดมาตราส่วนทางสถิติของปริมาณฝนรายเดือนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลอง CanESM ของประเทศแคนาดา มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วโลกรวมถึงภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และประเทศไทยจึงเป็นข้อสนับสนุนในการเลือกใช้แบบจำลอง CanESM5 ของประเทศแคนาดา ซึ่งเป็นแบบจำลองในระบบใหม่ล่าสุด (AR6) สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกมากขึ้นเพื่อการสร้างภาพฉายอนาคตของทรัพยากรธรรมชาติและสภาพภูมิอากาศโลก (Bonsal and Prowse, 2005) โดยผลจากแบบจำลองภูมิอากาศจะแสดงผลในรูปแบบ Grid cell ขนาดใหญ่ปกคลุมทั่วโลกครอบคลุมพื้นที่ขนาด 200–500 กม. จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในระดับพื้นที่เป้าหมายได้โดยตรง จำเป็นต้องประยุกต์ใช้เทคนิคการลดมาตราส่วน (เกศวรา และคณะ, 2561) อย่างไรก็ดียังมีวิธีการนำผลจากแบบจำลองภูมิอากาศมาใช้งานกับพื้นที่เป้าหมายอีกรูปแบบ คือ การปรับแก้ความเอนเอียงด้วยวิธี Quantile Mapping ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันถูกพัฒนาและสามารถใช้งานผ่านเครื่องมือที่เรียกว่า Climate Data Bias Corrector โดยเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลสภาพภูมิอากาศด้วยวิธี Quantile Mapping ซึ่งสามารถใช้ได้กับตัวแปร ปริมาณฝน อุณหภูมิ และรังสีดวงอาทิตย์ โดยมีประยุกต์ใช้ปรับแก้ปริมาณฝนในประเทศอินเดีย ทำให้ปริมาณฝนหลังการปรับแก้มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณฝนตรวจวัด (Gupta et al., 2019) ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมาเป็นการศึกษาในระบบ AR5 แต่ในปัจจุบันมีการเผยแพร่รายงานในระบบใหม่ (AR6) จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้ กล่าวคือ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากแบบจำลอง CanESM5 ในระบบ AR6 ซึ่งมีความทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำคลองสวนหมาก โดยใช้เครื่องมือ Climate Data Bias Corrector (CDBC) จากสถานีตรวจวัดภูมิอากาศที่มีผลต่อพื้นที่ลุ่มน้ำคลองสวนหมาก 2 สถานี แบ่งเป็น ช่วงสอบเทียบ (2001–2012) และ ช่วงทวนสอบ (1991–2000) เพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพของวิธีปรับแก้ดังกล่าว โดยสรุปผลการวิเคราะห์ในรูปแบบปริมาณฝนรายเดือน ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนางานวิจัยไปสู่การฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของพื้นที่การศึกษาต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่การศึกษา

ลุ่มน้ำคลองสวนหมาก เป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปิง มีขนาดพื้นที่ 1,213.43 ตร.กม. อยู่ทางด้านตะวันตกของแม่น้ำปิง ไหลไปรวมกับแม่น้ำปิงที่ตำบลนครชุม อำเภอเมืองกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร ซึ่งอยู่ในกริด 15.3484N 94.4375E ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM5 แสดงดัง Fig. 1

สถานีตรวจวัดภูมิอากาศและข้อมูลปริมาณฝน

สำหรับข้อมูลปริมาณฝนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จากการพิจารณาสถานีตรวจวัดภูมิอากาศที่มีอิทธิพลต่อพื้นที่ลุ่มน้ำคลองสวนหมากโดยการสร้าง Thiessen Polygon ร่วมกับการพิจารณาความสมบูรณ์ของข้อมูลปริมาณฝน พบว่า มีสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 2 สถานี ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยากำแพงเพชรและสถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผาง แสดงดัง Fig. 1 ซึ่งเป็นข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1991–2012 โดยแบ่งเป็นช่วงสอบเทียบ (ค.ศ. 2001–2012) และ ทวนสอบ (ค.ศ. 1991–2000) ตามลำดับ ระหว่างข้อมูลฝนตรวจวัดกับข้อมูลฝนจากแบบจำลอง CanESM5

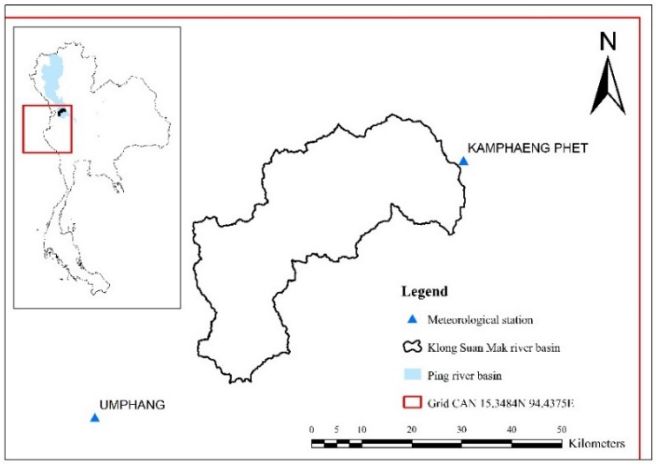


Fig. 1 Klong Suan Mak river basin

การปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลด้วยวิธี Quantile Mapping

วิธีปรับแก้ความเอนเอียงแบบ Quantile Mapping เป็นวิธีการปรับแก้ในเชิงความถี่และปริมาณ โดยทำการสร้างกราฟแจกแจงความถี่แบบแกมมา (Gamma distribution) ของข้อมูลปริมาณฝน (เมื่อค่าน้ำฝนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 mm) ของข้อมูลจากสถานีตรวจวัด (Observed) และข้อมูลจากแบบจำลอง (GCM) ในช่วงเวลาอดีต ซึ่งมีช่วงเวลาเดียวกัน (วรชัย, 2560) แสดงดัง Equation 1 จากนั้นทำการสร้างโค้งความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Distribution Function, CDF) และประมาณค่าพารามิเตอร์ของ CDF ของ Equation 2 ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด และค่าพารามิเตอร์ของ CDF ของข้อมูลในอดีตจากแบบจำลอง GCM

สมการแจกแจงความถี่แบบแกมมา (Probability Distribution Function : PDF)

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^{\alpha}} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

สมการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม (Cumulative Distribution Function : CDF)

$$F(X) = \int f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^{\alpha}} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (2)$$

จากนั้นทำการสร้างความสัมพันธ์ของโค้งความน่าจะเป็นแบบสะสมของข้อมูลจากแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัดดัง Equation 3 เพื่อใช้ค่าปรับแก้หรือเรียกว่า Transfer function ในการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากแบบจำลองดัง Equation 4

$$F_{GCM}(x_{model}) = F_{obs}(x_{obs}) \quad (3)$$

$$x'_{model} = x'_{model-bias} = F^{-1}_{GCM}(x_{obs}) \quad (4)$$

โดยที่ $x'_{model} = x'_{model-bias}$ ค่าปริมาณฝนรายวันจากแบบจำลองที่ปรับแก้

x_{obs} = ข้อมูลฝนรายวันจากสถานีตรวจวัด

x_{model} = ข้อมูลฝนรายวันจากแบบจำลองช่วงเวลาในอดีตซึ่งเป็นเวลาเดียวกันกับข้อมูลตรวจวัด

เมื่อได้แฟคเตอร์ปรับแก้ หรือ Transfer function (F^{-1}_{GCM}) ดังสมการที่ 4 แฟคเตอร์ปรับแก้ดังกล่าว จะได้นำไปปรับแก้ข้อมูลฝนรายวันจากแบบจำลองช่วงเวลาในอดีตและทำการตรวจสอบความถูกต้องหลังปรับแก้ จากนั้นเมื่อผลการตรวจสอบความถูกต้องดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงนำแฟคเตอร์ปรับแก้ดังกล่าวไปปรับแก้ความคลาดเคลื่อนข้อมูลฝนในช่วงเวลาอนาคตต่อไป

จากทฤษฎีการปรับแก้ความเอนเอียงแบบ Quantile Mapping แสดงรูปแบบของกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม (Cumulative Distribution Function : CDF) ดัง Fig. 2 โดยมีหลักการ คือ ต้องการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลจากแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัด โดยอาศัยทฤษฎีและกระบวนการปรับแก้ตามรายละเอียดของหลักการที่ได้อธิบายไปข้างต้น

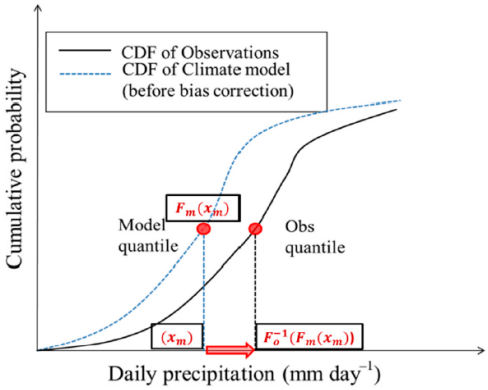


Fig. 2 The quantile mapping bias correction (Kim et al., 2019)

การตรวจสอบความแม่นยำ

การตรวจสอบความแม่นยำของผลการสอบเทียบ (Calibration) และทวนสอบ (Validation) เพื่อแสดงประสิทธิภาพจากการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลจากแบบจำลอง ประกอบด้วย

1) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เป็นดัชนีที่แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Liner Regression) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากเข้าใกล้ 0 คือ ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์ตามกันน้อย แต่ถ้าเข้าใกล้ 1 คือ ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์ตามกันมากดัง Equation 5

$$R^2 = \left(\frac{COV\ (O,M)}{\sqrt{VAR\ (O)VAR\ (M)}}\right)^2 \quad (5)$$

เมื่อ R^2 คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

M คือ ค่าจากแบบจำลอง

O คือ ค่าจากการตรวจวัด

$COV(O,M)$ คือ ความแปรปรวนระหว่างค่าตรวจวัดกับแบบจำลอง

$VAR\ (O)$ คือ ความแปรปรวนของข้อมูลตรวจวัด

$VAR\ (M)$ คือ ความแปรปรวนของข้อมูลแบบจำลอง

2) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error; RMSE) เป็นดัชนีแสดงความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากการคำนวณกับข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้ แสดงดัง Equation 6

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(M_i - O_i)^2} \quad (6)$$

เมื่อ $RMSE$ คือ รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง

n คือ จำนวนของข้อมูล

i คือ ลำดับของข้อมูล

ส่วนตัวแปรอื่น ๆ ใน Equation 6 มีความหมายเช่นเดียวกับคำอธิบายตัวแปรของ Equation 5

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการปรับแก้ข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากแบบจำลอง CanESM5 แล้วสรุปผลในรูปแบบปริมาณฝนรายปี โดยที่มีปริมาณฝนตรวจวัดรายปีเฉลี่ย 1,420 มม./ปี เมื่อเทียบกับแบบจำลองก่อนการปรับแก้มีปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย 2,366 มม./ปี หลังจากการปรับแก้มีปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย 1,592 มม./ปี แสดงให้เห็นว่าหลังการปรับแก้ความเอนเอียงด้วยวิธี Quantile Mapping ทำให้ปริมาณฝนจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณฝนตรวจวัดมากขึ้น โดยที่ความแตกต่างระหว่างปริมาณฝนรายปีตรวจวัดกับแบบจำลองลดลงจาก 946 มม. เหลือเพียง 172 มม. โดยผลการปรับแก้ในช่วงสอบเทียบแสดงดัง Fig. 3 และ Fig. 4 ในช่วงทวนสอบแสดงดัง Fig. 5 และ Fig. 6 อีกทั้งทำให้รูปแบบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนในเดือนต่าง ๆ มีความสอดคล้องกันมากขึ้นในช่วงสอบเทียบ แสดงดัง Fig. 7 และช่วงทวนสอบแสดงดัง Fig. 8 พร้อมแสดงแผนภาพการกระจายตัว (Scatter plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณฝนตรวจวัดและปริมาณฝนจากแบบจำลองก่อนและหลังการปรับแก้ในช่วงสอบเทียบ แสดงดัง Fig. 9 และ Fig. 10 ในช่วงทวนสอบแสดงดัง Fig. 11 และ Fig. 12 นั้นมีความสัมพันธ์ของข้อมูลมากขึ้น

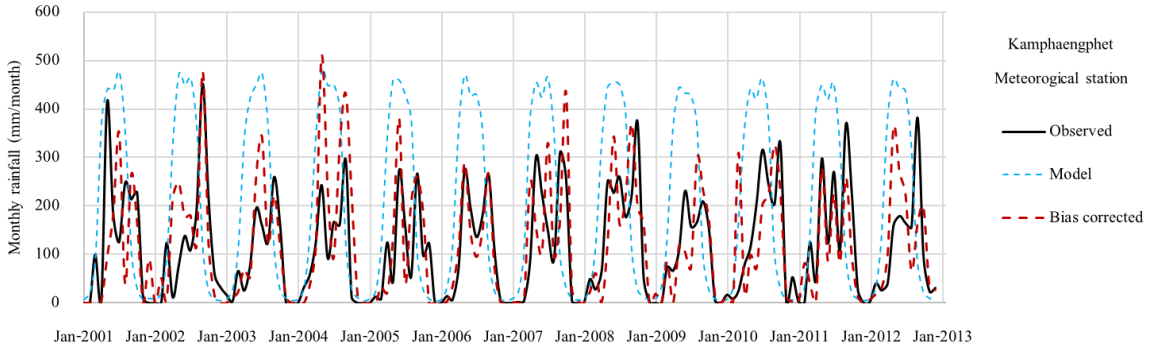


Fig. 3 Monthly rainfall of calibration at Kamphaengphet Meteorological Station

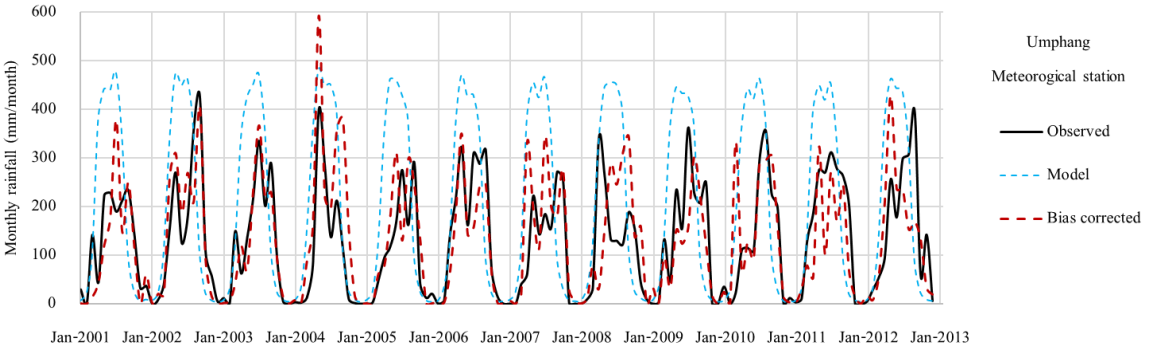


Fig. 4 Monthly rainfall of calibration at Umphang Meteorological Station

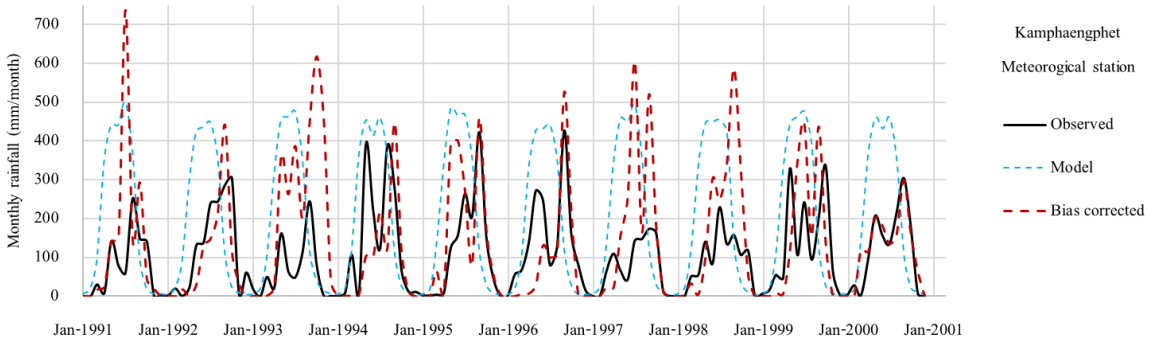


Fig. 5 Monthly rainfall of validation at Kamphaengphet Meteorological Station

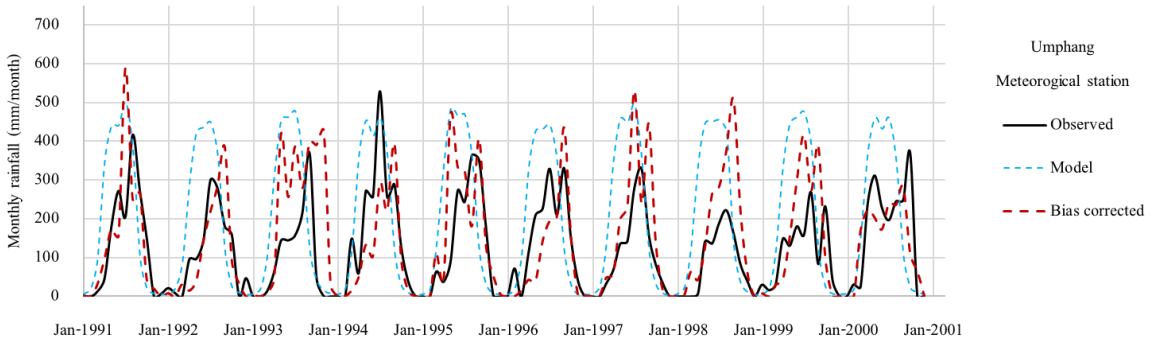


Fig. 6 Monthly rainfall of validation at Umphang Meteorological Station

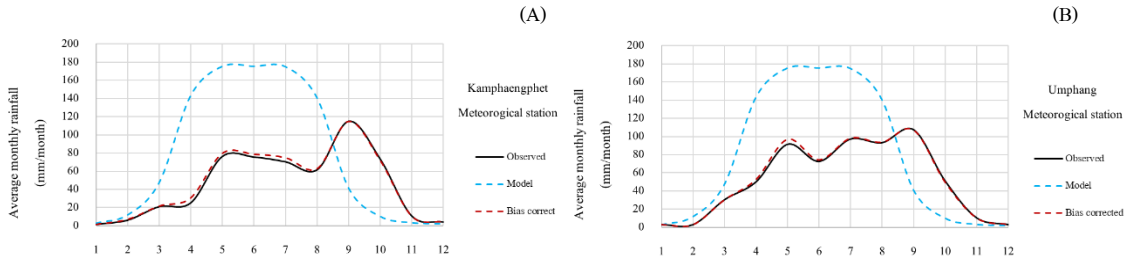


Fig. 7 Average monthly rainfall of calibration at Kamphaengphet (A) and Umphang Meteorological Station (B)

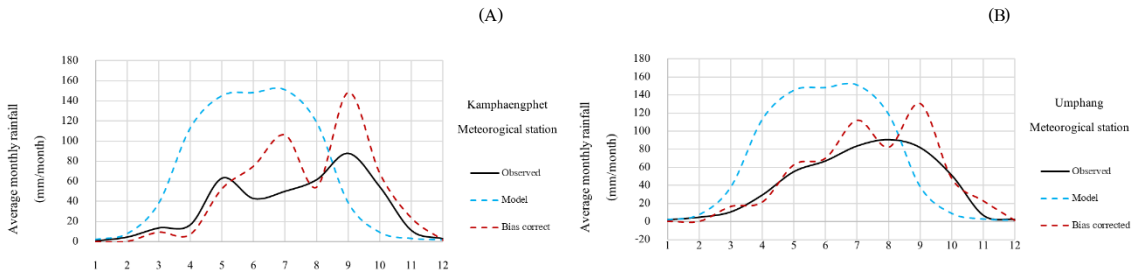


Fig. 8 Average monthly rainfall of validation at Kamphaengphet (A) and Umphang Meteorological Station (B)

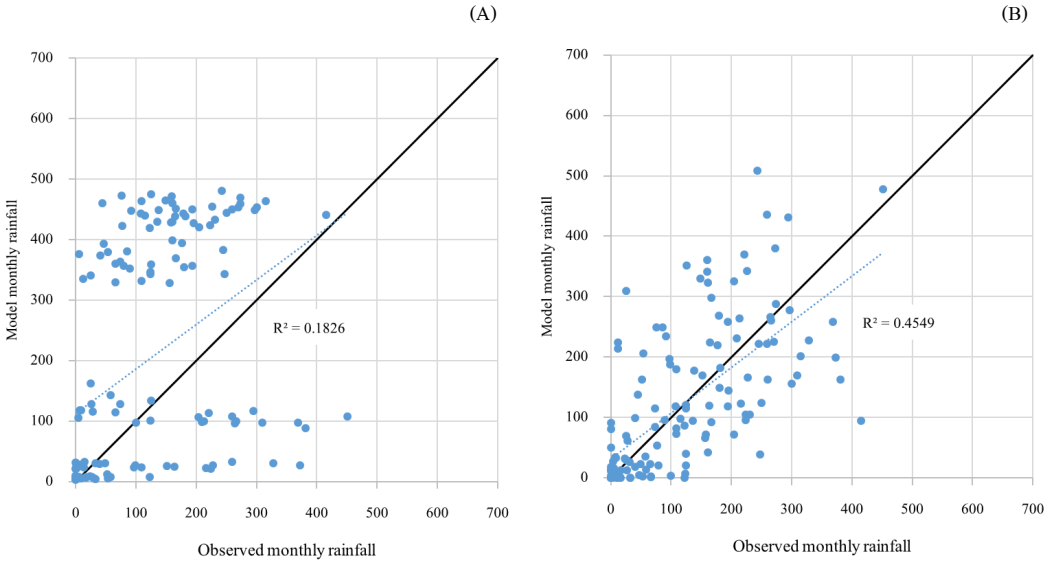


Fig. 9 Scatter plot before (A) and after (B) bias of calibration at Kamphaengphet Meteorological Station

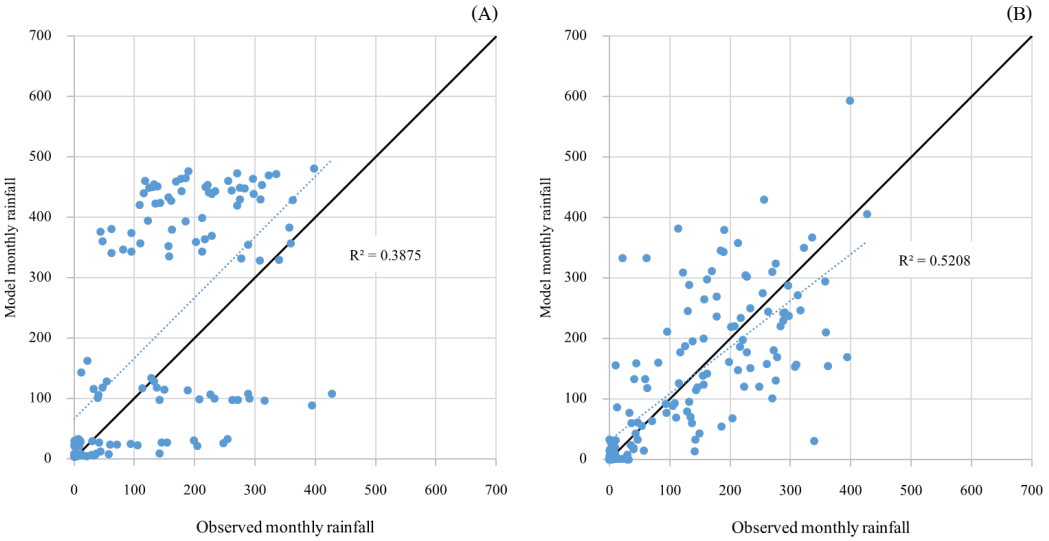


Fig. 10 Scatter plot before (A) and after (B) bias of calibration at Umphang Meteorological Station

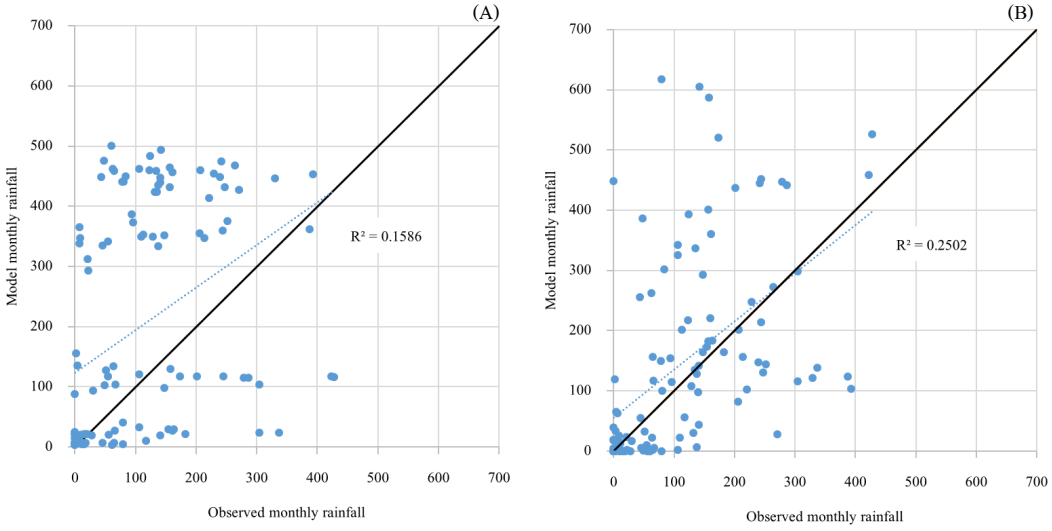


Fig. 11 Scatter plot before (A) and after (B) bias of validation at Kamphaengphet Meteorological Station

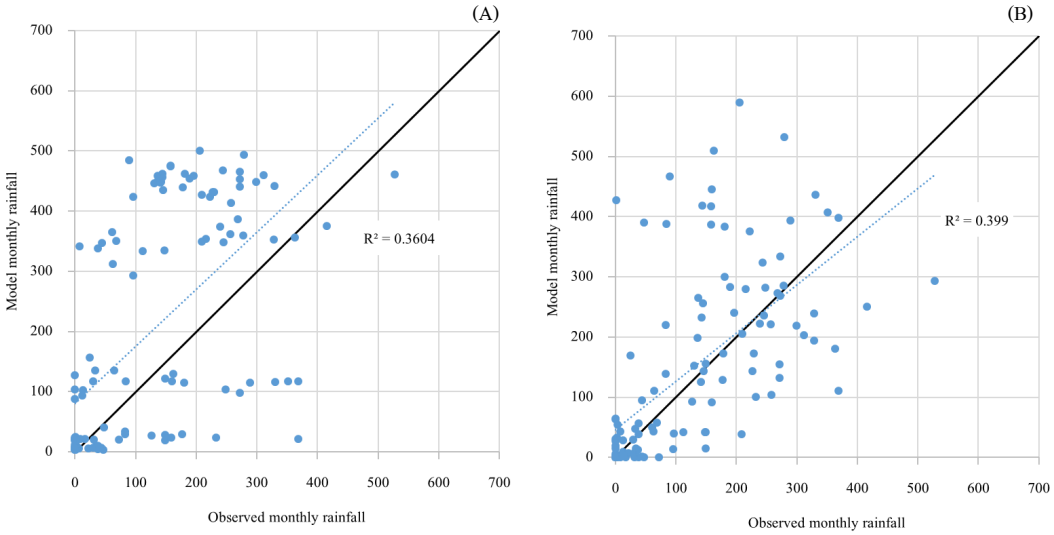


Fig. 12 Scatter plot before (A) and after (B) bias of validation at Umphang Meteorological Station

จากการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) พบว่า ที่สถานีอุตุนิยมวิทยากำแพงเพชรในช่วงสอบเทียบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.183 และ 0.455 ตามลำดับ ในช่วงทวนสอบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.159 และ 0.250 ตามลำดับ และที่สถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผางในช่วงสอบเทียบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.387 และ 0.521 ตามลำดับ ในช่วงทวนสอบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.360 และ 0.399 ตามลำดับ โดยค่า R^2 ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มากขึ้น แสดงดัง Table 1

จากการตรวจสอบค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error; RMSE) พบว่าที่สถานีอุตุนิยมวิทยากำแพงเพชรในช่วงสอบเทียบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า RMSE เท่ากับ 191.604 และ 94.458 ตามลำดับ ในช่วงทวนสอบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า RMSE เท่ากับ 199.396 และ 153.270 ตามลำดับ และที่สถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผางในช่วงสอบเทียบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า RMSE เท่ากับ 162.028 และ 90.409 ตามลำดับ ในช่วงทวนสอบ ก่อนและหลังการปรับแก้มีค่า RMSE เท่ากับ 168.963 และ 122.461 ตามลำดับ โดยค่า RMSE ที่ลดลง แสดงถึงความคลาดเคลื่อนที่ลดลง แสดงดัง Table 2

Table 1 The result of calibration and validation

Station	Calibration				Validation			
	Before		After		Before		After	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Kamphaengphet	0.183	191.604	0.455	94.458	0.159	199.396	0.250	153.270
Umphang	0.387	162.028	0.521	90.409	0.360	168.963	0.399	122.461

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM5 ภายใต้นิยามของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC) ตามเงื่อนไขรายงานการประเมินครั้งที่ 6 (AR6) ด้วยวิธี Quantile Mapping ในพื้นที่การศึกษาลุ่มน้ำคลองสวนหมาก ซึ่งดำเนินการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลอง พบว่า ปริมาณฝนจากแบบจำลองหลังการปรับแก้ความเอนเอียงมีความสอดคล้องกับปริมาณฝนตรวจวัดมากยิ่งขึ้น สังเกตได้จากความแตกต่างระหว่างปริมาณฝนรายปีตรวจวัดกับแบบจำลองที่ลดลงจาก 946 มม. เหลือ 172 มม. อีกทั้งรูปแบบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในเดือนต่าง ๆ มีความสอดคล้องกันมากยิ่งขึ้น แผนภาพการกระจายตัวของปริมาณฝนตรวจวัดและฝนจากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันมากขึ้น รวมถึงการตรวจสอบค่าความแม่นยำทางสถิติ โดยค่า R^2 ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มากขึ้น และค่า RMSE ที่ลดลง แสดงถึงความคลาดเคลื่อนที่ลดลง เป็นการยืนยันว่าปริมาณฝนหลังการปรับแก้มีความแม่นยำมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการปรับแก้ความเอนเอียงด้วยวิธี Quantile Mapping เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้ปรับแก้ความเอนเอียงของค่าปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกสำหรับพื้นที่การศึกษา

สำหรับผลการศึกษาของงานวิจัยได้ตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยอย่างครบถ้วนในการศึกษาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการปรับแก้ความเอนเอียงของปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกด้วยวิธี Quantile Mapping ซึ่งแสดงผลของประสิทธิภาพทั้งในรูปแบบของความสอดคล้องกันในเชิงปริมาณและรูปแบบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง รวมถึงประสิทธิภาพจากการประเมินด้วยดัชนีทางสถิติ ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดในการฉายภาพอนาคตของปริมาณฝนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตสำหรับพื้นที่การศึกษาหรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่น ๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยที่ช่วยให้คำแนะนำและแนวทางการวิจัยจนงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ทุกประการ ตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานที่ให้ความรู้พื้นฐานที่ดีที่นำไปสู่การต่อยอดในการวิจัยครั้งนี้ และบิดา มารดา รวมถึงครอบครัวและเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

เกศวรา สิทธิโชค, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร์, นิธิรัชต์ สงวนเดือน, ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์. 2561. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

พัลลภ สุวรรณมาลัย, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร์, เกศวรา สิทธิโชค. 2562. การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลสภาพภูมิอากาศท้องถิ่นที่มีอิทธิพลต่อความต้องการน้ำของพืชในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ. 20: 1–7.

พลเพชร สมานมิตร, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร์, เกศวรา สิทธิโชค, บัญชา ขวัญยืน. 2563. การลดมาตราส่วนทางสถิติสำหรับฝนรายเดือนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก. การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา. 362–369.

วรชัย วิจิตต์โภคิน. 2560. การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนปริมาณน้ำฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศด้วยวิธี Quantile Mapping สำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

Bonsal, B.R., Prowse, T. D. 2005. Regional Assessment of GCM-Simulated Current Climate over Northern Canada. The Arctic Institute of North America. 59: 115–128.

Gebremedhin, M.A., Abraha, A.Z., Fenta, A.A. 2018. Changes in future climate indices using Statistical Downscaling Model in the upper Baro basin of Ethiopia. Theor. Appl. Climatol. 133: 39–46.

Gupta, R., Bhattarai, R., Mishra, A. 2019. Development of Climate Data Bias Corrector (CDBC) Tool and Its Application over the Agro-Ecological Zones of India. Water 2019. 11: 1102.

IPCC. 2021. The IPCC and the Sixth Assessment cycle. https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6, 15 February 2021

Huang, Y.F., Ang, J.T., Tionga, Y.J., Mirzaei, M., Mat, M.Z. 2016. Drought Forecasting using SPI and EDI under RCP-8.5 Climate Change Scenarios for Langat River Basin, Malaysia. Procedia Eng. 154: 710–717.

Kim, B.K., Kwon, H.H., Han, D. 2019. Precipitation ensembles conforming to natural variations derived from a regional climate model using a new bias correction scheme. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20: 2019–2034.

Thawirat. P. 1997. Research methods in behavioral and social sciences. Bangkok: Educational and Psychological Test Bureau. Srinakharinwirot University.

Phuong, D.N.D., Duong, T.Q., Liem, N.D., Tram, V.N.Q., Cuong, D.K., Loi N.K. 2020. Projections of future climate change in the Vu Gia Thu Bon River Basin, Vietnam by Using Statistical Downscaling Model (SDSM). Water 2020. 12: 755.

การจับความรู้ฝังลึกของบริษัทรับเหมาก่อสร้าง: กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างโรงพยาบาล

Tacit knowledge capture in construction organization: Case study of a hospital construction project

ชลกร ชลสิทธิ์*, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์

Chonlakorn Chonlasit*, Piyanut Wethyavivorn

สาขาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Structural Technology for the Built Environment, Department of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: chonlakorn.c@ku.th

บทคัดย่อ

ความรู้ฝังลึกในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาและเสริมสร้างนวัตกรรมการดำเนินงาน การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจับความรู้ฝังลึกจากการดำเนินงานโครงการ เพื่อนำไปจัดเก็บให้สามารถนำไปใช้เพื่อให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้องค์กรอย่างยั่งยืน โดยทำการวิจัยเชิงปฏิบัติการในบริษัทรับเหมาก่อสร้างแห่งหนึ่ง เพื่อทดลองเก็บความรู้ฝังลึกที่ได้จากการดำเนินโครงการก่อสร้างโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง ตามกระบวนการจับความรู้ฝังลึกที่ได้พัฒนาขึ้น ทำการเก็บข้อมูลผ่านการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการ 4 ท่าน และผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับโครงการอีก 4 ท่าน พบว่าสามารถจับความรู้ในการนำเทคโนโลยีใหม่มาใช้และประสบความสำเร็จ และสามารถนำไปบรรจุในคู่มือการทำงาน และพบว่ากระบวนการริเริ่มโครงการมีขั้นตอนที่ไม่ครบถ้วน การขาดกระบวนการในการพัฒนาฝีมือแรงงาน รวมถึงขาดคู่มือในการตรวจสอบคุณภาพงานที่เป็นมาตรฐานขององค์กรอีกด้วย

คำสำคัญ: การจัดการองค์ความรู้, ความรู้ฝังลึก, บริษัทรับเหมาก่อสร้าง

Abstract

Tacit knowledge is critical to development and innovation of construction industry. The study intends to capture tacit knowledge gained from project operation and store in knowledge container so that it can be accumulated for continual development of the organization. Action research is conducted in a construction company to capture tacit knowledge from construction of a hospital project. The tacit knowledge capture process developed earlier is deployed. Interviews are conducted with 4 project officers together with other 4 officers who do not involve with the hospital project. It was found that new technologies used successfully in this project should be kept in Work Instruction manual. The study also reveals that project initiation process is not spelled out clearly in the company manual. The quality work inspection standard has not been developed to assist project staff. Moreover, the standardized training to develop workmanship among skilled labor has not been established to fulfil the continuity of the project.

Keywords: knowledge management, tacit knowledge, construction organization

คำนำ

ในปัจจุบันนั้นมีการก่อสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ทั้งโครงการก่อสร้างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ทำให้บริษัทต่างๆ มีการแข่งขันกันเพื่อจะให้มีโอกาสได้งานสูงขึ้นเช่นการลดราคา ลดระยะเวลา แต่ในขั้นตอนการก่อสร้างจริงนั้นพบว่าในหลายโครงการเกิดปัญหางบประมาณไม่เพียงพอ ทำงานล่าช้ากว่าแผนงาน และปัญหาอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งปัญหาเหล่านี้ก็จะถูกแก้ไขและจบไปในโครงนั้น เมื่อมีโครงการใหม่ปัญหาเหล่านี้ก็ยังกลับมาอีก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะสะสมองค์ความรู้ที่สะท้อนจากโครงการก่อสร้างที่ผ่านมา ผ่านประสบการณ์และความรู้จากกลุ่มคนที่มีความเกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้าง เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการในการดำเนินงาน และการสร้างองค์ความรู้ใหม่ให้มีประสิทธิภาพและทำให้บริษัทเหล่านี้นั้นมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นต่อไป โดยในที่นี้ทางผู้วิจัยได้อ้างอิงกระบวนการในการที่จะจัดการความรู้ฝังลึกในอุตสาหกรรมการก่อสร้างของ Wethyavivorn and Teerajetgul (2020) ดัง Fig 1. ซึ่งได้แสดงให้เห็นแล้วว่าในแต่ละขั้นตอนนั้นผลสรุปที่ได้รับนั้นจะประกอบไปด้วยอะไรบ้าง ดังนั้นจึงทำให้ทางผู้วิจัยเลือกขั้นตอนในการสะสมความรู้ มาปรับใช้ในงานวิจัยเพื่อที่จะสร้างองค์ความรู้ใหม่กับองค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ

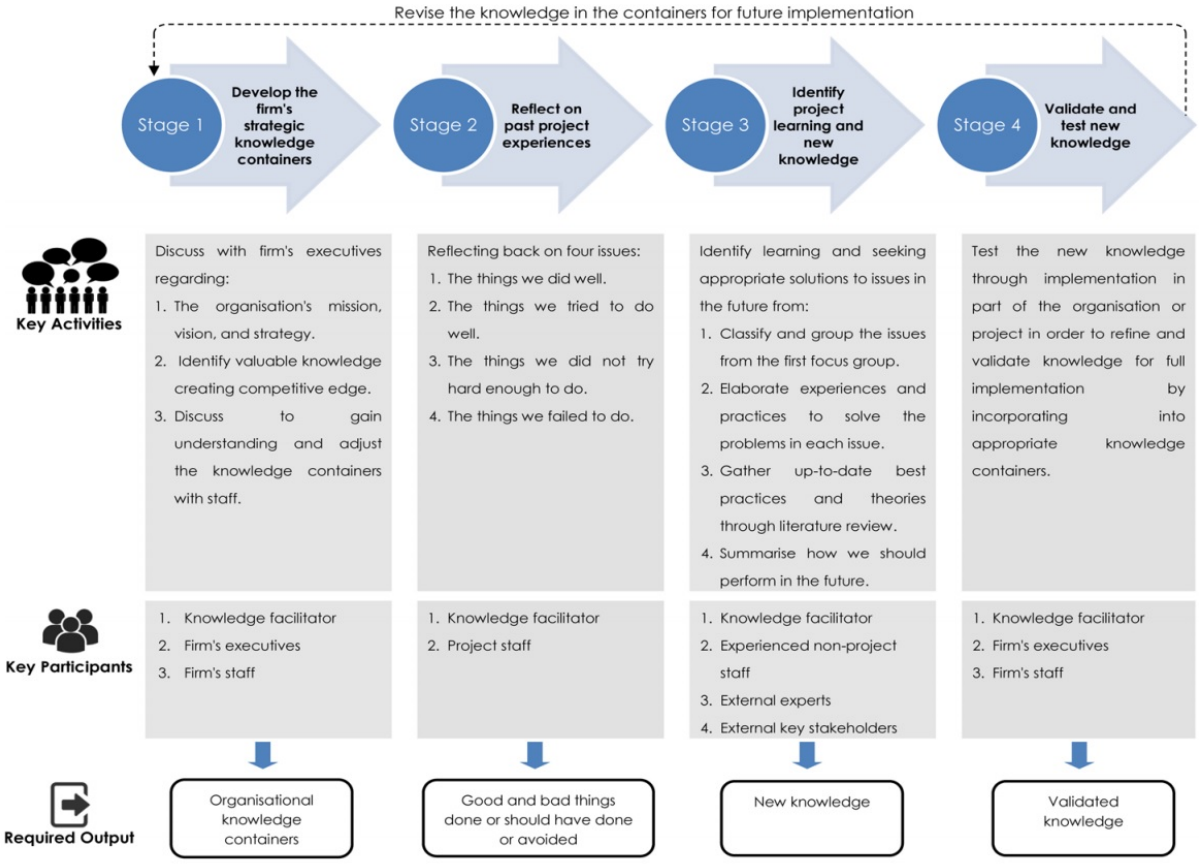


Fig 1. A Four-Stage Process Model of Effective Tacit Knowledge Capture in the Construction Industry

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

ในกระบวนการเก็บข้อมูลนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1.ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับองค์กร หน้าที่บุคคล องค์ความรู้ นโยบาย รวมถึงแนวทางในการควบคุมคุณภาพผลงาน เช่นคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction: WI), คำบรรยายลักษณะงาน (Job Description: JD)

2.ข้อมูลจากโครงการก่อสร้าง โดยในที่นี้ทางผู้วิจัยได้ศึกษาโครงการโรงพยาบาลอินทรารัตน์ ซึ่งมีงบประมาณการก่อสร้าง 560 ล้านบาท และมีพื้นที่ก่อสร้าง 34,393 ตารางเมตร โดยปัจจุบันโครงการนี้ก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยในที่นี้วิเคราะห์จากเอกสารที่มีความเกี่ยวข้องกับงบประมาณและระยะเวลาของโครงการ เช่น แผนงานก่อสร้าง (S-CURVE), งบประมาณโครงการ

3.ข้อมูลส่วนของการสัมภาษณ์ จะแบ่งกลุ่มผู้ที่สัมภาษณ์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มคนใน และกลุ่มคนนอก โดยกลุ่มคนในคือผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการโดยตรง และกลุ่มคนนอกคือผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในทางอ้อมของโครงการ จากนั้นนำคำตอบทั้งหมดมาสังเคราะห์ความรู้ที่ได้ เพื่อไปยืนยันต่อกลุ่มผู้เชี่ยวชาญถึงการสร้างเป็นองค์ความรู้ใหม่ โดยคำถามที่ใช้ในการสัมภาษณ์จะประกอบไปด้วย 4 คำถามดัง Table 1.

Table 1 Questions to ask interview groups

No.	Questions
1	What did we do best so that the project could save time, cost or increase in quality or efficiently satisfied the client's needs?
2	What did we already try our best but the result was not as good as we expected?
3	What did not we try our best and that we should have done better to prevent a loss incurred by the project stakeholders or the loss could have been reduced ?
4	What had we done badly that resulted in a loss both to the project and our firm?

กระบวนการวิจัย

การดำเนินการวิจัย แบ่งเป็นลำดับขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1. ค้นคว้า และศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎี และแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง

2. กำหนดกลุ่มตัวอย่างที่จะทำการศึกษา ทั้งกลุ่มโครงการตัวอย่าง และกลุ่มประชากรที่สัมภาษณ์

3. เก็บข้อมูลจากองค์ความรู้ขององค์กร และจากโครงการก่อสร้างตัวอย่าง โดยรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อหาข้อควรปรับปรุง และเพื่อระบุถึงการเรียนรู้และความรู้ใหม่ที่ได้ นำไปสู่กับการปรับปรุงองค์ความรู้เดิม

4. การสัมภาษณ์ เพื่อระบุถึงความรู้ที่ได้ในโครงการก่อสร้างและแนวทางการปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น โดยสัมภาษณ์กลุ่มคนที่คัดเลือกไว้และถามตามคำถามที่กำหนดไว้

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการสัมภาษณ์ โดยสังเคราะห์ความรู้ที่ได้จากโครงการก่อสร้าง เพื่อจัดทำองค์ความรู้ใหม่หรือปรับปรุงองค์ความรู้เดิม โดยจะนำองค์ความรู้นี้ไปเสนอต่อผู้เชี่ยวชาญเพื่อประเมินถึงความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง

6. บรรจุเป็นองค์ความรู้ใหม่ เพื่อให้เกิดการพัฒนาองค์กรอย่างยั่งยืน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิจัยพบว่าในการเก็บข้อมูลจากองค์ความรู้ขององค์กรนั้นยังมีองค์ความรู้ในหลายหมวดที่ยังไม่ชัดเจนและไม่ครอบคลุมคือส่วนของงานบริการ โดยแบ่งเป็นส่วนของสำนักงาน และโครงการก่อสร้าง ซึ่งประกอบไปด้วยคู่มือการทำงาน แผนควบคุมคุณภาพ ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ ดัง Fig 2. และจากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากโครงการก่อสร้างโครงการโรงพยาบาลอินทรารัตน์ ซึ่งได้วิเคราะห์งบประมาณและระยะเวลาในการก่อสร้าง ถึงสาเหตุการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงดัง Fig 3.ได้ข้อสรุปว่ามีการขอเพิ่มงบประมาณมากที่สุดในหมวดงานเตรียมการ, งานซ่อมแซม, งานโครงสร้าง ตามลำดับ โดยมีสาเหตุในการของบประมาณมากจากการ ประมาณการไว้ไม่เพียงพอ, ไม่ได้ประมาณการไว้, คิดปริมาณตกตามลำดับ และสาเหตุที่มีผลต่อความล่าช้ามากที่สุดนั้นคือการเพิ่มงานเพิ่ม-ลด และหลังจากนั้นทางผู้วิจัยได้ทำการสัมภาษณ์กับทางผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการคือกลุ่มคนในและกลุ่มคนนอก ดัง Table 3. ตามคำถามที่ได้เตรียมไว้ 4 ข้อ ซึ่งจากการสัมภาษณ์นั้นได้รับรู้ถึงความรู้และแนวทางการปรับปรุง เพื่อที่จะนำไปปรับในองค์ความรู้ดัง Table 2. หลังจากนั้นนำความรู้ที่ได้นี้ไปเสนอต่อกลุ่มผู้เชี่ยวชาญซึ่งประกอบด้วย 1. กรรมการผู้บริหาร 2. ผู้อำนวยการโครงการ 3. ผู้จัดการฝ่ายควบคุมต้นทุน 4. ผู้จัดการฝ่ายประมาณราคา เพื่อปรับองค์ความรู้เดิม และสร้างองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งได้ข้อสรุปจากทางผู้เชี่ยวชาญดังนี้ 1. การนำนวัตกรรมและความรู้ทางเทคนิคในการก่อสร้างมาจัดทำเป็นคู่มือการปฏิบัติงานโดยปรับปรุงความรู้ด้านการคู่มือการปฏิบัติงาน (WI) 2. ให้ฝ่ายฝึกอบรมจัดฝึกอบรมฝีมือแรงงานเพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพ และให้ฝ่ายก่อสร้างจัดทำคู่มือการควบคุมและตรวจสอบขั้นตอนการทำงานในแต่ละงาน (PQP) 3. ให้ฝ่ายก่อสร้าง , ฝ่ายประเมินราคา , ฝ่ายควบคุมต้นทุน ร่วมกันจัดทำคู่มือสำหรับการตรวจสอบก่อนเริ่มการก่อสร้าง และระหว่างงานก่อสร้าง โดยให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอนจะต้องลงนามตรวจสอบ โดยปรับปรุงกระบวนการทำงาน (Work Flow) 4.ปรับปรุงดัชนีชี้วัดความสำเร็จ (KPI) โดยให้กำหนดเกณฑ์ที่เป็นค่าชี้วัดเพื่อให้ทางโครงการทำให้ได้ตามเกณฑ์และจะต้องรายงานในทุกๆ เดือน โดยเพิ่มดัชนีการชี้วัดดังนี้

1. สามารถควบคุมงานก่อสร้างทั้งหมดให้แล้วเสร็จพร้อมส่งมอบลูกค้าก่อนหมดสัญญา 5 %
2. สามารถควบคุมงบประมาณงานก่อสร้างทั้งหมด โดยยังคงต้องมีกำไรมากกว่า 5%
3. สามารถควบคุมข้อบกพร่องจากการก่อสร้างได้ โดยไม่เกิน 0.5% ของมูลค่างานก่อสร้าง

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้จัดทำคู่มือตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ และทางผู้เชี่ยวชาญยังได้แนะนำว่าเมื่อความรู้ใหม่ได้รับการทดสอบตรวจสอบและสะสมไว้ในองค์ความรู้ บริษัทควรใช้ความพยายามอย่างมากในการระบุความรู้เชิงกลยุทธ์และความสามารถที่จำเป็น ในการสร้างคลังความรู้ให้พนักงานทุกคนเข้าใจอย่างชัดเจน ขั้นตอนเหล่านี้ควรดำเนินการในตอนท้ายของโครงการเพื่อให้มีเวลาเพียงพอสำหรับการสะท้อนความรู้ที่ได้รับในระหว่างการดำเนินโครงการ ซึ่งสอดคล้องกับ Wethyavivorn and Teerajetgul (2020)

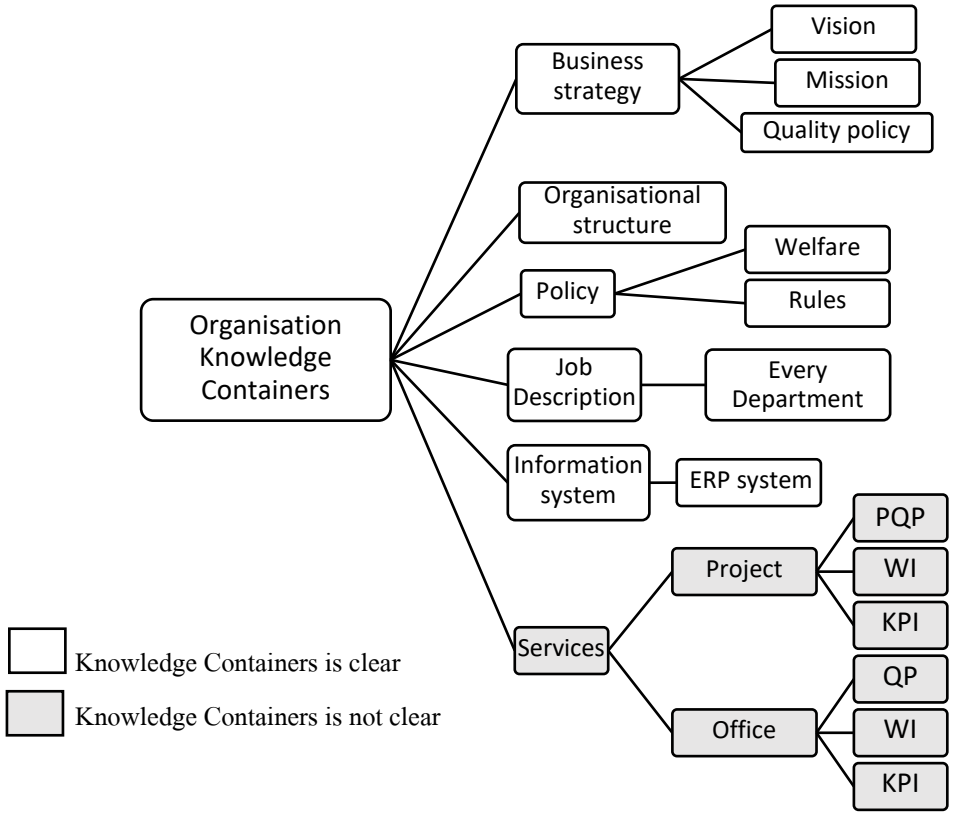


Fig. 2 Preliminary Structure Organisational Knowledge Containers

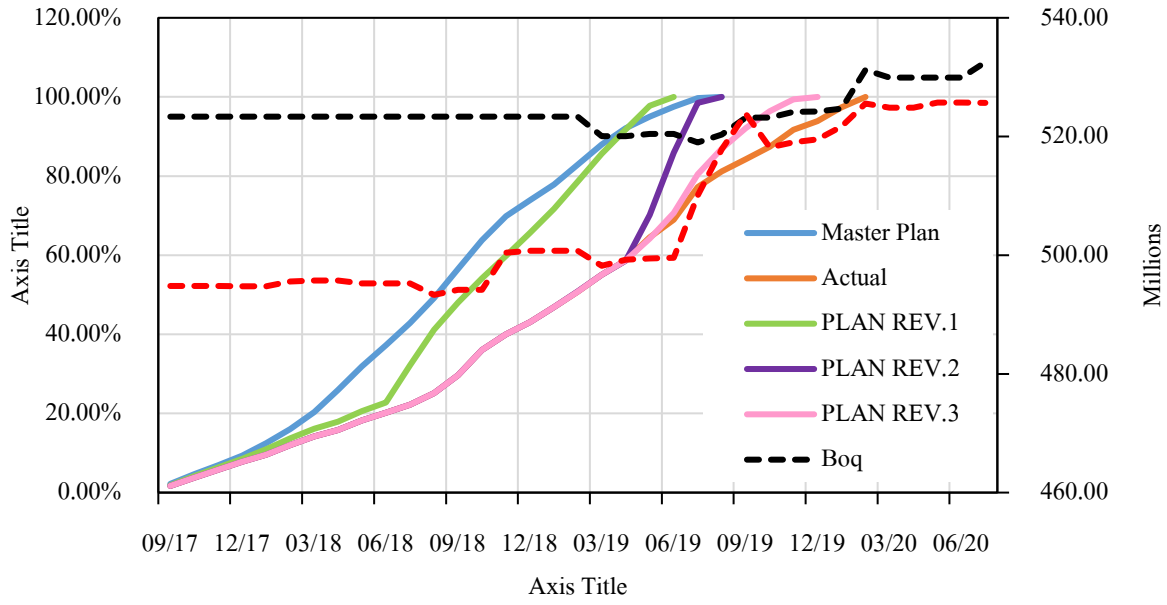


Fig. 3 Comparison chart between budget and duration in INTRARAT HOSPITAL project

Table 2 Interview results in INTRARAT HOSPITAL project

First Focus Group: Internal Project Team		Second Focus Group: External Experts	
Issues Identified	Resulting in	Issues Clarified	Embed in Container
What did we do best so that the project could save time, cost or increase in quality or efficiently satisfied the client's needs?			
Use a Coupler instead of a steel splicing	Able to reduce the budget by five million and reduce the time about one month	Technical knowledge and project experience.	Add this knowledge to the work Instruction manual (WI)
Using ready-made lintels Instead of pouring concrete	Able to reduce the budget by one million and reduce the time about half of month	Technical knowledge and project experience.	Add this knowledge to the work Instruction manual (WI)
What did we already try our best but the result was not as good as we expected?			
Lack of detailed quantity estimation	Budget increases and schedule delays	There is a rush to start construction causing the lack of costs and verification with those involved	Increase work processes in workflow manual and add checklist to do and must verify by related people
What did not we try our best and that we should have done better to prevent a loss incurred by the project stakeholders or the loss could have been reduced?			
The control of labor work has also been found to be impaired. Due to the lack of quality workmanship	Cause work defect and delays	Labor is constantly changing and lack of work training	Add training into job description to send labor to train required skills. The skill training should be standardized.
What had we done badly that resulted in a loss both to the project and our firm?			
Lack of proper work quality control	Lead to unqualified work that need to be corrected which increases the budget	Use experience in reviewing works	Add work manual and inspection manual.

Table 3 Interviewer groups in INTRARAT HOSPITAL project

NO.	Internal Project Team		External Experts	
	Position	Experience (Year)	Position	Experience (Year)
1	Office Engineer	4	Estimator	5
2	Site Engineer	2	Cost Engineer Manager	20
3	Project Engineer	8	Cost Engineer	5
4	Project Manager	16	Project Manager (Other project)	16

สรุป

งานวิจัยนี้เพื่อรวบรวมความรู้และระบุการเรียนรู้ที่ได้รับจากการดำเนินการก่อสร้างในโครงการขนาดใหญ่ เพื่อนำไปสู่การสร้างเป็นองค์ความรู้ใหม่ และพัฒนาประสิทธิภาพองค์กรอย่างยั่งยืน ซึ่งได้ข้อสรุปว่าในองค์กรที่ได้ศึกษานั้นมีองค์ความรู้ที่ยังไม่ได้ชัดเจนหรือยังไม่มีเลยในส่วนของการบริหารโครงการก่อสร้างและสำนักงาน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเก็บข้อมูลจากโครงการก่อสร้างถึงความรู้และประสบการณ์ที่ได้ซึ่งพบว่าสิ่งที่ได้คือ 1.โครงการมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ วิธีการก่อสร้าง ส่งผลต่อความล่าช้า และงบประมาณ 2.ความล่าช้าของโครงการ จากงานเพิ่มส่งผลต่องบประมาณของโครงการ 3.โครงการมีการประมาณการงบไว้ไม่เพียงพอ และมีการคิดปริมาณตก หรือ ราคาเปลี่ยน 4. พบ Defect ที่เกิดจากการทำงาน ทำให้ต้องของบในการแก้ไข 5. ปัญหาความล่าช้าจากการจัดซื้อของเจ้าของงาน ทำให้เกิดความล่าช้าในแผนงาน และจากนั้นสัมภาษณ์กลุ่มประชากรที่ได้คัดเลือกสามารถจับความรู้เพิ่มเติมได้คือโครงการยังมีการนำนวัตกรรมและเทคนิคต่างๆมาใช้ด้วยเพื่อลดต้นทุน

ดังนั้นจึงนำความรู้ที่ได้ทั้งหมดพร้อมแนวทางการปรับปรุงเพื่อบรรจุในองค์ความรู้ขององค์กรเสนอต่อกลุ่มผู้เชี่ยวชาญจึงได้แนวทางการปรับปรุงคือ 1. เสนอนวัตกรรมและเทคนิคไว้ในองค์ความรู้ของฝ่ายก่อสร้าง และให้จัดทำคู่มือการปฏิบัติงานออกมาด้วย 2. ให้มีการจัดทำคู่มือกระบวนการในการทำงานก่อสร้างเพื่อรักษามาตรฐานให้เป็นแบบเดียวกันในทุกโครงการ 3. เพิ่มการฝึกอบรมฝีมือแรงงาน และได้เพิ่มคู่มือในการตรวจสอบงานก่อสร้างเพื่อลดปัญหาในด้านต้นทุนและเวลา 4. ปรับปรุงเกณฑ์ค่าชี้วัดประสิทธิภาพทั้งหมด 3 เกณฑ์ ทั้งหมดนี้จะกลับไปปรับปรุงองค์ความรู้ขององค์ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น พร้อมทั้งยังเน้นย้ำให้บริษัทควรใช้ความพยายามอย่างมากในการระบุความรู้และความสามารถที่จำเป็นในการสร้างองค์ความรู้ และให้พนักงานทุกคนเข้าใจอย่างชัดเจนและเข้าถึงได้ง่าย โดยกระบวนการเหล่านี้จะดำเนินการในตอนท้ายของโครงการเพื่อให้มีเวลาเพียงพอสำหรับการสะท้อนความรู้ที่ได้รับในระหว่างการดำเนินโครงการ สิ่งเหล่านี้จะเปลี่ยนการดำเนินงานในโครงการต่อๆ ไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยโพลีคอนส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูล และให้ความร่วมมืออย่างเต็มใจ จนสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

Alhomidan, A. 2013. Factors affecting cost overrun in road construction projects in Saudi Arabia. Int. J. Civ. Environ. Eng. 13: 1–4.

Argyris, C. Schon, D.A. 1987. Organizational Learning. A Theory of Action Perspective. Massachusetts, US: Addison-Wesley

Ali, A.S., Kamaruzzaman, S.N. 2010. Cost performance for building construction projects in Klang Valley. Journal of Building Performance 10: 110–118

Boyd, D., Egbu, C., Chinyio, E., Xiao, H., Lee, C. 2004. Audio diary and debriefing for knowledge management in SMEs. In: ARCOM Twentieth Annual Conference. Reading, UK: Association of Researchers in Construction Management (ARCOM).

Grant, K.A., Grant, C.T. 2008. Developing a model of next generation knowledge management. Issues in Informing Science and Information Technology 5: 571–590.

Lin, Y., Lee, H. 2012. Developing project communities of practice-based knowledge management system in construction. Autom. Constr. 22: 422–432. doi.org/10.1016/j.autcon.2011.10.004

Maki, O.L. 2017. Causes of Cost overrun in construction industry. Department of Civil and Architecture Engineering, Qatar University.

Niazi, G.A., Painting, N. 2017. Significant factors causing cost overruns in the construction industry in Afghanistan. Procedia Eng. 182: 510–517 doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.145

Nonaka, I., Toyama, R. Hirata, T. 2008. Managing Flow. New York: Palgrave Macmillan.

Maki, O.L. 2017. Causes of cost overrun in construction industry. Department of Civil and Architecture Engineering, Qatar University.

Tserng, H.P. Lin, Y.-C. 2004. Developing an activity-based knowledge management system for contractors. Automation in Construction. 13: 781–802. doi.org/10.1016/j.autcon.2004.05.003

Omotayo, T.S. 2017. Strategic realignment of the post-contract cost control process in the Nigerian construction Industry Using Kaizen. School of the Built Environment University of Salford, Manchester, UK

Wethyavivorn, P., Teerajetgul, W. 2020. Tacit knowledge capture in Thai design and consulting firms. Journal of Construction in Developing Countries, Pinang 25: 45–62. doi:10.21315/jcdc2020.25.1.3

Woo, J.-H., Clayton, M.J., Johnson, R.E. Flores, R.E. Ellis, C. 2004. Dynamic knowledge map: reusing experts' tacit knowledge in AEC industry. 13: 203–207. doi.org/10.1016/j.autcon.2003.09.003

ตัวชี้วัดเพื่อประเมินความสอดคล้องในการพัฒนาโครงการสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

Sufficiency economy indicators for built environment projects development in Thailand

นิชาภา จันต๊ะมา, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์*

Nichapa Chantama, Piyanut Wethyavivorn*

ภาควิชาวิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Construction Engineering and Management, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: nichapa.chant@ku.th; miu.nichapa@gmail.com

บทคัดย่อ

โครงสร้างพื้นฐานภาครัฐมีส่วนสำคัญยิ่งต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชน และยังเป็นโครงการที่ต้องใช้งบประมาณสูง การประยุกต์ใช้หลักของเศรษฐกิจพอเพียงในการพัฒนาโครงการก่อสร้างเหล่านี้ จึงน่าจะเป็นประโยชน์ต่อประเทศไทย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวชี้วัดเพื่อประเมินความสอดคล้องในการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง โดยศึกษาจากแนวทางการพัฒนาโครงการพระราชดำริ กระแสพระราชดำรัส หลักการทรงงาน หนังสือ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งยังได้ศึกษาเปรียบเทียบกับหลักการพัฒนาโครงการอย่างยั่งยืนจากงานวิจัยในต่างประเทศ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์อภิมาน และได้พัฒนาร่างของคำนิยามและตัวแปรทั้งหมด 45 ตัวแปร เพื่อใช้ประเมินความสอดคล้องกับทั้ง 5 มิติ ตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ประกอบด้วย ความพอประมาณ ความมีเหตุผล การมีภูมิคุ้มกัน ความรู้ และคุณธรรม และได้ทำการตรวจสอบความสอดคล้องเชิงเนื้อหาโดยการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้เชี่ยวชาญ 7 คน พบว่าผู้เชี่ยวชาญเห็นสอดคล้องกับตัวแปรเกือบทั้งหมด มีตัวแปรด้านความพอประมาณ และด้านคุณธรรมเท่านั้นที่ถูกปรับปรุงตามข้อเสนอแนะเพื่อให้มีความสอดคล้องมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: เศรษฐกิจพอเพียง, โครงการโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐ, การพัฒนาที่ยั่งยืน

Abstract

Public infrastructure project is vital to the living of the people. The project usually requires substantial amount of budget. The application of sufficiency economy philosophy to the development of the public infrastructure would be beneficial to Thailand. The study aims to develop sufficiency economy indicators to assess public infrastructure project development in Thailand. Extensive review of literatures related to Royal Initiated Projects, Royal Speech, King Bhumibol's working principles is conducted. Sustainable project development principles an indicator from other countries are also reviewed to compare with the philosophy of sufficiency economy using Meta-Analysis method. Preliminary set of 45 operational variables measuring 5 constructs: moderation, reasonableness, self-immunity, knowledge and moral is developed. The content validation is done through in-depth interviews with 7 experts. It was found that the experts agree with most of the variables except the moderation and the moral which have been revised as suggested.

Keyword: sufficiency economy, public infrastructure project, sustainable development

คำนำ

โครงสร้างพื้นฐานภาครัฐ (Public Infrastructure) หมายถึง ระบบสาธารณะที่อำนวยความสะดวกและรองรับสวัสดิการขั้นพื้นฐานของประชาชนด้านต่างๆ ซึ่งการพัฒนาระบบดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยงบประมาณสนับสนุนจากภาครัฐ หรืองบประมาณเฉพาะกิจใดๆ ที่จัดสรรมาเพื่อให้บริการแก่คุณภาพชีวิตของประชาชน ประกอบด้วยโครงสร้าง และสาธารณูปโภคเพื่อการให้บริการต่างๆ แก่สังคมของประเทศ เช่น ถนน สะพาน สนามบิน ท่าเรือ เขื่อน ฝาย โรงพยาบาล โรงเรียน สวนสาธารณะ เป็นต้น (Diugwu et al., 2015)

ในช่วงปี 2009–2018 มูลค่าการลงทุนก่อสร้างมีสัดส่วนเฉลี่ย 8.1% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (Gross Domestic Product: GDP) โดยส่วนใหญ่เป็นโครงการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานของภาครัฐ คิดเป็นสัดส่วนเกือบ 80% ของมูลค่าก่อสร้างงานภาครัฐทั้งหมด (NESDC, 2018. เว็บไซต์) และการพัฒนาในระดับประเทศเป็นการสร้างความสามารถในการแข่งขัน เพื่อเร่งให้ประเทศมีการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง และคำนึงถึงผลกำไรเป็นสำคัญ ประเทศต้องพัฒนาหลายเรื่องพร้อมกันเพื่อยกระดับการพัฒนาประเทศแบบก้าวกระโดด ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม (Yudelson, 2010) ดังเช่นตัวอย่างการเกิดวิกฤติเศรษฐกิจในปี 2540 และในปลายเดือนพฤศจิกายนปี 2540 พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช เป็นพระมหากษัตริย์ไทย รัชกาลที่ 9 ได้ทรงเมตตาพระราชทานแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงเพิ่มในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ซึ่งมีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อม โดยมีเป้าหมายระยะยาวที่ยั่งยืน (U.N. Thailand, 2549)

ปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงเป็นทั้งหลักคิดและหลักปฏิบัติที่เป็นประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของประชาชนทุกระดับ รวมทั้งภาครัฐและหน่วยงานต่าง ๆ ก็สามารถนำปรัชญานี้ไปประยุกต์และใช้ในการบริหารและพัฒนาประเทศด้านต่างๆได้อย่างกว้างขวาง (ทิศนา, 2558) ซึ่งได้ถูกน้อมนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินชีวิต และการทำงานทั้งในระดับบุคคล ชุมชน ธุรกิจขนาดกลาง ธุรกิจขนาดย่อม ธุรกิจขนาดใหญ่ และองค์กรภาครัฐ ในส่วนกลางและภูมิภาค ซึ่งประสบความสำเร็จและได้รับรางวัลการประกวดผลงานตามแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ร่วมจัดขึ้นโดยสำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และหน่วยงานต่างๆ เริ่มตั้งแต่ปี 2550 จนถึงปัจจุบัน (กปร, 2554) จึงเห็นความสำคัญที่จะนำแนวคิดปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างของภาครัฐ โดยวิจัยนี้จะพัฒนาตัวชี้วัดในการช่วยพัฒนาให้เกิดความยั่งยืนในระบบอุตสาหกรรมการก่อสร้างภาครัฐของไทย เพื่อช่วยขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศในอนาคตอย่างเป็นระบบที่สุดในแนวทางของเศรษฐกิจพอเพียง

อุปกรณ์และวิธีการ

ดัชนีตัวชี้วัด

กรอบของหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักและสองเงื่อนไขพื้นฐาน (วิจิตร, 2560) โดยองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ประกอบไปด้วย ความพอประมาณ ความมีเหตุผล และภูมิคุ้มกันในตัว ในส่วนของเงื่อนไขพื้นฐานที่จะทำให้บรรลุความพอเพียงได้แก่ ความรู้ และคุณธรรม ดัง Fig. 1

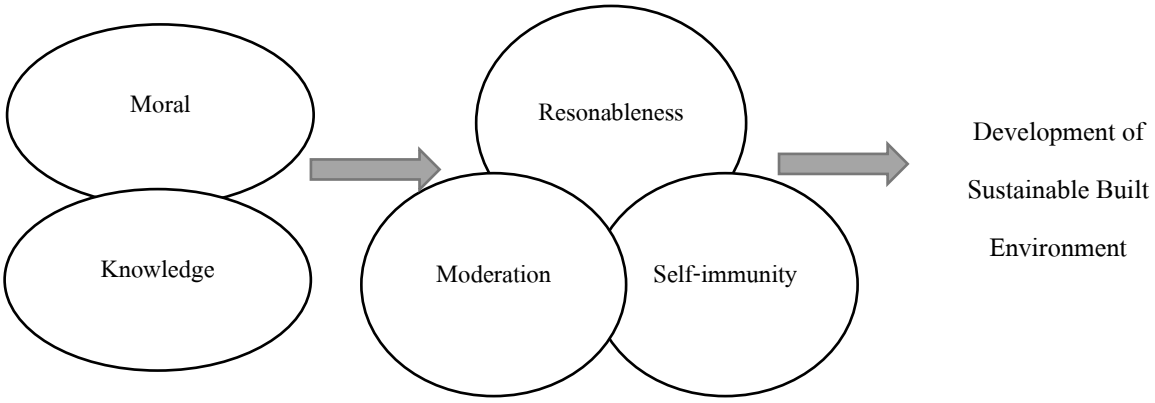


Fig. 1 The Sufficiency Economy Philosophy leads to the development of a built and sustainable environment (SDGs)

วิธีการ

งานวิจัยนี้ มีขั้นตอนวิธีการศึกษาการประยุกต์ใช้หลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงในโครงการโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐ เพื่อการพัฒนาเครื่องมือวัดความพอเพียงในรูปของแบบสอบถาม โดยรวบรวมข้อคำถาม และศึกษาการทรงงานในโครงการพระราชดำริที่ผ่านมา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงมาประยุกต์ใช้ พระบรมชาโชวาท โครงการภาครัฐ และเกณฑ์ปฏิบัติทั้งในประเทศ และต่างประเทศ วิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์เนื้อหา (content analysis) งานวิจัยนี้เป็นรูปแบบการวิจัยเชิงคุณภาพ ใช้วิธีการการสัมภาษณ์เชิงลึก (in-depth interview) (Lincharearn, 2555) จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 6 คน (Macmillan, 1971)โดยใช้เวลาในการสัมภาษณ์ครั้งละประมาณ 2 ชั่วโมงต่อคน และนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาแบบสอบถามให้สมบูรณ์ขึ้น เพื่อนำไปเก็บข้อมูลวิเคราะห์ และสรุปผลต่อไป

การคัดเลือกคุณสมบัติของผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัยจะแบ่งผู้เชี่ยวชาญออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ผู้เชี่ยวชาญด้านการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรม และ กลุ่มที่ 2 ผู้เชี่ยวชาญด้านปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง โดยผู้เชี่ยวชาญต้องมีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 10 ปี มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ และมีงานวิจัยหรือปฏิบัติหน้าที่เกี่ยวข้องกับหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตัวชี้วัดของหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง โครงการในพระราชดำริ พระบรมราโชวาท โครงการภาครัฐ และเกณฑ์ปฏิบัติทั้งในประเทศ และต่างประเทศ ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์เนื้อหา (content analysis) รวบรวมข้อคำถามทั้งหมด 43 ข้อ ซึ่งจำแนกจำนวนข้อคำถามในแต่ละด้านได้ดังนี้ ด้านความพอประมาณ 10 ข้อ ด้านความมีเหตุผล 6 ข้อ ด้านการมีภูมิคุ้มกันในตัว 5 ข้อ ด้านความรู้ 7 ข้อ ด้านคุณธรรม 15 ข้อ

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์เชิงลึก (in-depth interview) จากผู้เชี่ยวชาญซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ผู้เชี่ยวชาญด้านการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรม และ กลุ่มที่ 2 ผู้เชี่ยวชาญด้านปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง พบว่าข้อคำถามทั้งหมด 43 ข้อ เป็นที่ยอมรับของผู้เชี่ยวชาญ แต่ยังมีบางข้อที่ครอบคลุมหลายประเด็นจึงทำให้ผู้เชี่ยวชาญมีข้อเสนอแนะให้แยกประเด็นคำถามที่ซ้อนทับกัน จึงทำให้ข้อคำถามเพิ่มเป็น 45 ข้อ ซึ่งจำแนกจำนวนข้อ

คำถามในแต่ละด้านได้ดังนี้ ด้านความพอประมาณ 11 ข้อ เพิ่มจากเดิม 1 ข้อ ด้านความมีเหตุผล 6 ข้อ ด้านการมีภูมิคุ้มกันในตัว 5 ข้อ ด้านความรู้ 7 ข้อ ด้านคุณธรรม 16 ข้อ เพิ่มจากเดิม 1 ข้อ ข้อคำถามที่ถูกแยกประเด็นเพิ่มเติมได้แก่

ความพอประมาณ ข้อที่ถูกพิจารณาให้แยกประเด็นเพิ่มเติมคือ หัวข้อการดำเนินโครงการตามทรัพยากรที่มี ข้อคำถามที่ 4 พิจารณากำลังความสามารถของคนทั้งในหน่วยงานที่รับผิดชอบและคนภายในชุมชนที่จะออกแบบ ก่อสร้าง กำกับดูแล และบำรุงรักษาโครงการ รวมถึงสนับสนุนการพัฒนาคนให้มีความรู้ความสามารถ และทักษะที่จำเป็นต่อการพัฒนาดูแลโครงการ แยกได้ดังนี้ ประเด็นแรก ข้อที่ 4 พิจารณาความสามารถของคนทั้งในหน่วยงานที่รับผิดชอบ และคนภายในชุมชนที่จะออกแบบ ก่อสร้าง กำกับดูแล และบำรุงรักษาโครงการ ประเด็นที่สอง ข้อที่ 5 สนับสนุนการพัฒนาคนให้มีความรู้ความสามารถ และทักษะที่จำเป็นต่อการพัฒนาดูแลโครงการ

คุณธรรม ข้อที่ถูกพิจารณาให้แยกประเด็นเพิ่มเติมคือ หัวข้อทิฏฐิสามัญญตา ข้อคำถามที่ 3 ทีมพัฒนาโครงการเข้าใจบทบาทหน้าที่ของตนเองเป็นอย่างดี และเคารพในบทบาทหน้าที่ สิทธิ เสรีภาพในการทำงานของผู้ร่วมงาน และประชาชนทุกฝ่าย ไม่เอาตนเป็นใหญ่ แยกได้ดังนี้ ประเด็นแรก ข้อที่ 3 ทีมพัฒนาโครงการเข้าใจบทบาทหน้าที่ของตนเองเป็นอย่างดี ประเด็นที่สอง ข้อที่ 4 ทีมพัฒนาโครงการเคารพสิทธิเสรีภาพในการทำงานของผู้ร่วมงาน และประชาชนทุกฝ่าย ไม่เอาตนเป็นใหญ่ เพื่อลดความขัดแย้ง ซึ่งแสดงใน Table 1

Table 1 Result of 45 questions by content analysis

Question	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Reasonableness										
The necessity for project development										
1 Solve community problem	✓	✓	✓					✓		
2 Improve the quality of life	✓	✓		✓	✓			✓	✓	
3 Long-term development	✓	✓		✓				✓	✓	
Consider the impact of the project carefully										
4 Economic impact	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
5 Social and cultural impacts	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
6 Environmental impact	✓	✓		✓	✓				✓	
Moderation										
Execution of projects based on available resources										
1 Spend appropriately			✓					✓		
2 Utilize labor and nature	✓							✓		
3 Use simple technology	✓		✓					✓		
4 Consider people capacity	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
5 Develop human resource	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	

Table 1 (continued).

Question	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
The development is suitable for the community										
6 Suitable to local lifestyle		✓	✓		✓			✓		
7 Suitable to the environment		✓	✓		✓			✓		
8 Suitable to local economy		✓		✓	✓			✓		
Project design is economical and most beneficial										
9 Project has multi-benefits								✓		
10 Project is economical	✓		✓					✓		✓
11 Consider whole-life costs	✓							✓		
Self-immunity										
A plan to promote self-reliance over the long term										
1 Consider LT management plan	✓		✓					✓		
2 Self-reliance in tech	✓	✓						✓		
3 Rehab of natural resources					✓			✓		
The project is flexible & plans to adapt to future changes										
4 Designed to support LT changes	✓	✓						✓		
5 Flexibility for adaptive utilization	✓							✓		
Knowledge										
Knowledge of the problem										
1 Active listen to the community								✓		
2 Investigate problem on-site								✓	✓	
3 Exchange knowledge and experience								✓		
Knowledge of troubleshooting options										
4 Gain participations from all sectors			✓					✓	✓	
5 Develop simple solutions								✓		
6 Gain public involvement of decision			✓					✓		
7 Establish a network of community								✓		

Table 1 (continued).

Question	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Moral										
To be amiable in deed										
1 Work with mutual respect						✓	✓	✓	✓	✓
2 Work together in solidarity						✓	✓	✓	✓	
3 Work with perseverance						✓	✓	✓	✓	
To be amiable in thought										
4 Have good wishes to each other						✓	✓	✓		
5 Have trust and no prejudice						✓	✓	✓		✓
To be amiable in word										
6 Inform team with full information						✓	✓			✓
7 Recommend the team politely						✓	✓		✓	
8 Communicate appropriately			✓				✓			
To share any lawful gains with virtuous fellows										
9 Sacrifice for public benefit						✓		✓		✓
10 Fair benefit to all parts of community						✓	✓	✓		✓
To keep without blemish the rules of conduct along with one's fellows										
11 Be honest with integrity		✓				✓	✓	✓		✓
12 Be consistent with local traditions			✓			✓	✓	✓		
To be endowed with right views along with one's fellows										
13 Have excellent teamwork						✓	✓	✓		
14 Find common ground	✓		✓			✓	✓	✓	✓	
15 Understand their roles and responsibilities						✓	✓	✓		✓
16 Respect the right of others						✓	✓	✓		

สรุป

จากข้อมูลการสัมภาษณ์ ผู้เชี่ยวชาญได้เสนอแนะให้เพิ่มเติมรายละเอียดที่ชัดเจนในหัวข้อของความพอประมาณ และหัวข้อคุณธรรม เพื่อให้เกิดความเข้าใจในหัวข้อนี้อย่างตรงประเด็น และอีกหนึ่งข้อเสนอแนะที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลที่จะได้รับจากการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ว่าผลที่เกิดขึ้น สามารถตอบผลสุดท้ายที่เกิดขึ้นได้อย่างไร เช่น

ด้านความสมดุล ความสมดุลมหภาคในระยะยาว ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

ด้านความมั่นคง การก่อเกิดรากฐานความมั่นคงกับประเทศ สังคม และชุมชน

ด้านความยั่งยืน ทำให้เกิดการพึ่งพาตนเองตามเป้าหมายของหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

ข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด จะถูกนำไปพิจารณาเพื่อทำการพัฒนาตัวชี้วัดเพื่อประเมินความสอดคล้องในการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญทั้ง 6 ท่านไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้กรุณาสละเวลา ให้ความคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ยิ่งเกี่ยวกับตัวชี้วัดที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

1) รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร อิศวิลานนท์ นักวิชาการอาวุโส สถาบันคลังสมองของชาติ
2) รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เวทย์วิวรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธันวา จิตต์สงวน คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4) รองศาสตราจารย์ ดร. สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศยามล เอกะกุลานันต์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6) อาจารย์ ดร. รัชชานนท์ สมบูรณ์ชัย รองคณบดีคณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เอกสารอ้างอิง

กปร., ส. 2554. การประกวดผลงานตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ครั้งที่ *2*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงาน กปร.

ทิศนา, ข. 2558. ถอดรหัสปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง สู่การสอนกระบวนการคิด. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรมหาวิทยาลัย

วิจิตร บุษบา, ม. 2560. หนังสือการประเมินองค์ความรู้ด้านเมืองยั่งยืนในประเทศไทย (*A Knowledge Assessment On Sustainable Cities In Thailand)*. นครปฐม: สำนักประสานงานชุดโครงการ “เมืองยั่งยืน” ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมนิเวศวิทยาอุตสาหกรรม อาคาร 1 ชั้น 3 คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล.

Diugwu, I.A., Mohammed, M., Baba, D.L. 2015. Towards effective infrastructure development in Nigeria: Theoretical considerations from a project management perspective. American Journal of Industrial and Business Management 5: 172–180. doi: 10.4236/ajibm.2015.54019

Lincharearn, A. 2018. Qualitative data analysis techniques. Journal of Educational Measurement Mahasarakham University Vol.17 No.1: 17-26. ISSN 0858-5520

Liyin, S.,Yuzhe,W., Zhang, X. 2011. Key Assessment Indicators for the Sustainability of Infrastructure Projects.Journal of Construction Engineering and Management, 441-451 doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000315

Macmillan, T.T. 1971. The delphi technique. Paper Presented at the annual meeting of the California Junior Colleges Associations Committee on Research and Development

NESDB. 2018. NESDB Economic Report, pp. 1–32. https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=8429, 8 กันยายน 2562.

Thailand, U.N. 2558. เป้าหมายการพัฒนาแห่งสหัสวรรษ Sustainable Development Goals (SDGs). https://www.un.or.th/globalgoals/th/the-goals/, 25 ตุลาคม 2562

Yudelson, J. 2010. Sustainable Retail Development: New Success Strategies. Academic Book springer Dordrecht Heidelberg London New York, ISBN 978-90-481-2781-8 DOI 10.1007/978-90-481-2782-5

โครงสร้างพื้นฐานที่ส่งผลต่อความอยู่เย็นเป็นสุขของชุมชน: กรณีศึกษาเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว

Infrastructure affecting the green and happiness index of community: Case study of Tambon Kled Kaew

เฉลิมเกียรติ ทองเนื้อห้า*, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์

Chaloemkiat Thongnueaha*, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสำรวจเบื้องต้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างพื้นฐานกับความอยู่เย็นเป็นสุข (ตัวชี้วัดของกระทรวงมหาดไทย) โดยเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐาน พร้อมทั้งศึกษารวบรวมเอกสารจนกระบวนการพัฒนาและข้อมูลโครงการก่อสร้างในพื้นที่ และส่วนที่สองสัมภาษณ์โดยใช้รูปแบบการสนทนากลุ่มกับตัวแทนหมู่บ้าน 8 หมู่บ้าน ในฐานะผู้ใช้โครงการ โดยสอบถามว่าโครงสร้างพื้นฐานรูปแบบใดจะส่งผลต่อตัวชี้วัดความอยู่เย็นเป็นสุข พบว่าโครงการส่วนใหญ่ที่ถูกพัฒนาจะเป็นโครงการประเภทถนน ตามนโยบายการกระจายความเจริญ แต่ชุมชนแม้จะต้องการถนน แต่ควรเป็นถนนที่มีไฟส่องสว่างและกล้องวงจรปิด และชุมชนก็ต้องการพื้นที่พักผ่อนหย่อนใจ และยังต้องการระบบขนส่งสาธารณะอีกด้วย เนื่องจากการมีพาหนะส่วนตัวนั้น เป็นค่าใช้จ่ายที่สูง

คำสำคัญ: ความอยู่เย็นเป็นสุข, โครงสร้างพื้นฐาน, การพัฒนาชุมชน, การพัฒนาอย่างยั่งยืน

Abstract

This research is a preliminary survey to find the relationship between infrastructure and Green and Happiness Index (indicators developed by the Ministry of Interior). Data is collected through in-depth interviews in 2 parts. The first part interview is conducted with local government authority officials who developed the project. The archival record of project development process as well as information related to infrastructure projects developed in the areas are also collected. The second part interview is conducted with representatives from 8 villages who are users of the infrastructure developed asking the infrastructure required to increase their level of happiness. It was found that most of the projects developed are roads following the civilization policy. However, the community would like to have not just the existing type of road by the road with light and CCTV to enhance their safety. They also need a recreation space. Furthermore, they identify the need for public transport vehicles since it is costly to individually own a private vehicle.

Keyword: green and happiness index, infrastructure, community development, sustainable development

คำนำ

ความสุขมักถูกคิดว่าเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละบุคคลซึ่งแต่ละคนต้องรับผิดชอบแต่เพียงผู้เดียว อย่างไรก็ตามความสุขก็ถือเป็นลักษณะของชุมชนเช่นกัน (Adams, 1992; Hagerty, 2000; Quercia et al., 2012) แล้วทำไมต้องมีความสุข เนื่องจากความสุขถือเป็นสิ่งสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการนำมาพัฒนานโยบายต่าง ๆ รวมทั้งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญถึงการบริหารการจัดการ ว่าสิ่งที่กำลังดำเนินการอยู่นั้นถูกต้องหรือมีประสิทธิภาพในการพัฒนาที่ดีมากน้อยเพียงใด โดยเป็นทั้งเกณฑ์และการวัดผลของประชาชนหรือกลุ่มคนได้อย่างดี โดยการศึกษาที่มีอยู่ได้ระบุปัจจัยสำคัญสองประเภทที่เกี่ยวข้องกับความสุขคือ ประเภทแรกคือสถานะทางประชากรและเศรษฐกิจและสังคม (SES) ซึ่งไม่จำกัด อายุ การศึกษา อาชีพ รายได้และสุขภาพ (Ed Diener & Biswas-Diener, 2002; Sun et al., 2015; Anderson et al., 2012) หรือเรียกกันว่าความสุขทางอ้อมผ่านการปลูกฝังความสัมพันธ์ทางสังคม ตัวอย่างเช่นรายได้ที่เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสุข ได้รับการสำรวจอย่างกว้างขวางและโดยทั่วไปมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความสุข (Diener, 2000; Liu et al., 2017) ประเภทที่สองคือสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัย (Dong and Qin, 2017) หรือเรียกกันว่าความสุขทางตรงผ่านการรวมสิ่งอำนวยความสะดวกที่ส่งผลต่อความเป็นอยู่ที่ดี โดยในแต่ละพื้นที่ก็มีบริบทที่แตกต่างกันจึงมีการสร้างดัชนีตัวชี้วัดที่เหมาะสมของแต่ละพื้นที่ ทั้งนี้ ดัชนี“ความอยู่เย็นเป็นสุข”ร่วมกันในสังคมไทย มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาขึ้นเพื่อวัดผลกระทบสุดท้ายที่เกิดขึ้นจากการพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ แต่ละฉบับ ดังนั้น ดัชนีความอยู่เย็นเป็นสุขร่วมกันในสังคมไทย เป็นการวัดความสุขร่วมกันของสังคม ไม่ใช่ความสุขของคนใดคนหนึ่ง (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2560) ตัวชี้วัดต่าง ๆ เกิดจากการระดมความคิดเห็นจากทุกภาคส่วน และเห็นพ้องต้องกันแล้วว่าทำให้เกิดความสุขร่วมกันในสังคมไทย ดังนั้น ความสุขดังกล่าวจึงสามารถวัดได้ด้วยข้อมูลที่เป็นรูปธรรม

โครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) หมายถึง “ระบบและบริการพื้นฐานเช่น ระบบคมนาคมและพลังงานที่ประเทศหรือองค์กรใช้เพื่อทำให้การทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ” ซึ่งมีตัวชี้วัดมากมายที่ถูกดึงเข้ามาใช้ในการวัดหาความสุขมวลรวมของประชาชน หนึ่งในสิ่งที่ก่อให้เกิดความสุขที่ทุกพื้นที่ต้องเจอและเลือกใช้คือโครงสร้างพื้นฐาน โดยอาจรวมถึงสิ่งอำนวยความสะดวกเช่นการมีพื้นที่สีเขียวและการเข้าถึงการขนส่งและวัฒนธรรม เรื่องเหล่านี้อาจส่งผลต่อความเป็นอยู่ที่ดีของผู้อยู่อาศัยโดยตรง การวิจัยที่เกิดขึ้นใหม่ชี้ให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างการเข้าถึงสภาพแวดล้อมสีเขียวและความเป็นอยู่ที่ดี (Brereton et al., 2008; Campbell and Wiesen, 2011; Akers et al., 2012; Kaplan, 2016) ความสามารถในการชมธรรมชาติจากหน้าต่างบ้านและการใช้ชีวิตใกล้พื้นที่สีเขียวที่มีโอกาสออกกำลังกายหรือพื้นที่โล่งกว้างอาจก่อให้เกิดความสุขได้ (Brereton et al., 2008; Akers et al., 2012; Kaplan, 2016) และยังมีการศึกษาพบว่าการใช้ชีวิตใกล้ทางรถไฟ (Morris, 2011) หรือการขนส่ง (Leyden et al., 2011) และในเมืองที่มีความสามารถในการเดินและขี่จักรยานได้มากขึ้น (Choi, 2013) อาจช่วยเพิ่มความสุข ซึ่งปัจจัยที่นำไปสู่ความสุขอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการผสมผสานของบุคลิกภาพที่เป็นเอกลักษณ์ภายในชุมชนซึ่งอาจเกิดจากบริบททางวัฒนธรรม (Hofstede and McCrae, 2004; Triandis, 2016)

โดยงานวิจัยฉบับนี้ ได้ศึกษาสำรวจโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ ณ ปัจจุบันกับความต้องการของประชาชนเพื่อหาศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างพื้นฐานกับความสุขของประชาชน ว่ามีความความเกี่ยวเนื่องกันในด้านใดและส่งผลอย่างไรกับความสุขมวลรวมของประชาชน

วิธีวิจัย

ดัชนีตัวชี้วัด

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (2560) นิยามของคำว่า “ความอยู่เย็นเป็นสุขร่วมกัน” หมายถึง สภาวะที่คนมีคุณภาพชีวิตที่ดี ดำรงชีวิตอย่างมีดุลยภาพทั้งในด้านจิต กาย ปัญญา เป็นผลที่เกิดจากความเชื่อมโยงระหว่างสมาชิกในครอบครัว ชุมชน ระบบเศรษฐกิจ สังคม การเมือง และสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นองค์รวม โดยมีความสัมพันธ์กันบนพื้นฐานของหลักนิติธรรม หลักธรรมาภิบาล นำไปสู่การพัฒนาและการอยู่ร่วมกันอย่างสันติและยั่งยืน ซึ่งสามารถสรุปเป็นองค์ 5 องค์ประกอบหลักได้แก่องค์ประกอบที่ 1) การมีสุขภาวะ 2)เศรษฐกิจเข้มแข็งและเป็นธรรม 3) สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศสมดุล 4) สังคมประชาธิปไตยที่มีธรรมาภิบาลและ 5) การสร้างความเป็นธรรมและลดความเหลื่อมล้ำทางสังคม

วิธีการเก็บข้อมูล

วิธีเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพโดยการจัดให้มีคนที่เลือกจากประชากรที่ต้องการศึกษาจำนวนไม่มากนักมาร่วมสนทนากันเพื่ออภิปรายพูดคุยกัน โดยมุ่งประเด็นการสนทนาไปยังเรื่องที่สนใจศึกษาในการจัดการสนทนากลุ่มอย่างเป็นระบบ โดยเลือกผู้เข้าร่วมสนทนากลุ่ม กลุ่มละจำนวน 6 คน ที่มีลักษณะประชากร สังคม เศรษฐกิจ และวัฒนธรรมที่คล้ายคลึงกัน ระหว่างพูดคุย มีพิธีกรเป็นผู้ดำเนินรายการ มีผู้จดบันทึกเป็นผู้จดย่อเนื้อหาการสนทนาและมีเทปบันทึกเสียงบันทึกรายละเอียดของการพูดคุย เมื่อเสร็จสิ้นการสนทนา ผู้บันทึกจะถอดรายละเอียดจากเทปที่บันทึกไว้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ต่อไป (กรมการพัฒนาชุมชน, 2551) โดยในการดำเนินงานแบ่งออกเป็นการสัมภาษณ์ทั้งฝั่งของภาครัฐและประชาชนโดยครั้งแรกฝั่งภาครัฐได้เชิญผู้เกี่ยวข้องในพื้นที่ ได้แก่ นายกเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว รองนายกเทศบาลเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว ผู้อำนวยการกองช่าง รองผู้อำนวยการกองช่างและเจ้าหน้าที่ราชการอีก 2 คน รวมเป็น 6 คนเพื่อสำรวจหาแนวทางในการสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ของชุมชน ในส่วนฝั่งประชาชนถูกแบ่งออกเป็น 8 กลุ่มตามจำนวนชุมชนทั้ง 8 ชุมชนของเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว ซึ่งมีคนที่เข้าร่วมดังนี้ ประธานกรรมการชุมชน รองประธานกรรมการชุมชนและตัวแทนประชาชนจากการโหวตของประชาชนอีก 4 คน รวม 6 คนต่อกลุ่มมาทำการเก็บข้อมูลทีละกลุ่ม โดยใช้เวลา 45 นาทีในการสัมภาษณ์เก็บข้อมูล โดยใช้คำถามชุดเดียวกันว่าโครงการโครงสร้างพื้นฐานใดที่ตอบโจทย์ในแต่ละองค์ประกอบทั้ง 5 ด้านของความอยู่เย็นเป็นสุขและความต้องการของประชาชนต้องการโครงสร้างพื้นฐานแบบใดเพื่อจะให้มีความสุขทั้ง 5 ด้าน

ข้อมูลจากการสำรวจพื้นที่

เทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรีตั้งอยู่ทางทิศเหนือของอำเภอสัตหีบ มีพื้นที่ประมาณ 58 ตารางกิโลเมตร ภูมิประเทศเป็นที่ราบลาดเอียง สลับภูเขา โดยลาดเอียงสู่ชายทะเลด้านทิศตะวันตก ภูมิอากาศของเขตพื้นที่เทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว มีลักษณะอากาศแบบมรสุมเขตร้อนได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ มีผลทำให้ฝนตกชุก และได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นช่วงฤดูที่มีอากาศหนาว หรือแห้งแล้ง โดยแบ่งเขตการปกครองออกเป็น 8 ชุมชนได้แก่ 1) หมู่ 3 ชุมชนเนินสามัคคี 2) หมู่ 5 ชุมชนทรายแก้ว 3) หมู่ 5 ชุมชนเขาช้าง 4) หมู่ 6 ชุมชนบ้านเขากระทิง 5) หมู่ 7 ชุมชนบ้านหนองหิน 6) หมู่ 8 ชุมชนร่วมพัฒนาวัดใหม่อยู่สงัด 7) หมู่ 9 ชุมชนเกล็ดแก้วพัฒนาและ 8) หมู่ 10 ชุมชนบ้านโค้งวันเพ็ญ (สำนักงานเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว, 2556) ซึ่งมีประชากรทั้งหมด 14,175 คนรวมเป็น 5,722 หลังคาเรือน โดยในพื้นที่มีผู้ประกอบอาชีพหลากหลายแต่สามารถจำแนกใหญ่ได้คือพื้นที่เขตสีส้มเหลืองลักษณะพื้นที่ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพราชการทหารและแหล่งท่องเที่ยวและพื้นที่สีเขียวฟ้าลักษณะพื้นที่ส่วนใหญ่ทำการเกษตรและทำประมงในบางส่วน (สำนักงานเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว, 2556) ดังแสดงใน Fig. 1

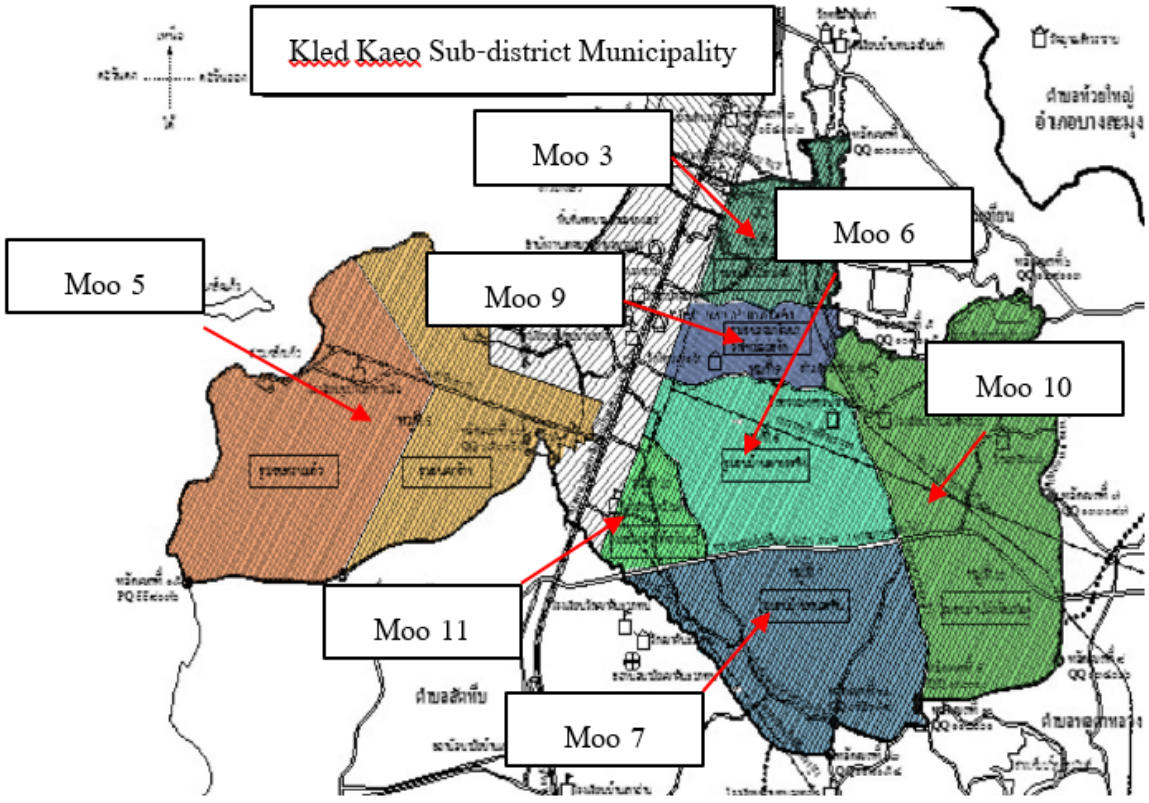


Fig. 1 Map of Tambon Klet Kaew

ผลและวิจารณ์ผล

การสำรวจความคิดเห็นเกี่ยวกับโครงสร้างพื้นฐานที่สัมพันธ์กับความอยู่เย็นเป็นสุข โดยการสอบถามประชาชนโดยให้ความสำคัญกับความสุขว่าในแต่ละหัวข้อของความสุข คิดเห็นว่ามีสิ่งปลูกสร้างอะไรที่สามารถตอบสนองความสุขเหล่านี้ในแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งได้สรุปมาเป็นดัง Table 1 โดยจาก Table 1 จะเห็นว่าผู้ตอบสัมภาษณ์ชี้ให้เห็นถึงความสุขของพวกเขาที่ผ่านแต่ละองค์ประกอบนั้นสามารถถูกตอบสนองจากโครงสร้างพื้นฐาน

แบบใดได้บ้างดังที่แสดงใน Table 1 และสามารถอธิบายความสุขแต่ละองค์ประกอบจากการตอบของผู้ตอบสัมภาษณ์ได้ดังนี้

Table 1 An opinion poll on the infrastructure related to the green and happiness index

Core components	Sub-component	Transportation	Facilities for health	Facilities for education	Public utility	Renewable energy	Revenue generating area	Communication and management
Well-being	Good physical and mental health	✓	✓					
	Good social health	✓	✓		✓			
	Morality, intelligence and learning habit	✓		✓				✓
Strong and fair economy	Security of quality of life and work	✓		✓			✓	
	Strong and effective economy	✓		✓			✓	
	Economic fairness	✓					✓	
Balanced environment and ecosystem	Good quality environment		✓		✓	✓		
	Balanced ecosystem						✓	
	Green economy					✓		
Democratic society with governance	Quality democracy							✓
	Rule of law and governance							✓
	Decentralization of power							✓
	Prevention and mitigation of social and political violence							✓
Cultivation of fairness and reduction of social disparity	Protection of rights and non-discrimination	✓						
	Access to social welfare and economic resources	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Environmental and natural resource justice	✓					✓	

* ✓ means that those interviewed agree that infrastructure satisfies happiness in that particular topic

องค์ประกอบที่ 1 การมีสุขภาวะ โดยในส่วน 1) สุขภาพกายและจิตดี ตัวแทนชุมชนส่วนใหญ่คิดเห็นในทางเดียวกันคือการมีสิ่งปลูกสร้างที่ส่งเสริมการออกกำลังกายหรือสภาพแวดล้อมที่เหมาะต่อการออกกำลังรวมถึงศาสนาสถานที่อยู่ใกล้ชุมชนส่งผลด้านสุขภาพจิตที่ดีของพวกเขา 2) สุขภาวะทางสังคมที่ดี ในส่วนนี้ตัวแทนชุมชนให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในการใช้ชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งในพื้นที่หมู่ 3,7,10 และ 11 ที่มีพื้นที่ห่างไกลจากตัวเมือง พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าเขาและสวน ตัวแทนชุมชนได้ระบุถึงความสำคัญของไฟฟ้าส่องสว่างว่ามีความจำเป็นต่อการใช้ชีวิต ทางตัวแทนชุมชนเมืองอย่างหมู่ 5 ได้เสริมว่าการมีกล้อง CCTV สามารถช่วยให้เขารู้สึกถึงความปลอดภัยในการใช้ชีวิตในพื้นที่มากขึ้นและมองว่าการมีจุดรอรถขนส่งมวลชลที่มีความปลอดภัยและสะดวกสบายก็มีความสำคัญเช่นเดียวกันซึ่งมีความคิดเห็นคลายกับตัวแทนชุมชนหมู่ 6 และ 9 3) การมีคุณธรรมและสติปัญญาใฝ่รู้ ทุกตัวแทนชุมชนให้ความสำคัญกับการทักษะการเรียนรู้โดยไม่ใช่แค่การเรียนรู้ในระบบศึกษาปกติ แต่ยังรวมถึงการเสริมการเรียนรู้และพัฒนาทักษะอาชีพของคนในชุมชน ว่าเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้คนในชุมชนเกิดการพัฒนาและต่อยอดทางความคิด

องค์ประกอบที่ 2 เศรษฐกิจเข้มแข็งและเป็นธรรม โดยในส่วน 1)การมีหลักประกันคุณภาพชีวิตและงานที่ดี ทุกตัวแทนชุมชนมองว่าการมีศูนย์กระจายสินค้าหรือตลาดนั้นเพิ่มโอกาสในอาชีพมากขึ้นเนื่องจากส่วนใหญ่มีอาชีพเกษตรกรและบางส่วนอยู่ใกล้สถานที่ท่องเที่ยว รวมถึงพื้นที่เรียนรู้วิชาชีพนั้นก็มีส่วนสำคัญเช่นเดียวกัน ในส่วนตัวแทนชุมชนหมู่10,11ที่มีอ่างเก็บน้ำเพื่อการประมงได้เสริมว่า อยากให้มีการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวต่าง ๆ เช่นอ่างเก็บน้ำที่เป็นจุดประมงของพื้นที่หากมีการพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวก็สามารถเพิ่มรายได้และอาชีพให้กับชุมชนที่นั้นได้เป็นอย่างดี 2) เศรษฐกิจเข้มแข็งและมีประสิทธิภาพ เป็นหัวข้อที่พูดถึงการพึ่งพาตนเองและการสร้างเศรษฐกิจที่มีประสิทธิภาพ หากพูดในทางตรงศูนย์กระจายสินค้าก็ถือเป็นการสร้างเศรษฐกิจในพื้นที่ แต่หากให้คนในพื้นที่สามารถพึ่งพาตนเองได้นั้น การเรียนรู้ก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งในแต่ละตัวแทนชุมชนเสนอถึงศูนย์เรียนรู้วิชาชีพ โครงการอบรมวิชาชีพ ศูนย์เรียนรู้พัฒนาผลิตภัณฑ์รวมถึงพื้นที่เรียนรู้เพื่อการเกษตรและศูนย์ขายพันธุ์พืช เพื่อช่วยสร้างการพัฒนาและให้ชาวบ้านสามารถเรียนรู้และพึ่งพาตนเองได้ ตัวแทนชุมชนหมู่ 11 ได้เสริมเพิ่มว่าการปลูกพืชผักสวนครัว นั้นยังช่วยในส่วนการพึ่งพาตนเองของครอบครัวได้อีกด้วย 3)ความเป็นธรรมทางเศรษฐกิจ เป็นหัวข้อที่กล่าวถึงความเท่าเทียมความเป็นธรรมในการกระจายรายได้ในพื้นที่ คือการรวมทุกความต้องการข้างต้นไว้ด้วยกัน ทั้งความเท่าเที่ยวในการซื้อและขายโดยมีศูนย์กระจายสินค้า ตลาด รวมถึงความเท่าเทียมทางองค์ความรู้เช่นศูนย์เรียนรู้อาชีพ

องค์ประกอบที่ 3 สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศสมดุล โดยในส่วน 1) สิ่งแวดล้อมมีคุณภาพดีหลายตัวแทนชุมชนมองว่ามลภาวะต่าง ๆ ภาครัฐสามารถจัดการได้เป็นอย่างดีทั้งปัญหาขยะ มลพิษทางอากาศแม้กระทั้งน้ำ แต่มีปัญหาระบบระบายน้ำเสียที่ยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอ จากการสำรวจพบว่าในชุมชนหมู่ 11 มีโรงงานโรงโม่ที่ก่อปัญหามลพิษทางอากาศแต่ก็มีการจัดการที่ดีทำให้ตัวแทนชุมชนเสนอว่าไม่เกิดปัญหาในส่วนนี้ 2) ระบบนิเวศที่สมดุลมีการดูแลรักษาสถานที่ทางธรรมชาติต่างๆ ได้เป็นอย่างดีอาทิ สถานที่ท่องเที่ยวริมทะเลแหล่งท่องเที่ยวธรรมชาติทางๆในพื้นที่ก็มีการจัดการได้เป็นอย่างดีและมีการจัดการโครงการดูแลรักษาความสะอาดแหล่งธรรมชาติต่างๆ รวมถึงชายาฝั่งที่มีการสร้างกำแพงกันน้ำทะเลกัดเซาะ 3) เศรษฐกิจสีเขียวจะกล่าวถึง ระบบการผลิตและพฤติกรรมการบริโภคที่ยั่งยืน มีความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม ในส่วนนี้เนื่องจากปัญหาไฟฟ้าของหมู่ 10 และ11 ที่

ไม่เพียงพอจึงมีการจัดนำเสนอแผนสร้างแผงพลังงานโซล่าเซลล์เพื่อเป็นพลังงานทดแทนของหมู่บ้าน ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไฟฟ้าส่องสว่างของชุมชน

องค์ประกอบที่ 4 สังคมประชาธิปไตยที่มีธรรมาภิบาล โดยการที่สังคมจะเป็นสังคมประชาธิปไตยที่มีธรรมาภิบาล ประชาชนมองว่าการมีระบบการแจ้งเตือนหรือสื่อสารให้ประชาชนได้เข้าใจและรับรู้ข่าวสารต่าง ๆ ของชุมชนมีส่วนช่วยให้ประชาชนเกิดความเข้าใจความเป็นไปทางการเมืองของชุมชนได้ดียิ่งขึ้นหรือแม้กระทั้ง การจัดตั้งเวทีประชาคมเพื่อรับฟังเสียงของประชาชน ก็เป็นส่วนให้เกิดการกระจายอำนาจและส่งผลให้มีประชาธิปไตยที่มีคุณภาพในระดับหนึ่งและจากการที่สำนักงานเทศตำบลในพื้นที่มีการเปิดเผยข้อมูลทำให้ประชาชนสามารถตรวจสอบความโปร่งใส่ในการทำงานของภาครัฐได้ ช่วยให้สังคมเกิดประชาธิปไตยที่มีธรรมาภิบาล

องค์ประกอบที่ 5 การสร้างความเป็นธรรมและลดความเหลื่อมล้ำทางสังคม โดยในส่วน 1) การได้รับการคุ้มครองสิทธิและการไม่เลือกปฏิบัติในส่วนหัวข้อนี้ตัวแทนชุมชนอธิบายว่าสิทธิและการไม่เลือกปฏิบัติของพื้นที่นี้เป็นไปในทางที่ดีคือไม่มีเรื่องนี้เนื่องจากการที่ได้รับการดูแลและมีสำนักงานท้องถิ่นที่ค่อยดูแลในเรื่องนี้ 2) การเข้าถึงสวัสดิการทางสังคมและทรัพยากรทางเศรษฐกิจคือการที่ประชาชนได้รับสิทธิในการเข้าถึงระบบและบริการของภาครัฐอย่างเต็มประสิทธิภาพซึ่งในบางส่วนยังไม่ได้เข้าถึงในเรื่องนี้ทั้ง ระบบขนส่งมวลชนที่ขาดแคลนในบางพื้นที่หรือพลังงานไฟฟ้าที่ในบางพื้นที่ไม่สามารถใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และ 3) ความเป็นธรรมด้านสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติประชาชนส่วนใหญ่ให้ข้อนี้ไปในทางที่ดีเพราะทรัพยากรธรรมชาติของพื้นที่มีทั้งฝั่งติดทะเลที่ถูกนำมาทำเป็นแหล่งท่องเที่ยวรวมถึงสร้างรายได้ให้กับชุมชนและยังมีพื้นที่เพื่อการเกษตรและอ่างเก็บน้ำที่ประชาชนใช้ในการดำเนินชีวิตทั้งเลี้ยงปากท้องและการสร้างรายได้ให้กับครอบครัว

จากกรณีนี้แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวเนื่องของโครงสร้างพื้นฐานกับความสุขที่ส่งผ่านอิทธิผลในบางส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ ของความสุขมวลรวมของประชาชน ดังที่ได้สรุปความต้องการของตัวแทนประชาชนในเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว และตอบสนองความสุขของคนเหล่านั้น ที่แสดงใน Table 2 และ Table 3

Table 2 Infrastructure exists today and require of the people. To the happy response

	Existing infrastructure	Required infrastructure	Satisfied happiness
Transportation	Roads, lighting, transportation of major routes	Bicycle lanes, car pavilions, CCTV, transportation of sub-routes, road with lighting	Well-being, Strong and fair economy, Cultivation of fairness and reduction of social disparity
Facilities for health	Exercise building, Guardhouse, temple, Breakwater.	Bicycle track, the park, central sports field, nursing home, reservoir development as a resting place.	Well-being, Balanced environment and ecosystem, Cultivation of fairness and reduction of social disparity
Facilities for education	Municipal School, Cultivation Learning Center, Plant Distribution Center	Online instructional media, Vocational Learning Center, Center for Disabled Schools, Product Development Learning Center	Well-being, Strong and fair economy, Cultivation of fairness and reduction of social disparity
Public utility	Electricity, water supply, artesian well, waste pond	Wastewater treatment system, recycling plant	Well-being, Balanced environment and ecosystem, Cultivation of fairness and reduction of social disparity

Table 3 Infrastructure exists today and require of the people. To the happy response (continuous)

	Existing infrastructure	Required infrastructure	Satisfied happiness
Renewable energy	-	Recycling plant, Wind turbine generator, solar panels.	Balanced environment and ecosystem, Cultivation of fairness and reduction of social disparity
Revenue generating area	Reservoir, Sai Kaew Beach, Tourist Shop, Municipal Market, Distribution Center	Reservoir development as a tourist destination, local products distribution center, fertile farmland	Balanced environment and ecosystem, Democratic society with governance, Cultivation of fairness and reduction of social disparity
Communication and management	Municipal office, community hall, voice by line	Online learning center	Well-being, Democratic society with governance, Cultivation of fairness and reduction of social disparity

สรุป

บทความนี้แสดงให้เห็นว่าสิ่งปลูกสร้างที่หลากหลายรวมถึงโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ นั้นเป็นรากฐานของการพัฒนาชุมชนให้มีความเจริญในด้านต่างๆ และเป็นการตอบสนองความสุขของประชาชนจากโครงสร้างพื้นฐานเหล่านั้น จากกรณีนี้แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวเนื่องของโครงสร้างพื้นฐานกับความสุขที่ส่งผ่านอิทธิผลในบางส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ของความสุขมวลรวมของประชาชน โดยหากจะทำแผนพัฒนาเมืองในอนาคตการที่จะพัฒนาเมืองเพียงแต่ใช้แผนเดิมหรือจากส่วนกลางในการพัฒนา อาจไม่ได้ตอบสนองความต้องการทั้งหมดของประชาชนจึงควรมีการสอบถามความต้องการและมองแผนที่จะพัฒนาให้สะท้อนความสุขของประชาชนเพื่อการพัฒนาที่มีประสิทธิภาพต่อประชาชนในพื้นที่มากขึ้น ดังที่ได้สรุปความต้องการของตัวแทนประชาชนในเทศบาลตำบลเกล็ดแก้วกับการตอบสนองความสุขทั้ง 5 องค์ประกอบของดัชนีความอยู่เย็นเป็นสุข พบว่าโครงการส่วนใหญ่ที่ถูกพัฒนาจะเป็นโครงการประเภทถนน ตามนโยบายการกระจายความเจริญ แม้ว่าชุมชนจะต้องการถนน แต่ควรเป็นถนนที่มีไฟส่องสว่างและกล้องวงจรปิดรวมถึงก็ต้องการพื้นที่พักผ่อนหย่อนใจและยังต้องการระบบขนส่งสาธารณะที่ครอบคลุมอีกด้วย เนื่องจากการมีพาหนะส่วนตัวนั้น เป็นค่าใช้จ่ายที่สูง โดยข้อมูลเหล่านี้เป็นเพียงแค่การตอบสนองความต้องการกับความสุขของตัวแทนประชาชนในพื้นที่เทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว ซึ่งช่วยเพิ่มเพียงแค่ความสุขในเฉพาะกลุ่มคนและพื้นที่ดังกล่าว อย่างไรก็ตามปัจจัยที่นำไปสู่ความสุขอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการผสมผสานของบุคลิกภาพที่เป็นเอกลักษณ์ภายในชุมชนซึ่งอาจเกิดจากบริบททางวัฒนธรรมที่แตกต่างกันไปของแต่ละพื้นที่

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ศิริพร ปิ่นล่ม นายกเทศมนตรีตำบลเกล็ดแก้ว และคณะ รวมถึงประชาชนเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว ที่ให้การตอบสนองและความร่วมมือในการทำงานวิจัยครั้งนี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

กรมการพัฒนาชุมชน. 2551. การสนทนากลุ่ม (Focus Group Discussion). http://www.cddweb.cdd.go.th/, 5 มกราคม 2564.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2560. คู่มือการจัดทาตัวชี้วัดความอยู่เย็นเป็นสุขร่วมกันในสังคมไทย, หน้า 1–154.

สำนักงานเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว. 2556. ข้อมูลชุมชน-จำนวนประชากรในเขตเทศบาลตำบลเกล็ดแก้ว. http://www.kledkaew.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=99&Itemid=93/, 5 มกราคม 2564.

Adams, R.E. 1992. Is happiness a home in the suburbs?: The influence of urban versus suburban neighborhoods on psychological health. J. Community Psychol. 20: 353–372. doi:10.1002/1520-6629(199210)20:4<353::Aid-jcop2290200409>3.0.Co;2-z

Akers, A., Barton, J., Cossey, R., Gainsford, P., Griffin, M., Micklewright, D. 2012. Visual color perception in green exercise: positive effects on mood and perceived exertion. Environ Sci Technol. 46: 8661–8666. doi:10.1021/es301685g

Anderson, C., Kraus, M.W., Galinsky, A.D., Keltner, D. 2012. The local-ladder effect: social status and subjective well-being. Psychol Sci. 23: 764–771. doi:10.1177/0956797611434537

Brereton, F., Clinch, J.P., Ferreira, S. 2008. Happiness, geography and the environment. Ecol. Econ. 65: 386–396. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.07.008

Campbell, L., Wiesen, A. 2011. Restorative commons: Creating health and well-being through Urban Landscapes Vol. 39.

Choi, J. 2013. An analysis of area type and the availability of alternative transportation services on subjective well-being are people happiest in cities. MIT's technol. 155–159.

Diener, E. 2000. Subjective well-being. The science of happiness and a proposal for a national index. Am Psychol. 55: 34–43.

Diener, E., Biswas-Diener, R. 2002. Will money increase subjective well-being? Soc. Indic. Res. 57: 119–169. doi:10.1023/a:1014411319119

Dong, H., Qin, B. 2017. Exploring the link between neighborhood environment and mental wellbeing: A case study in Beijing, China. Landsc. Urban Plan. 164: 71–80. doi:https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.04.005

Hagerty, M.R. 2000. Social comparisons of income in one's community: evidence from national surveys of income and happiness. J. Pers. Soc. Psychol. 78: 764–771. doi:10.1037//0022-3514.78.4.764

Hofstede, G., McCrae, R. 2004. Personality and Culture Revisited: Linking Traits and Dimensions of Culture. Cross-Cult. Res. 38: 52–88.

Kaplan, R. 2016. The Nature of the View from Home. Environ Behav. 33: 507–542. doi:10.1177/00139160121973115

Leyden, K.M., Goldberg, A., Michelbach, P. 2011. Understanding the Pursuit of Happiness in Ten Major Cities. Urban Aff. Rev. 47: 861–888. doi:10.1177/1078087411403120

Liu, Y., Dijst, M., Geertman, S. 2017. The subjective well-being of older adults in Shanghai: The role of residential environment and individual resources. Urban Stud.. 54: 1692–1714.

Morris, E.A. 2011. Access and Outcomes Transportation, Location, and Subjective Well-Being. Univ. Calif. Los Angel.. 7. doi:10.3141/2357-12

Quercia, D., S´eaghdha, D.O., Crowcroft, J. 2012. Talk of the cityour tweets, our community happiness. ICWSM-12. 6. Retrieved from https://ojs.aaai.org/index.php/ICWSM/article/view/14302

Sun, S., Chen, J., Johannesson, M., Kind, P., Burström, K. 2015. Subjective Well-Being and Its Association with Subjective Health Status, Age, Sex, Region, and Socio-economic Characteristics in a Chinese Population Study. J. Happiness Studies. 17: 833–873. doi:10.1007/s10902-014-9611-7

Triandis, H.C. 2016. Cultural Intelligence in Organizations. Organ. Manag. J. 31: 20–26. doi:10.1177/1059601105275253

การวิเคราะห์ปัจจัยความยั่งยืนในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยโดยใช้ Fuzzy AHP

Analysis of sustainability factors for electrical resource infrastructure development in Thailand using Fuzzy AHP

วสุธร สอดศุข*, ฆนิศา รุ่งแจ้ง

Wasutorn Sodsook*, Kanisa Rungjang

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: wasutorn.so@ku.th

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต การคัดเลือกรูปแบบพลังงานไฟฟ้าจึงมีความสำคัญ การพิจารณาปัจจัยด้านความยั่งยืนร่วมกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยผู้ตัดสินใจหลายองค์กรที่มีภารกิจหน้าที่ต่างกันทำให้การตัดสินใจมีความซับซ้อน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยความยั่งยืนและหาค่าน้ำหนัก ของทางเลือกที่มีผลต่อการพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทยอย่างยั่งยืนโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP) ปัจจัยความยั่งยืนที่มีความสำคัญมากที่สุดเรียงตามลำดับ ได้แก่ ความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงาน การได้รับการยอมรับจากสาธารณะ ความคุ้มค่าของโครงการ การสร้างอาชีพ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และรูปแบบของการพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทย ได้แก่ โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน โรงไฟฟ้าถ่านหิน และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ตามลำดับ งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการคัดเลือกรูปแบบโรงไฟฟ้าของประเทศไทย ที่มีการพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อไป

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP), การพัฒนาอย่างยั่งยืน, การพัฒนาโรงไฟฟ้า

Abstract

Thailand's increasing demand for electricity has the tendency to increase in the near future. Selecting the energy sources to generate electricity is therefore the essential decision to be made. The consideration of sustainability factors, together with other relevant criteria to be made by several organizational and governmental sectors and decision-makers with their different responsibilities and purposes have complicated the direction of selecting the most suitable type of energy for the country. This research aims to analyze the sustainability factor and the weight of the choices that affect the sustainable development of power plants in Thailand by adopting the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). The most important sustainability factors in order are: energy resource reliability, gaining public acceptance, value of project, job creation, and the greenhouse gas emissions (GHG emissions). Moreover, the developmental patterns of power plant in Thailand are Natural gas power plant, Renewable power plant, Coal power plant, and Nuclear power plants respectively. This research will be beneficial to help determine the most suitable power plant for a sustainable electricity generation of Thailand.

Keyword: Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), sustainable development, development of power plant

คำนำ

ที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ในปี พ.ศ. 2560 กระทรวงพลังงานโดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีภารกิจหลักในการเสนอแนะนโยบายและบูรณาการแผนบริหารพลังงานของประเทศได้คาดการณ์ความต้องการไฟฟ้าในอนาคตของไทยว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 78.2 ในปี พ.ศ. 2580 (ปริมาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 30,303 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2560 ถึง 53,997 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2580) โดยได้จัดทำแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580 (Power Development Plan 2018 หรือแผน PDP 2018) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) นอกจากนี้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งมีภารกิจหลักเพื่อรักษาความมั่นคงด้านพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศได้จัดทำแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยเพื่อให้สามารถเพิ่มพลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2560 ให้มากขึ้นร้อยละ 67.5 ในปี พ.ศ. 2580 (ปริมาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 46,090 เมกะวัตต์ เป็น 77,211 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2580) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) (ดัง Fig. 1) รูปแบบของพลังงานไฟฟ้ามีหลายรูปแบบ อาทิเช่น พลังงานถ่านหิน พลังงานก๊าซธรรมชาติ พลังงานนิวเคลียร์ หรือพลังงานหมุนเวียน เป็นต้น (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) เนื่องจากความจำเป็นด้านพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวจึงต้องมีการคัดเลือกรูปแบบพลังงานที่เหมาะสมกับประเทศ ซึ่งต้องพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ปัจจัยด้านความยั่งยืนของการพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทยซึ่งความยั่งยืนด้านพลังงานได้ถูกกำหนดไว้ในแผนยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561 – 2580 (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2561) และแผนยุทธศาสตร์ของหลายองค์กรด้านพลังงาน เช่น แผนวิสาหกิจ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2564 – 2573 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2564) การกำหนดเป้าหมายในการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals) ขององค์กรสหประชาชาติ (United Nation, UN) (United Nation, 2015) การพิจารณาปัจจัยด้านความยั่งยืนร่วมกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยผู้ตัดสินใจหลายองค์กรที่มีภารกิจหน้าที่ต่างกันทำให้การตัดสินใจมีความซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP หรือ Fuzzy AHP) มาประยุกต์ใช้ เนื่องจาก FAHP เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยอย่างแพร่หลายว่าสามารถใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและทางเลือกของการตัดสินใจที่มี ความซับซ้อนได้เป็นอย่างดีอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาพลังงานของประเทศไทยต่อไป

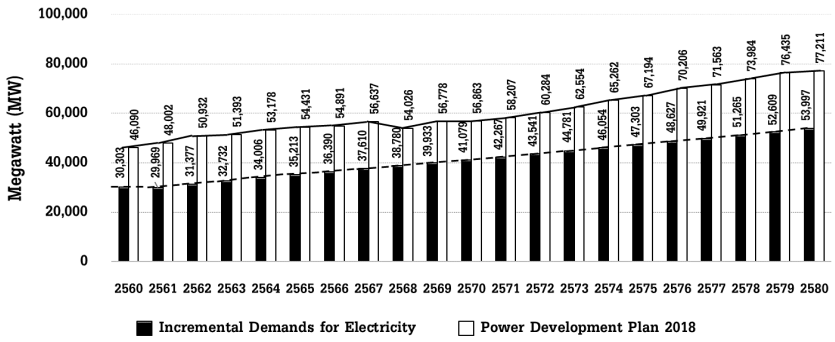


Fig. 1 Incremental Demands for Electricity and Power Development Plan

Source: Modified from PDP 2018 (Energy Policy and Planning Office, 2019)

งานวิจัยหลายเรื่องได้นำเสนอว่าปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความยั่งยืนของการพัฒนาโรงไฟฟ้าประกอบด้วย 5 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความคุ้มค่าของโครงการ (Value of Project) 2) ความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงาน (Energy Resource Reliability) 3) การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Emissions) 4) การสร้างอาชีพ (Job Creation) 5) การได้รับการยอมรับจากสาธารณะ (Gaining Public Acceptance) (Amer and Daim, 2011; Stremikiene et al., 2016; Zhang et al., 2015; Colak and Kanya, 2017; Janda and Tan, 2017; Wu et al., 2018; Lee and Chang, 2018; Omrani et al., 2018) ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Review of FAHP Research

Factors	Author								
	Amer and Daim (2011)	Stremikiene et al. (2016)	Zhang et al. (2015)	Colak and Kanya (2017)	Janda and Tan (2017)	Wu et al. (2018)	Lee and Chang (2018)	Omrani et al. (2018)	SUM
Value of Project	•	•	•		•	•	•	•	7
Energy Resource Reliability	•	•		•		•	•	•	6
GHG Emissions	•	•	•	•	•		•	•	7
Job Creation	•	•	•	•		•	•	•	7
Gaining Public Acceptance	•	•		•	•	•	•	•	7

งานวิจัยนี้ได้กำหนดทางเลือก 4 ทางเลือกจากแผน PDP 2018 ที่สามารถจำแนกชนิดของโรงไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิดหลัก คือ โรงไฟฟ้าถ่านหิน (Coal Power Plant) โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas Power Plant) และโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน (Renewable Power Plant) แต่เนื่องจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ในประเทศไทยยังไม่เคยมีการก่อสร้างมาก่อนซึ่งทั่วโลกก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายจึงเป็นอีกทางเลือกของงานวิจัยนี้ในการพัฒนาโรงไฟฟ้าอย่างยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยความยั่งยืนและหาค่าน้ำหนักของปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทยโดยใช้ FAHP

วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษางานวิจัยนี้ประกอบด้วย 1) การกำหนดโครงสร้างการตัดสินใจ 2) การสำรวจข้อมูลการตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบรายคู่จากแบบสอบถาม AHP ที่ใช้สัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ 3) การทดสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจและวิเคราะห์ด้วยวิธี FAHP ซึ่งการดำเนินการมีดังนี้

การกำหนดโครงสร้างการตัดสินใจ

โดยการจัดแบ่ง (Decomposition) โครงสร้างการตัดสินใจเป็นแบบลำดับชั้น (Hierarchy) ดัง Fig. 2 ประกอบด้วย โครงสร้างระดับที่ 1 เป็นระดับชั้นบนสุดของเป้าหมาย (Goal) โครงสร้างระดับที่ 2 ได้แก่ หลักเกณฑ์

(Criteria) เป็นปัจจัยที่ใช้ในการระบุความยั่งยืนของการพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทย และโครงสร้างระดับที่ 3 ได้แก่ ทางเลือก (Alternative) การพัฒนาโรงไฟฟ้าซึ่งใช้พลังงานในการผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

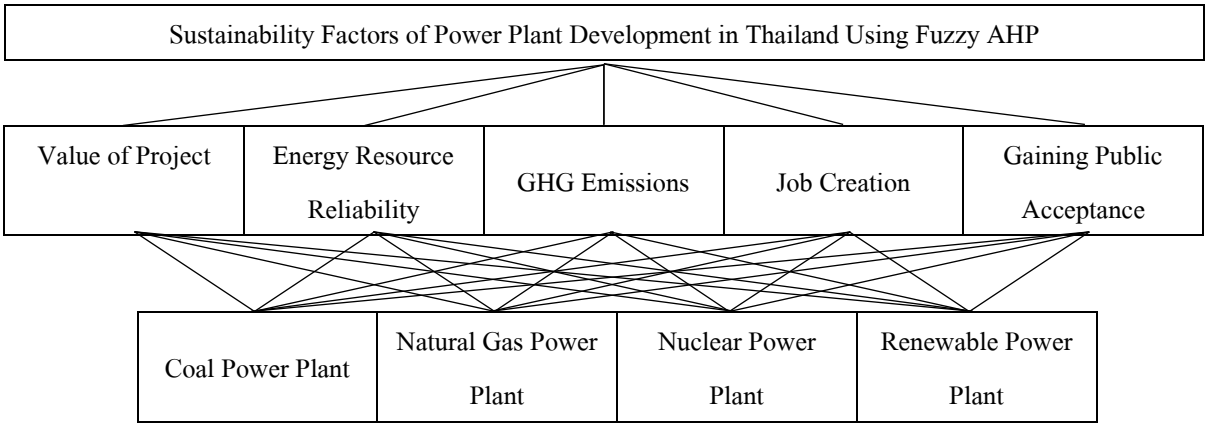


Fig. 2 Hierarchy Structure of Sustainability Factors Prioritization

Source: Modified from Saaty (Saaty, 2012)

การสำรวจข้อมูลการตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบรายคู่ (Pairwise Comparison)

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลการตัดสินใจจากผู้เชี่ยวชาญทั้งสิ้น 13 ท่าน จาก 2 กลุ่มเป้าหมายที่เป็นผู้กำหนดแผน PDP ของประเทศ คือ 1) กลุ่มผู้กำหนดนโยบายและ 2) กลุ่มผู้รับผิดชอบโครงการตั้งแต่ระดับปฏิบัติการจนถึงระดับผู้ช่วยผู้ว่าการประสบการณ์ทำงานอยู่ระหว่าง 5 – 39 ปี (เฉลี่ย 19 ปี) การตัดสินใจเป็นการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักความสำคัญ (w_i/ w_j) ระหว่างปัจจัยหรือทางเลือกเป็นรายคู่ i และ j ใด ๆ จำนวนทั้งหมด n ปัจจัยหรือทางเลือก โดยใช้ตัวเลขแทนค่าความสำคัญเชิงเปรียบเทียบของส่วนย่อยในแต่ละระดับชั้นเมื่อพิจารณาภายใต้ปัจจัยหรือทางเลือกค่ามาตรฐานที่นิยมใช้เปรียบเทียบความสำคัญที่มีระดับความสำคัญเป็นตัวเลข 1 ถึง 9 แสดงระดับความสำคัญที่เท่ากันจนถึงระดับความสำคัญที่สูงกว่าอย่างมาก (Saaty, 1990) ดัง Table 2 ข้อมูลจากแบบสอบถามที่ได้จะนำไปจัดเป็นตารางเมทริกซ์ของค่าเปรียบเทียบ

การทดสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจและวิเคราะห์ด้วยวิธี FAHP

ค่าระดับความสำคัญเปรียบเทียบรายคู่ที่ได้จากขั้นตอนที่ผ่านมาในแบบเมทริกซ์จะถูกนำไปทดสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจและนำไปวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยและค่าน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกต่อไปซึ่งการตัดสินใจมีความสอดคล้องของเหตุผล (Consistency Ratio, C.R.) เป็นสัดส่วนระหว่างค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, C.I.) และค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Index, R.I.) โดยค่า C.R. ที่ยอมรับได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเมทริกซ์ เช่น เมทริกซ์ขนาด 4 × 4 ค่า C.R. ที่ยอมรับได้ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.08 และเมทริกซ์ขนาดตั้งแต่ 5 x 5 ขึ้นไปค่า C.R. ที่ยอมรับได้ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 (Saaty, 1990; Kabir and Hasin, 2011) ทั้งนี้ค่า C.I. มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{max}-n) / (n-1)$ โดยที่ λ_{max} เป็นค่าสูงสุดของ Eigenvalue เมทริกซ์ A และค่า R.I. สำหรับจำนวน 5 ปัจจัยและ 4 ทางเลือกเป็น 1.11 และ 0.89 (Saaty, 2012) ตามลำดับค่าน้ำหนักคะแนนของรูปแบบทางเลือกนั้นหาได้จากการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของข้อมูลแต่ละรูปแบบปัจจัยหรือทางเลือกซึ่งผลรวมของค่าน้ำหนักความสำคัญ (W_i) ของปัจจัยหรือทางเลือกนั้นจะมีค่าเท่ากับ 1

การวิเคราะห์ข้อมูลของ FAHP เป็นการพัฒนาขั้นตอนในการคำนวณและวิเคราะห์จากการนำวิธีการของ AHP และ Fuzzy มาประยุกต์เข้าด้วยกัน เนื่องจาก AHP ไม่สามารถจัดการกับการตัดสินใจที่มีความคลุมเครือได้อย่างสมบูรณ์ โดยการแสดงตรรกะให้เป็นตัวเลขในรูปแบบสามเหลี่ยมเพราะง่ายต่อความเข้าใจและนำไปคำนวณได้โดยใช้สามเหลี่ยมตัวเลข Fuzzy กับการเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparison) ของ AHP การคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลในวิธีการ FAHP ทำได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยม คือวิธีของ Chang (Chang, 1996) โดยคงรูปแบบการเปรียบเทียบระดับความสำคัญเชิงคู่ของปัจจัย แต่ในการแปลงภาษาระดับความสำคัญในการเปรียบเทียบซึ่งเป็นภาษาพูดให้เป็นตัวเลข จะใช้ตัวเลข Fuzzy แบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Numbers, TFNs) มาแทนการใช้ตัวเลขเดี่ยว 1 – 9 โดยที่รูปแบบตัวเลข Fuzzy จะเป็นแบบ (l, m, u) มี m เป็นค่ากลางของ μM(x) และ l, u เป็นค่าขอบเขตล่างและบนตามลำดับซึ่งแทน ได้ด้วย Equation 1 สามารถแสดงเป็นตัวเลข Fuzzy สามเหลี่ยม (l, m, u) ได้ดัง Table 2

$$\mu(x/\tilde{M}) = \begin{cases} 0 & x < 1 \\ (x-1)/(m-1) & l \le x \le m \\ (u-x)/(u-m) & m \le x \le u \\ 0 & x > u \end{cases} \quad (1)$$

Table 2 Triangular Fuzzy Conversion Scale

Linguistic Scale	Priority	Triangular Fuzzy Scale	Reciprocal Scale
Equal importance	1	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Intermediate values between the two adjacent judgments	2	(3/4, 5/4, 7/4)	(4/7, 4/5, 4/3)
Weakly important	3	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Intermediate values between the two adjacent judgments	4	(5/4, 7/4, 9/4)	(4/9, 4/7, 4/5)
Strongly more important	5	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Intermediate values between the two adjacent judgments	6	(7/4, 9/4, 11/4)	(4/11, 4/9, 4/7)
Very strong more important	7	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Intermediate values between the two adjacent judgments	8	(9/4, 11/4, 13/4)	(4/13, 4/11, 4/9)
Absolutely more important	9	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

Source: Modified from (Saaty, 1990; Demirel1 et al., 2008)

คำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี (S_i) ด้วย Equation 2 $S_i = \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1}$ (2)

ต่อมาคำนวณหาระดับความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$, $S_j = (l_j, m_j, u_j)$; $i \neq j$ ตาม Equation 3

$$V(S_i \geq S_j) = \begin{cases} 1, & m_i \geq m_j \\ 0, & l_j \geq u_i \\ \dfrac{(l_j - u_i)}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)}, & Other \end{cases} \quad (3)$$

และคำนวณหาเวกเตอร์ความสำคัญ ด้วย Equation 4 $W_i' = minV(S_i \geq S_j \,|\, j = 1, 2, \ldots, m; i \neq j)$ (4)

จะได้เวกเตอร์ความสำคัญ W' ของเมทริกซ์ ดัง Equation 5 $W' = (W_1', W_2', \ldots, W_n')^T$ (5)

ทำการ Normalization ด้วย Equation 6 $W_i = \dfrac{W_i'}{\sum_{i=1}^{n} W_i'}$ (6)

สุดท้ายจะได้เวกเตอร์ความสำคัญใหม่ตาม Equation 7 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ (7)

โดยที่ $W_1, W_2, \dots, W_n$ คือค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยความยั่งยืนและทางเลือกในการพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทย

พบว่า การมีความมั่นคงทางพลังงานไฟฟ้า คือเป้าหมายของทั้ง 2 กลุ่ม ปัจจัยความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงานจึงมีค่าน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดถึงร้อยละ 29.2 มากกว่าค่าความสำคัญของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่กว่า 3 เท่า เนื่องจากกลุ่มเป้าหมายที่ให้การตอบแบบสอบถามเกือบทั้งหมดเป็นวิศวกรซึ่งมั่นใจในเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้าชนิดต่างๆ ปัจจุบันมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยลงอย่างมากเป็นผลให้ปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้รับค่าน้ำหนักความสำคัญน้อยที่สุด ร้อยละ 11.3 โดยทางเลือกที่ได้รับค่าความสำคัญมากที่สุดอันเป็นผลมาจากความสำคัญของปัจจัยความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงานและการได้รับการยอมรับจากสาธารณะคือโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติร้อยละ 30.5 ถัดมาโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่ร้อยละ 29.5 ใกล้เคียงกับอันดับที่ 1 ซึ่งในอนาคตพลังงานหมุนเวียนจะมาแทนที่โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน เนื่องจากการหมดไปของแหล่งพลังงาน และแม้ว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จะได้รับค่าน้ำหนักความสำคัญน้อยที่สุดร้อยละ 17.0 แต่ก็ยังมากพอที่จะทำให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องพิจารณาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ให้อยู่ ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศต่อไป ดัง Fig. 3

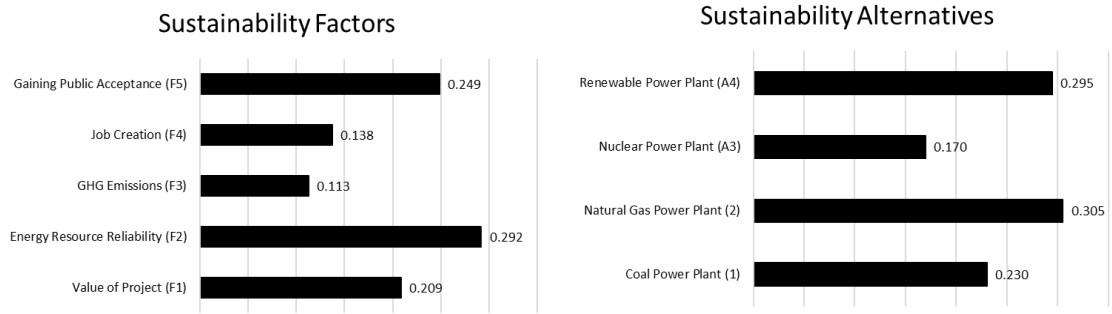


Fig. 3 Relative Weights of Sustainability Factors and Alternatives

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยความยั่งยืนจำแนกตามกลุ่มเป้าหมาย 2 กลุ่ม กลุ่มผู้รับผิดชอบโครงการให้ความสำคัญกับปัจจัยการยอมรับจากสาธารณะและปัจจัยความคุ้มค่าของโครงการมากกว่ากลุ่มผู้กำหนดนโยบายเนื่องจากเป็นกลุ่มที่ต้องดำเนินโครงการร่วมกับประชาชนอยู่เสมอและมักถูกประชาชนเข้าใจผิดเกี่ยวกับการปรับขึ้นค่าไฟฟ้าอยู่บ่อยครั้งซึ่งความคุ้มค่าของโครงการนั้นส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนค่าไฟฟ้า โดยทั้ง 2 กลุ่มเป้าหมายให้ความสำคัญกับปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุดซึ่งในงานวิจัยต่อไปควรสอบถามจากกลุ่มอื่นเพิ่มขึ้น ดัง Fig. 4

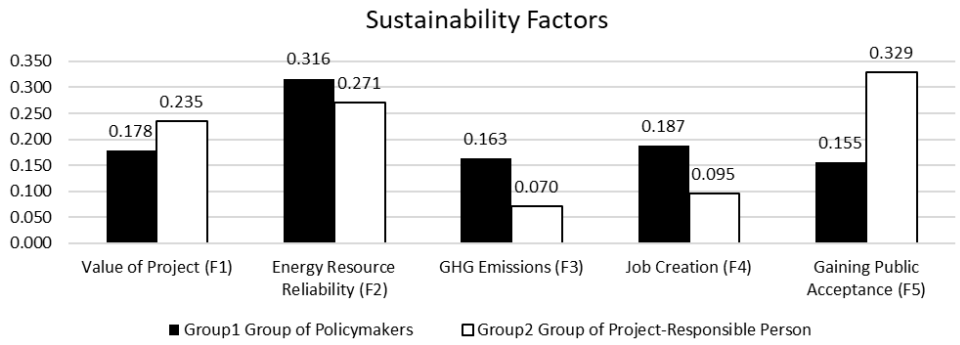


Fig. 4 Relative Weights of Sustainability Factors

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของทางเลือกจำแนกตามกลุ่มเป้าหมาย 2 กลุ่ม

กลุ่มผู้กำหนดนโยบายให้ความสำคัญมากที่สุดคือโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ร้อยละ 33.4 เนื่องจากกลุ่มนี้ประกอบไปด้วยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) เป็นหน่วยงานที่ให้ข้อมูลกับ สนพ. เพื่อใช้ในการจัดทำแผน PDP ของประเทศ โดยกลุ่มผู้รับผิดชอบโครงการนั้นได้ให้ความสำคัญกับทางเลือกโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติมากที่สุด ร้อยละ 32.4 อันเป็นผลมาจากนโยบายของหน่วยงานที่ให้ความสำคัญกับปัจจัยการได้รับการยอมรับจากสาธารณะและความเชื่อถือได้ของแหล่งพลังงานซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้ให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์น้อยที่สุดแต่ค่าน้ำหนักยังคงสูงอย่างมีนัยสำคัญที่กลุ่มผู้กำหนดนโยบายควรเสนอทางเลือกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เข้าไปในแผน PDP อีกครั้งหนึ่ง ดัง Fig. 5

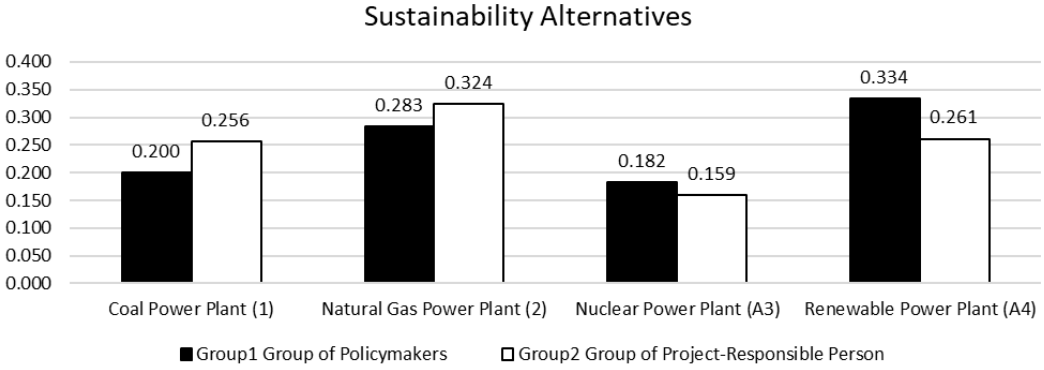


Fig. 5 Relative Weights of Sustainability Alternatives

สรุป

ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยความยั่งยืนและทางเลือกของการพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทยที่ได้รับค่าน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดคือปัจจัยความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงานและทางเลือกโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ FAHP เนื่องจากวิธีการนี้ เป็นการนำเอาทฤษฎีฟัซซีมาใช้ร่วมกับ AHP แบบเดิม เพราะสามารถจัดการกับการตัดสินใจที่มีความคลุมเครือได้อย่างสมบูรณ์ใกล้เคียงความคิดมนุษย์ ทั้งนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าในประเทศไทยอย่างยั่งยืนในมุมมองของกลุ่มผู้กำหนดนโยบายได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงานมากที่สุด โดยมุ่งเน้นการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน (Renewable Power Plant) ต่างจากมุมมองของผู้รับผิดชอบโครงการซึ่งต้องพบกับการสนับสนุนและการร้องเรียนจากประชาชนอยู่เสมอจึงได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยการยอมรับจากสาธารณะมากที่สุด และมุ่งเน้นการพัฒนาโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas Power Plant)

เป็นสำคัญ งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้กำหนดนโยบายของประเทศในการพัฒนาโรงไฟฟ้าอย่างยั่งยืนที่เป็นภารกิจสำคัญของ 2 กลุ่มนี้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากการสนับสนุนของบุคลากร สนพ. พพ. และ กฟผ. ซึ่งให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถามและสัมภาษณ์ รวมถึงให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยชิ้นนี้เป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2563. แผนวิสาหกิจการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2564–2573.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2560. ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561–2580.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2561. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580.

Amer, M., Daim, U.T., 2011. Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan. Elservier. Energy Sustain Dev. 15: 420–435.

Chang, D.Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. Eur. J. Oper. Res. 95: 649–655.

Colak, M., Kaya, I., 2017. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. Elsevier. Renewable Sustainable Energy Rev. 80: 840–853.

Demirel, T., Demirel, N.Ç., Kahraman, C., 2008. Fuzzy analytic hierarchy process and its application. In Fuzzy multi-criteria decision making. Springer Boston MA. 16: 53–83.

Janda, K., Tan, T. 2017. Integrated Multi-Attribute Value and Analytic Hierarchy Process Model of Sustainable Energy Development in Central Europe and East Asia. MPRA. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/76716, 14 February 2021.

Kabir G., Hasin, M.A.A., 2011. Comparative Analysis of AHP and Fuzzy AHP Models for Multicriteria Inventory Classification. International Journal of Fuzzy Logic Systems. 1: 1–16.

Nikolay, B. 2019. Sustainable Power Generation Current Status, Future Challenges, and Perspectives, Joe Hayton, UK.

Omrani, H., Alizadeh A., Emrouznejad A. 2018. Finding the optimal combination of power plants alternatives: a multi response Taguchi-neural network using TOPSIS and fuzzy best-worst method. J. Clean. Prod. 203: 210 – 223.

Saaty, T.L. 1990. The Analytic Hierarchy Process, paperback edition, RWS Publications, Pittsburgh.

Saaty, T.L. 2012. Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process, 2nd Ed. Mc Grow-Hill, New York

Saaty, T.L., Vargas L.G., 2001. Models, Methods Concepts & Applications of The Analytic Hierarchy Process, New York, USA appeared 1980, Mc Grow-Hill, New York.

Štreimikienė, D., Šliogerienė, J., Turskis, Z. 2016. Multi-criteria analysis of electricity generation technologies in Lithuania. Renewable Energy. 85: 148–156.

The 17 Goals | Sustainable Development. https://sdgs.un.org/goals, 14 February 2021.

Wu, Y., Xu, C., Zhang, T., 2018. Evaluation of renewable power sources using a fuzzy MCDM based on cumulative prospect theory: A case in China. Energy. 147: 1227–1239.

Zhang, L., Zhou, P., Newton, S., Fang, J.X., Zhou, D.Q., Zhang, L.P., 2015. Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: An improved multi-criteria decision making method. Energy. 90: 953–964.

การวิเคราะห์ปัจจัยความยั่งยืนในการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย โดยใช้ Fuzzy AHP

Analysis of sustainability factors for renewable power plant project development in Thailand using Fuzzy AHP

คนาพล แก้วแดง*, ฆนิศา รุ่งแจ้ง

Kanapol Kaewdang*, Kanisa Rungjang

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: kanapol.k@ku.th

บทคัดย่อ

แหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นทางเลือกในการส่งเสริมความยั่งยืนทางพลังงานของประเทศไทย การคัดเลือกรูปแบบของพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมมีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยความยั่งยืนและทางเลือกของรูปแบบโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, Fuzzy AHP) ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยความยั่งยืนที่มีความสำคัญสูงสุดคือ ความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงาน ราคาต้นทุนค่าไฟฟ้า และการยอมรับของสังคม และการสร้างอาชีพ และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามลำดับ และรูปแบบของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความสำคัญสูงสุดคือโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าชีวมวล โรงไฟฟ้าพลังน้ำ และโรงไฟฟ้าพลังงานลม ตามลำดับ ผลการวิจัยยังสามารถพัฒนาแบบจำลองสำหรับใช้คัดเลือกรูปแบบโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยต่อไป

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี, โครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน, ความยั่งยืน

Abstract

Renewable energy sources are an alternative to promoting Thailand's energy sustainability. The selection of appropriate renewable energy is complex. The objective of this research is to analyze the importance weight of sustainability factors and alternative renewable power plants through a fuzzy analytical hierarchy process (FAHP). The results of the research showed that the most important sustainability factor was energy source reliability, Electricity cost, Social acceptance, Job creation and GHG emissions, respectively. And the most important renewable energy power plant was solar power plants, Biomass power plant, Hydroelectric power plant and wind power plants, respectively. The research results can also be developed for selecting renewable energy power plants to benefit the renewable energy development of Thailand.

Keywords: Fuzzy Analytical Hierarchy Process, renewable energy power plant project, sustainability

คำนำ

ที่มาของงานวิจัย

แหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นทางเลือกในการส่งเสริมความยั่งยืนทางพลังงานของประเทศไทย การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยในอนาคตในปี พ.ศ. 2562 กระทรวงพลังงานโดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ภารกิจหลักในการเสนอแนะนโยบายและแผนการบริหารและพัฒนาพลังงานของประเทศ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งมีภารกิจหลักในเพื่อรักษาความมั่นคงด้านพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศได้คาดการณ์ความต้องการไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในอนาคตของไทยจะว่ามีสัดส่วนเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 ในปี พ.ศ. 2580 (สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22 ในปี พ.ศ. 2561 ถึง ร้อยละ 38 ในปี พ.ศ. 2580) โดยได้จัดทำแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580 (Power Development Plan 2018 หรือแผน PDP 2018) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) (ดัง Fig. 1) รูปแบบโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนมีหลายรูปแบบ อาทิเช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานชีวมวล เป็นต้น (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนดังกล่าวจึงต้องมีการคัดเลือกรูปแบบพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมกับประเทศซึ่งต้องพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ปัจจัยด้านความยั่งยืนของพัฒนาโรงไฟฟ้าของประเทศไทย ซึ่งความยั่งยืนด้านพลังงานได้ถูกกำหนดไว้ในแผนยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561 – 2580 (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2561) และแผนยุทธศาสตร์ของหลายองค์กรด้านพลังงาน เช่น แผนวิสาหกิจการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2564–2573 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2563) การกำหนดเป้าหมายในการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals) ขององค์กรสหประชาชาติ (United Nation, UN) (United Nations, 2015) การพิจารณาปัจจัยด้านความยั่งยืนร่วมกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องโดยผู้ตัดสินใจหลายองค์กรที่มีภารกิจหน้าที่ต่างกัน ทำให้การตัดสินใจมีความซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP หรือ Fuzzy AHP) มาประยุกต์ใช้ เนื่องจาก FAHP เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัย อย่างแพร่หลายว่าสามารถใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและทางเลือกของการตัดสินใจที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดีอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยต่อไป

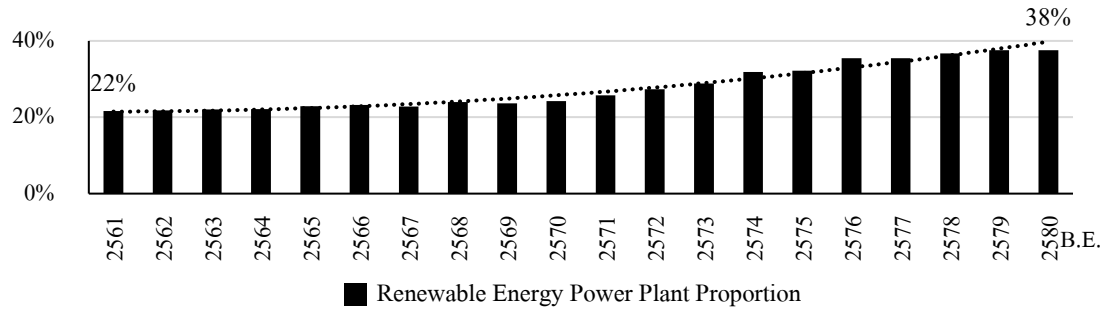


Fig. 1 Share of Electricity Produced from Renewable Energy Power Plants in Thailand

Source: Modified from PDP 2018 (Energy Policy and Planning Office, 2019)

งานวิจัยหลายเรื่องได้นำเสนอว่าปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความยั่งยืนของการพัฒนาโรงไฟฟ้าประกอบด้วย 5 ปัจจัย ได้แก่ 1)ราคาต้นทุนค่าไฟฟ้า (Electricity Cost) 2) ความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงาน (Energy Resource Reliability) 3) การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Emissions) 4) การสร้างอาชีพ (Job Creation) 5) การยอมรับของสังคม (Social Acceptance) (Kaya and Kahraman, 2010; Amer and Daim, 2011; Al Garni et al, 2016; Çolak and Kaya, 2017; Lee and Chang, 2018) ดังแสดงใน Table 1

Table 3 Review of Renewable Energy Research Under Sustainability Factor

Sustainability Factor		Reference Literature				
		Kaya and Kahraman (2010)	Amer and Daim (2011)	Al Garni et al. (2016)	Çolak and Kaya (2017)	Lee and Chang (2018)
Economic	Electricity Cost	*	*			*
	Energy Resource Reliability	*	*	*	*	
Environmental	GHG Emissions	*	*	*	*	*
Social	Job Creation	*	*	*	*	*
	Social Acceptance	*	*	*	*	*

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวม ศึกษา วิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนักปัจจัยความยั่งยืนที่มีต่อการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยแต่ละทางเลือก

วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย 1) ศึกษาปัจจัยความยั่งยืนและทางเลือก 2) กำหนดโครงสร้างการตัดสินใจตามทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ 3) เก็บข้อมูล 4) วิเคราะห์และทดสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจ และ 5) วิเคราะห์ค่าน้ำหนักตามทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี

1.1. ศึกษาปัจจัยความยั่งยืนและทางเลือก

งานวิจัยทำการศึกษา และรวบรวมปัจจัยความยั่งยืนจากงานวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงใน Table1

1.2. กำหนดโครงสร้างการตัดสินใจตามทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

จัดแบ่ง (Decomposition) โครงสร้างการตัดสินใจเป็นแบบลำดับชั้น (Hierarchy) ดัง Fig.2 ประกอบด้วย

1.2.1. โครงสร้างระดับที่ 1 เป็นเป้าหมาย (Goal) “พัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนอย่างยั่งยืน” ที่อยู่ระดับบนสุดของลำดับชั้นในการวิเคราะห์

1.2.2. โครงสร้างระดับที่ 2 เป็นปัจจัย (Factor) ความยั่งยืนในการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน กำหนดไว้ 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ราคาต้นทุนค่าไฟฟ้า (Electricity Cost) ความน่าเชื่อถือของ

แหล่งพลังงาน (Energy Resource Reliability) การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Emissions) การสร้างอาชีพ (Job Creation) และการยอมรับของสังคม (Social Acceptance)

1.2.3. โครงสร้างระดับที่ 3 เป็นรูปแบบทางเลือก (Alternative) ของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนกำหนดไว้ 4 ทางเลือก ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydroelectric Plants) โรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power Plant) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Power Plant) และโรงไฟฟ้าชีวมวล (Biomass Power Plant)

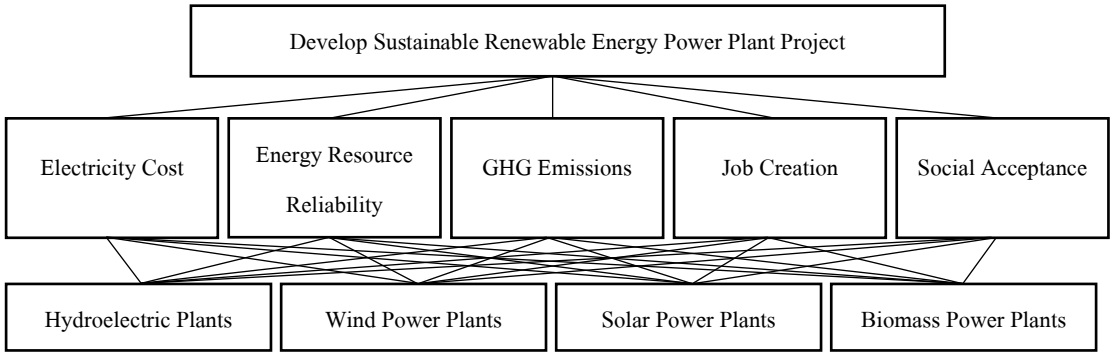


Fig. 2 Hierarchy Structure of Sustainable Development Prioritization

Source: Modified from Saaty (1990)

1.3. จัดทำแบบเก็บข้อมูล

จัดทำแบบสอบถามและเก็บข้อมูลโดยวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยในการคัดเลือกทางเลือกทีละคู่ (Pairwise) ตามมาตรฐานเปรียบเทียบความสำคัญรายคู่ (ดัง Table 3) ของกลุ่มเป้าหมายซึ่งมีส่วนร่วมในการตัดสินใจจัดทำแผนการจัดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย ประกอบไปด้วย 2 กลุ่มคือ

1.3.1. กลุ่มผู้ดำเนินการโครงการ คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

1.3.2. กลุ่มผู้กำหนดนโยบาย คือ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.)

1.4. วิเคราะห์และทดสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจ

ข้อมูลจากแบบสอบถามจะถูกจัดเป็นตารางเมตริกซ์ของค่าเปรียบเทียบ (Pairwise Comparison Matrix) ซึ่งสมาชิกของเมตริกซ์กำหนดเป็นค่าน้ำหนักความสำคัญที่เปรียบเทียบเป็นรายคู่ ดัง Table 2

Table 4 Pairwise Comparison Matrix

		Criteria		
		A_1	…	A_n
Criteria	A_1	w_1/w_1	…	w_1/w_n
	⋮	⋮	…	⋮
	A_n	w_n/w_1	…	w_n/w_n

Source: Modified from Wind and Saaty (1980)

คำนวณหาค่าอัตราความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.) และค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Index: R.I.) ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (C.R.)

กรณีพิจารณาปัจจัย มากกว่าหรือเท่ากับ 5 ปัจจัย ไม่ควรมีค่าเกินร้อยละ 10 และสำหรับ 4 ปัจจัย ไม่ควรเกินร้อยละ 9 ทั้งนี้ค่า Consistency Index (C.I.) มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{max} - n) / (n-1)$ โดยที่ (λ_{max}) เป็นค่าสูงสุดของ Eigen Value ของเมทริกซ์ A

1.5. วิเคราะห์ค่าน้ำหนักตามทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP)

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซีมีหลากหลายวิธีการ วิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมคือวิธีการวิเคราะห์ขอบเขตของ Chang, D. Y. (1996) โดยตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Number) ดังแสดงใน Table 53 จะถูกนำมาใช้แทนการใช้ตัวเลขเดี่ยวสำหรับเปรียบเทียบระดับความสำคัญของปัจจัย

Table 5 Triangular Fuzzy Conversion Scale

Linguistic Scale	Priority	Triangular Fuzzy Scale	Reciprocal Scale
Equally Important	1	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Intermediate Values between The Two Adjacent Judgments	2	(3/4, 5/4, 7/4)	(4/7, 4/5, 4/3)
Weakly Important	3	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Intermediate Values between The Two Adjacent Judgments	4	(5/4, 7/4, 9/4)	(4/9, 4/7, 4/5)
Strongly More Important	5	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Intermediate Values between The Two Adjacent Judgments	6	(7/4, 9/4, 11/4)	(4/11, 4/9, 4/7)
Very Strong More Important	7	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Intermediate Values between The Two Adjacent Judgments	8	(9/4, 11/4, 13/4)	(4/13, 4/11, 4/9)
Absolutely More Important	9	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

Source: Modified from Bozbura et al. (2007)

คำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซีจาก Equation 1

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \right]^{-1} \tag{1}$$

ต่อมาคำนวณหาระดับความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$, $S_j = (l_j, m_j, u_j)$; $i \neq j$ ตาม Equation 2 และคำนวณหาเวกเตอร์ความสำคัญ ด้วยสมการที่ 3 จะได้เวกเตอร์ความสำคัญ W' ของเมทริกซ์ ดัง Equation 4

$$V(S_i \geq S_j) = \begin{cases} 1, & m_i \geq m_j \\ 0, & l_j \geq u_i \\ \dfrac{(l_j - u_i)}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)} & Other \end{cases} \tag{2}$$

$$W_i' = minV(S_i \geq S_j \,|\, j = 1, 2, \dots, m; i \neq j), W' = (W_1', W_2', \dots, W_n')^T \tag{3), (4}$$

ทำการ Normalization ด้วย Equation 5 จะได้เวกเตอร์ความสำคัญใหม่ตาม Equation 6 โดยที่ $W_1, W_2, \dots, W_n$ คือค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญ

$$W_i = W_i' / \textstyle\sum_{i=1}^{n} W_i', W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \tag{5), (6}$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปัจจัยความยั่งยืนของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยความยั่งยืนของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยเรียงลำดับตามความสำคัญ ได้ดังนี้ ความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงาน (ร้อยละ 37.6) ราคาต้นทุนค่าไฟฟ้า (ร้อยละ 27.7) การยอมรับของสังคม (ร้อยละ 22.9) การสร้างอาชีพ (ร้อยละ 8.7) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ร้อยละ 3.1) ตามลำดับ ดัง Fig.3

ปัจจัยความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงานมีค่าน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากเป็นปัจจัยที่เป็นจุดอ่อนของพลังงานหมุนเวียน และส่งผลต่อความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ ปัจจัยการสร้างอาชีพ และปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีค่าน้ำหนักความสำคัญไม่ถึงร้อยละ 10 เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนมีการจ้างงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่น

ผลการวิเคราะห์แสดงความแตกต่างของค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยความยั่งยืนของแต่ละกลุ่มเป้าหมาย ดัง Fig. 4 พบว่ากลุ่มผู้ดำเนินการโครงการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญกับปัจจัยการยอมรับของสังคมมากกว่ากลุ่มผู้กำหนดนโยบายร้อยละ 28 เนื่องจากการทำงานต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับชุมชนและสังคมตลอดระยะเวลาดำเนินงานโครงการ กลุ่มผู้กำหนดนโยบายให้ค่าน้ำหนักความสำคัญกับปัจจัยความเชื่อถือได้ของแหล่งพลังงานมากกว่ากลุ่มผู้ดำเนินการโครงการถึงร้อยละ 25 เนื่องจากคำนึงถึงความมั่นคงทางพลังงานของประเทศเป็นสำคัญ

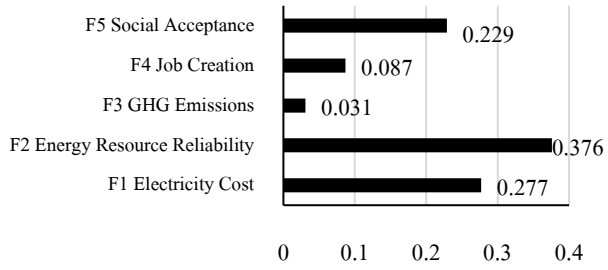


Fig. 3 Relative Weights of Sustainability Factor

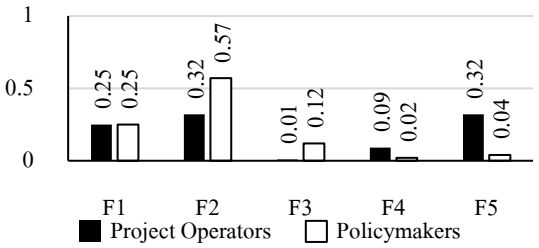


Fig. 4 Relative between Target Group Classification and Sustainability Factor

ทางเลือกของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

ทางเลือกของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยเรียงลำดับตามความสำคัญ ได้ดังนี้ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ร้อยละ 28.5) โรงไฟฟ้าชีวมวล (ร้อยละ 26.2) โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (ร้อยละ 25.4) และโรงไฟฟ้าพลังงานลม (ร้อยละ 19.9) ตามลำดับ ดัง Fig. 5

โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าชีวมวล และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญใกล้เคียงกัน โรงไฟฟ้าพลังงานลมมีค่าน้ำหนักความสำคัญน้อยที่สุดเนื่องจากมีความผันผวนของแหล่งพลังงานมาก ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางพลังงาน

ผลการวิเคราะห์แสดงความแตกต่างของค่าน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกของแต่ละกลุ่มเป้าหมาย ดัง Fig. 6 พบว่า ค่าน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกจากทั้ง 2 กลุ่มเป้าหมายใกล้เคียงกัน

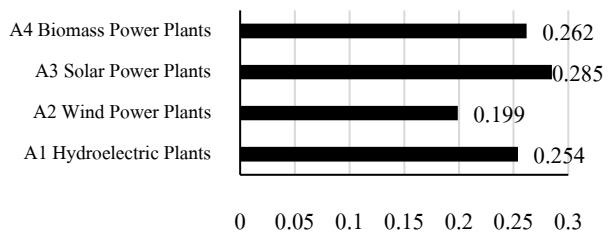


Fig. 5 Relative Weights of Alternative

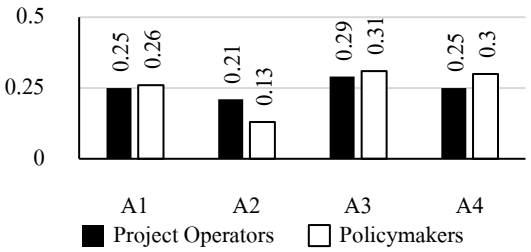


Fig. 6 Relative between Target Group Classification and Alternative

แบบจำลองความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนักปัจจัยความยั่งยืนและทางเลือกของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

จากผลการวิจัยสามารถนำค่าน้ำหนักของปัจจัยและทางเลือกของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย สามารถพัฒนาเป็นแบบจำลองความสัมพันธ์ได้ดังนี้

โรงไฟฟ้าพลังน้ำ = 0.254 (F1) + 0.301 (F2) + 0.147 (F3) + 0.096 (F4) + 0.202 (F5)

โรงไฟฟ้าพลังงานลม = 0.296 (F1) + 0.142 (F2) + 0.183 (F3) + 0.084 (F4) + 0.295 (F5)

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ = 0.191 (F1) + 0.322 (F2) + 0.093 (F3) + 0.093 (F4) + 0.300 (F5)

โรงไฟฟ้าชีวมวล = 0.234 (F1) + 0.386 (F2) + 0.029 (F3) + 0.181 (F4) + 0.170 (F5)

สรุป

ความน่าเชื่อถือของแหล่งพลังงานเป็นปัจจัยความยั่งยืนที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความมั่นคงทางพลังงานของประเทศไทยและเป็นจุดอ่อนของพลังงานหมุนเวียน โดยกลุ่มเป้าหมายทั้ง 2 กลุ่มให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยความยั่งยืนแตกต่างกันไปตามหน้าที่ความรับผิดชอบ และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นรูปแบบโรงไฟฟ้าที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากแหล่งพลังงานมีความน่าเชื่อถือสูง มีการใช้กันอย่างแพร่หลายทำให้เป็นที่ยอมรับของสังคมและมีราคาถูก จากผลการวิจัยสามารถพัฒนาแบบจำลองสำหรับใช้คัดเลือกโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยจากปัจจัยความยั่งยืนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนจากผู้ปฏิบัติงานและผู้บริหารสำนักนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ให้ความร่วมมือในการสัมภาษณ์ ตอบแบบสอบถาม และให้ข้อเสนอแนะซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2560. ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561–2580.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2561. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2563. แผนวิสาหกิจการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2564–2573.

Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., Al-Haddad, K. 2016. A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. Sustain. Energy Technol. Assess. 16: 137–150.

Amer, M., Daim, T.U. 2011. Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan. Energy Sustain Dev. 15: 420–435.

Bozbura, F.T., Beskese, A., Kahraman, C. 2007. Prioritization of human capital measurement indicators using fuzzy AHP. Expert Syst. Appl. 32: 1100–1112.

Chang, D.Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. Eur. J. Oper. Res. 95: 649–655.

Çolak, M., Kaya, I. 2017. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. Renew. Sust. Energ. Rev. 80: 840–853.

Kaya, T., Kahraman, C. 2010. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. Energy. 35: 2517–2527.

Lee, H.C., Chang, C.T. 2018. Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. Renew. Sust. Energ. Rev. 92: 883–896.

Saaty, T.L. 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. Eur. J. Oper. Res. 48: 9–26.

Saaty, T.L. 2001. Fundamentals of the analytic hierarchy process. In: Schmoldt, D.L., Kangas, J., Mendoza, G.A., Pesonen, M. (Eds.). The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 15–35.

United Nations. 2015. Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf, 4 February 2021.

Wind, Y., Saaty, T.L. 1980. Marketing applications of the analytic hierarchy process. Manage Sci. 26: 641–658.

การวิเคราะห์การเลือกรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างเรือข้ามฟากกับสะพานคนเดิน กรณีศึกษา: ท่าพระจันทร์-ท่าวังหลัง

Travel mode choice analysis of crossing the Chao Phraya River between ferry and pedestrian bridge: A case study of Tha Phra Chan - Tha Wang Lang

ธิติวุฒิ อดิสร*, ชวเลข วณิชเวทิน, เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล

Thitivud Adisorn*, Chavalek Vanichavetin, Ackchai Sirikijpanichkul

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

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

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

บทคัดย่อ

การเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาโดยอาศัยเรือข้ามฟากในปัจจุบัน มีข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและความล่าช้า สะพานคนเดินจึงเป็นหนึ่งทางเลือกที่สำคัญที่จะช่วยลดข้อจำกัดในการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาได้ โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีสำรวจข้อมูลแบบ Stated Preference ศึกษาการเลือกรูปแบบการเดินทางภายใต้สถานการณ์สมมติ ผู้วิจัยได้เสนอให้ผู้เดินทางเลือกระหว่างใช้เรือข้ามฟากแบบเดิม หรือเปลี่ยนมาใช้สะพานคนเดินข้ามแม่น้ำแบบใหม่ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สำรวจกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ 2) กลุ่มที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ และ 3) กลุ่มที่ไม่เคยใช้เรือข้ามฟาก และนำข้อมูลที่สำรวจมาสร้างแบบจำลองโลจิททวินามแยกตามกลุ่มตัวอย่าง ผลการศึกษาแสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้สะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ ซึ่งสามารถนำมาใช้คาดการณ์ผลกระทบต่อปริมาณผู้ใช้เรือข้ามฟาก โดยพบว่าผู้ใช้เรือข้ามฟากบางส่วนมีแนวโน้มจะเปลี่ยนมาใช้สะพานคนเดินเพิ่มขึ้น ผลจากงานวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาสะพานคนเดินข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาต่อไป

คำสำคัญ: ทางเลือกในการเดินทาง, แบบจำลองโลจิททวินาม, เรือข้ามฟากแม่น้ำ, สะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ

Abstract

Ferry is one of the most popular modes for commuters who need to cross the Chao Phraya River. However, the concern is raised on safety and efficiency such as delay and congestion. Pedestrian bridge is one of the alternatives that can be taken into considerations. This research focused on the travel mode choice study under hypothetical scenarios which are based on the stated preference survey. In a questionnaire, participants were asked whether they would cross the river by a traditional river-crossing ferry or a new model of pedestrian bridge. The survey consisted of three target groups 1) People who use ferries regularly. 2) People who rarely use ferries. 3) People who have never used a ferry. The survey data were used as an input to develop a Binary Logit Model for each sample target group. The factors affecting the decision to use the pedestrian bridge across the river were determined. The model was applied to predict the impact on the number of ferry passengers and found that some passengers would shift to the pedestrian bridge. The results of this research can be used as a guideline for the further development of the pedestrian bridge across the Chao Phraya River

Keywords: Binary Logit Model**,** ferry, pedestrian bridge across the river, travel mode choice

คำนำ

การเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาโดยใช้เรือข้ามฟากในปัจจุบันมีผู้ใช้บริการจำนวนมาก จากรายงานประจำปีงบประมาณ 2562 ของกรมเจ้าท่า ระบุว่าในปี 2562 เรือข้ามฟากแม่น้ำเจ้าพระยามีผู้ใช้บริการ 33,926,929 คน และมีจำนวนเที่ยวเรือให้บริการมากถึง 789,612 เที่ยวเรือ (กรมเจ้าท่า, 2563) แต่เรือข้ามฟากยังมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและความล่าช้า โดยในปัจจุบันมีทางเลือกในการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาหลากหลายมากขึ้น ซึ่งสะพานคนเดินข้ามแม่น้ำถือเป็นหนึ่งทางเลือกที่สำคัญที่จะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวได้

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการเลือกรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างท่าพระจันทร์-ท่าวังหลัง ภายใต้สถานการณ์สมมติ โดยให้ผู้เดินทางเลือกระหว่างเดินทางด้วยเรือข้ามฟากแบบเดิม หรือเปลี่ยนมาใช้การเดินทางรูปแบบใหม่ที่ผู้วิจัยได้กำหนดขึ้น คือ สะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา และคาดการณ์ผลกระทบในด้านปริมาณผู้ใช้บริการเรือข้ามฟาก โดยมีขอบเขตการศึกษา คือ การเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างท่าพระจันทร์-ท่าวังหลัง ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ คือ ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา และแนวโน้มของปริมาณผู้ใช้บริการเรือข้ามฟากที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงบริการเรือข้ามฟาก หรือพัฒนาสะพานคนเดินข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาเส้นทางใหม่ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การสำรวจข้อมูล

การศึกษานี้ใช้การสำรวจข้อมูลวิธี Stated Preference (SP) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเดินทางในทางเลือกที่ยังไม่เกิดขึ้นจริง โดยผู้วิจัยได้จำลองทางเลือกการเดินทางรูปแบบใหม่ คือ การข้ามฟากแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างท่าพระจันทร์-ท่าวังหลัง ด้วยสะพานคนเดิน ความยาว 225 เมตร ความกว้าง 8 เมตร ใช้เวลาเดิน 5 นาที และไม่คิดค่าบริการ โดยผู้วิจัยได้กำหนดคุณลักษณะที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ให้สะพาน 3 คุณลักษณะ ได้แก่ ความปลอดภัยในการให้บริการ (พนักงานรักษาความปลอดภัยและกล้องวงจรปิด) สิ่งอำนวยความสะดวก (ลิฟต์ บันไดเลื่อน และหลังคา) และภูมิทัศน์ที่สวยงาม (การปลูกต้นไม้จัดสวน และที่นั่งพักผ่อนบนสะพาน) ซึ่งแต่ละคุณลักษณะมีระดับการให้บริการ 2 ระดับ คือ มีการให้บริการ และไม่มีการให้บริการ ซึ่งสามารถนำมาจำลองเป็นทางเลือกได้ทั้งหมด 8 สถานการณ์ (ประไพศรี และ พงศ์ชนัน, 2551) ในการสำรวจข้อมูลผู้วิจัยได้สำรวจข้อมูล 3 ประเภท คือ ข้อมูลลักษณะประชากรศาสตร์ของผู้เดินทาง ข้อมูลเกี่ยวกับการเดินทางด้วยเรือข้ามฟากในปัจจุบัน และข้อมูลการเลือกใช้รูปแบบการเดินทางภายใต้สถานการณ์สมมติ โดยผู้วิจัยได้สำรวจกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ 2) กลุ่มที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ และ 3) กลุ่มที่ไม่เคยใช้เรือข้ามฟาก ซึ่งกำหนดให้จำนวนข้อมูลในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง มากกว่า 75 คน (Ortúzar and Willumsen, 2001)

การพัฒนาแบบจำลอง

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย คือ แบบจำลองโลจิททวินาม (Binary Logit Model) เพื่อใช้ในการคาดการณ์ความน่าจะเป็นที่ผู้เดินทางจะเลือกใช้สะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ ซึ่งแบบจำลองแสดงดัง Equation 1 (Train, 2009)

$$P_{Bridge} = \frac{e^{(U_{Bridge}-(U_{Ferry}))}}{1+e^{(U_{Bridge}-(U_{Ferry}))}} \quad (1)$$

โดยที่ P_{Bridge} คือ ความน่าจะเป็นที่ผู้เดินทางจะเลือกใช้สะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ

U_{Bridge} คือ อรรถประโยชน์จากการเดินทางด้วยสะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ

U_{Ferry} คือ อรรถประโยชน์จากการเดินทางด้วยบริการเรือข้ามฟากแม่น้ำ

ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบโครงสร้างของแบบจำลอง และนำข้อมูลที่สำรวจได้มาประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลอง จากนั้นทำการตรวจสอบค่าทางสถิติและความเหมาะสมของแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยการตรวจสอบค่าทางสถิติได้ทำการพิจารณา 2 ส่วน คือ 1) ตรวจสอบนัยสำคัญของตัวแปร โดยพิจารณาจากค่าสัมบูรณ์ของค่าสถิติ t ของตัวแปร หากมีค่ามากกว่า 1.96 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสมการอรรถประโยชน์ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (Louviere et al., 2000) และ 2) ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่าดัชนีความสอดคล้อง ρ^2 ของแบบจำลอง หากมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2–0.4 แสดงว่าแบบจำลองนั้นมีความเหมาะสมและสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของผู้เดินทางได้อย่างแม่นยำ (Louviere et al., 2000) เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วสามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา และคาดการณ์ผลกระทบในด้านปริมาณผู้ใช้บริการเรือข้ามฟาก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการเก็บข้อมูลโดยแบบสอบถามจำนวน 280 ชุด สามารถจำแนกตามกลุ่มตัวอย่างได้ดัง Table 1

Table 1 Number of travelers classified by target groups

Target groups	Number of travelers
People who use ferries regularly (more than 3 times per week)	120
People who rarely use ferries (less than 2 times per week)	80
People who have never used a ferry	80
Total	280

การพัฒนาแบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ท่าพระจันทร์-ท่าวังหลัง โดยใช้แบบจำลองโลจิททวินาม (Binary Logit Model) ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่สำรวจมากำหนดเป็นตัวแปร แสดงดัง Table 2

Table 2 Definition of variables in the Binary Logit Model

No.	Variables	Symbols
1	Gender	GENDER (Female =0, Male =1)
2	Age	AGE (Less than or equal to 30 years =1, Over 30 years =2)
3	Education level	EDU (Undergraduate =1, Postgraduate =2)
4	Occupations	OCC (Reference = Student)
5	Car or motorcycle ownership	CAR (Not Owned =0, Owned =1)
No.	Variables	Symbols
6	Purposes of using the ferry service	OJT (Reference = Go to the hospital)
7	Travel time (From waiting the ferry to the opposite pier)	FERRYTIME (Less than or equal to 5 min. =1, 5-10 min. =2, 11-15 min. =3, 16-20 min. =4, Over 20 min. =5)
8	Frequency of ferry usage per week	FREQ (3-6 times =1, 7-10 times =2, Over 10 =3)
9	Ferry fare	COST (Normal person =3.5, The elderly =2)
10	Safety services (Security guard and CCTV)	SPSAFETY (Not available =0, Available =1)
11	Facilities (elevator, escalator, and roof)	SPFAC (Not available =0, Available =1)
12	Landscape design (Trees and relaxing seats)	SPLAND (Not available =0, Available =1)

การกำหนดรูปแบบโครงสร้างของแบบจำลอง

ข้อมูลที่นำมาพัฒนาแบบจำลองมี 3 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลลักษณะประชากรศาสตร์ของผู้ตอบแบบสอบถาม ข้อมูลเกี่ยวกับการเดินทางด้วยเรือข้ามฟากแม่น้ำเจ้าพระยาในปัจจุบัน และข้อมูลการเลือกใช้รูปแบบการเดินทางภายใต้สถานการณ์สมมติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดการพิจารณาแบบจำลองออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้

1. แบบจำลองรูปแบบที่ 1 พิจารณาแบบจำลองจากตัวแปรคุณลักษณะของสะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ โดยสมการจะมีแค่อรรถประโยชน์ที่เกิดจากสะพานเท่านั้น ดังแสดงตาม Equation 2

$$U_{Bridge} = \beta_0+\beta_1(SPSAFETY)+\beta_2(SPFAC)+\beta_3(SPLAND) \quad (2)$$

2. แบบจำลองรูปแบบที่ 2 พิจารณาแบบจำลองจากตัวแปรลักษณะประชากรศาสตร์ของผู้ตอบแบบสอบถามร่วมกับตัวแปรคุณลักษณะของสะพาน โดยสมการจะมีแค่อรรถประโยชน์ที่เกิดจากสะพานเท่านั้น ดังแสดงตาม Equation 3

$$U_{Bridge} = \beta_0+\beta_1(SPSAFETY)+\beta_2(SPFAC)+\beta_3(SPLAND)+\beta_4(GENDER) +\beta_5(AGE)+\beta_6(EDU)+\beta_7(OCC(1))+\beta_8(OCC(2))+\beta_9(OCC(3))+\beta_{10}(CAR) \quad (3)$$

3. แบบจำลองรูปแบบที่ 3 พิจารณาแบบจำลองจากตัวแปรการเดินทางด้วยเรือข้ามฟากในปัจจุบัน ร่วมกับตัวแปรลักษณะประชากรศาสตร์ และตัวแปรคุณลักษณะของสะพาน ดังแสดงตาม Equation 4

$$U_{Bridge} - U_{Ferry} = \beta_0+\beta_1(SPSAFETY)+\beta_2(SPFAC)+\beta_3(SPLAND)$$
$$+\beta_4(GENDER)+\beta_5(AGE)+\beta_6(EDU)+\beta_7(OCC(1))+\beta_8(OCC(2))$$
$$+\beta_9(OCC(3))+\beta_{10}(CAR)+\beta_{11}(OJT(1))+\beta_{12}(OJT(2))+\beta_{13}(OJT(3))$$
$$+\beta_{14}(FERRYTIME)+\beta_{15}(FREQ)+\beta_{16}(COST) \quad (4)$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ ซึ่งมีความถี่ในการใช้เรือข้ามฟากเพียงค่าเดียว จึงส่งผลให้ไม่มีตัวแปร FREQ ในแบบจำลองรูปแบบที่ 3 (สมการที่ 4) และเมื่อพิจารณาถึงแบบจำลองของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เคยใช้เรือข้ามฟาก ซึ่งกลุ่มนี้จะไม่มีตัวแปรจากการเดินทางด้วยเรือข้ามฟากแม่น้ำเจ้าพระยาในปัจจุบัน ส่งผลให้ไม่มีแบบจำลองรูปแบบที่ 3 (Equation 4) ในกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เคยใช้เรือข้ามฟาก

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองและการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม

ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองจำแนกตามกลุ่มตัวอย่าง แสดงตัง Table 3

Table 3 The estimated coefficients of the variables in the appropriate model classified by target group

Variables	People who use ferries regularly. Model type 3		People who rarely use ferries. Model type 3		People who have never used a ferry. Model type 2	
	Coefficient	t-stat	Coefficient	t-stat	Coefficient	t-stat
Constant	-4.776	-5.49	-6.949	-9.67	0.714	1.93
SPSAFETY	2.461	12.35	2.019	8.62	2.696	10.13
SPFAC	1.897	9.97	1.826	7.92	2.539	9.68
SPLAND	0.597	3.41	0.733	3.41	1.206	5.16
GENDER	0.533	2.78	0.787	3.37	1.434	5.80
AGE	-0.834	-3.42	0.515	2.07	-2.430	-9.20
EDU	-0.733	-3.45	NS*	NS*	NS*	NS*
OCC(1)	-0.778	-3.33	-0.791	-2.84	NS*	NS*
OCC(3)	NS*	NS*	-0.982	-3.10	NS*	NS*
CAR	NS*	NS*	0.530	2.04	NS*	NS*
OJT(1)	-0.597	-2.34	1.563	2.81	NS*	NS*
OJT(2)	-0.701	-3.04	NS*	NS*	NS*	NS*
FERRYTIME	1.201	10.29	1.560	9.47	NS*	NS*
FREQ	0.451	2.58	NS*	NS*	NS*	NS*
COST	0.399	2.13	NS*	NS*	NS*	NS*
	Statistical test					
ρ^2	0.364		0.341		0.400	
% Correct Prediction	80.40 %		78.30 %		81.60 %	

*NS is not significant

1. แบบจำลองของกลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำที่เหมาะสมที่สุด คือแบบจำลองรูปแบบที่ 3 โดยแบบจำลองมีค่า ρ^2 เท่ากับ 0.364 ซึ่งแบบจำลองสามารถแสดงได้ตาม Equation 5

$$U_{Bridge}-U_{Ferry} = - 4.776 + 2.461(SPSAFETY) + 1.897(SPFAC) + 0.597(SPLAND) + 0.533(GENDER) - 0.834(AGE) - 0.733(EDU) - 0.778(OCC(1)) - 0.597(OJT(1)) - 0.701(OJT(2)) + 1.201(FERRYTIME) + 0.451(FREQ) + 0.399(COST) \quad (5)$$

โดยที่ OCC(1) คือ อาชีพข้าราชการ/พนักงานรัฐวิสาหกิจ

OJT(1) คือ จุดประสงค์ในการเดินทางคือเดินทางไปโรงเรียน/มหาวิทยาลัย

OJT(2) คือ จุดประสงค์ในการเดินทางคือเดินทางไปทำงาน

จากค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำได้ แสดงดัง Table 4

Table 4 Factors influencing the decision to use the pedestrian bridge of people who use ferries regularly

Factors A*		Factors B**
1) Male travelers	2) Frequency of ferry usage	1) Travelers aged over 30 years old.
3) Ferry fare	4) Safety services of the bridge	2) Traveler's education level.
5) Bridge facilities		3) Travelers who are civil servant.
6) Landscape design of the bridge		4) Travelers who intend to go to school / university.
7) Travel time		5) Travelers who intend to go to work.

*Factors A are positively associated with pedestrian bridge usage.

**Factors B are negatively associated with pedestrian bridge usage.

2. แบบจำลองของกลุ่มที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำที่เหมาะสมที่สุด คือแบบจำลองรูปแบบที่ 3 โดยแบบจำลองมีค่า ρ^2 เท่ากับ 0.341 ซึ่งแบบจำลองสามารถแสดงได้ตาม Equation 6

$$U_{Bridge}-U_{Ferry} = - 6.949 + 2.019(SPSAFETY) + 1.826(SPFAC) + 0.733(SPLAND) + 0.787(GENDER) +0.515(AGE) - 0.791(OCC(1)) - 0.982(OCC(3)) +0.530(CAR) +1.563(OJT(1)) +1.560(FERRYTIME) \quad (6)$$

โดยที่ OCC(3) คือ อาชีพเจ้าของกิจการ/รับจ้าง ฯลฯ

จากค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำได้ แสดงดัง Table 5

Table 5 Factors influencing the decision to use the pedestrian bridge of people who rarely use ferries

Factors A*	Factors B**
1) Male travelers 2) Travelers aged over 30 years old. 3) Travel time 4) Safety services of the bridge 5) Bridge facilities 6) Landscape design of the bridge 7) Travelers have their own car or motorcycle. 8) Travelers who intend to go to school / university.	1) Travelers who are civil servant. 2) Travelers who are business owner/freelancer.

*Factors A are positively associated with pedestrian bridge usage.

**Factors B are negatively associated with pedestrian bridge usage.

3. แบบจำลองของกลุ่มที่ไม่เคยใช้เรือข้ามฟากที่เหมาะสมที่สุด คือแบบจำลองรูปแบบที่ 2 โดยแบบจำลองมีค่า ρ^2 เท่ากับ 0.400 ซึ่งแบบจำลองมีแค่อรรถประโยชน์ที่เกิดจากสะพานเท่านั้น สามารถแสดงได้ตาม Equation 7

$$U_{Bridge} = 0.714+2.696(SPSAFETY) +2.539(SPFAC) +1.206(SPLAND) +1.434(GENDER) -2.430(AGE) \quad (7)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เคยใช้เรือข้ามฟากได้ แสดงดัง Table 6

Table 6 Factors influencing the decision to use the pedestrian bridge of people who have never used a ferry

Factors A*	Factors B**
1) Male travelers 2) Safety services of the bridge 3) Bridge facilities 4) Landscape design of the bridge	1) Travelers aged over 30 years old.

*Factors A are positively associated with pedestrian bridge usage.

**Factors B are negatively associated with pedestrian bridge usage.

การคาดการณ์ผลกระทบในด้านปริมาณผู้ใช้เรือข้ามฟาก ที่เกิดจากสะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ

การคาดการณ์ผลกระทบ ผู้วิจัยได้เลือกใช้แบบจำลองเหมาะสมที่สุดของกลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำและกลุ่มที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ ส่วนในกลุ่มที่ไม่เคยใช้เรือข้ามฟากจะไม่นำมาคาดการณ์ผลกระทบเนื่องจากประชากรในกลุ่มดังกล่าวไม่ใช่ปริมาณผู้ใช้เรือข้ามฟาก โดยข้อมูลที่นำมาคาดการณ์ผลกระทบ เป็นข้อมูลของคนที่ใช้เรือข้ามฟากจำนวนร้อยละ 25 ของจำนวนข้อมูลในแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่นำไปประมาณค่าสัมประสิทธิ์ โดยข้อมูลดังกล่าวไม่เกี่ยวข้องกับข้อมูลที่นำไปประมาณค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งผลการคาดการณ์แสดงดัง Table 7

Table 7 The predicted percentage of decreasing ferry passengers

Scenario	Attributes of the pedestrian bridge			Percentage of decreasing ferry passengers	
	Safety services	Facilities	Landscape design	People who use ferries regularly.	People who rarely use ferries.
1	Not available	Not available	Not available	13.33	20.00
2	Not available	Available	Not available	50.00	55.00
3	Not available	Not available	Available	23.33	30.00
4	Not available	Available	Available	70.00	75.00
5	Available	Not available	Not available	66.67	60.00
6	Available	Available	Not available	90.00	85.00
7	Available	Not available	Available	80.00	75.00
8	Available	Available	Available	93.33	90.00

จาก Table 7 พบว่าในสถานการณ์ที่ 8 ที่สะพานคนเดินมีคุณลักษณะครบทั้ง 3 ประการ เป็นสถานการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณผู้ใช้เรือข้ามฟากมากที่สุด โดยปริมาณผู้ใช้เรือข้ามฟากของกลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำและกลุ่มที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ มีแนวโน้มลดลงถึงร้อยละ 93.33 และร้อยละ 90.00 ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ปริมาณผู้ใช้เรือข้ามฟากที่ลดลงของสถานการณ์ที่ 8 มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์ที่ 6 โดยในกลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำลดลงร้อยละ 93.33 และร้อยละ 90.00 ตามลำดับ และในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำลดลงร้อยละ 90.00 และร้อยละ 85.00 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า คุณลักษณะของสะพานที่ผู้เดินทางต้องการและมีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้ คือ ความปลอดภัยในการให้บริการและสิ่งอำนวยความสะดวก ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่าคุณลักษณะ 2 อย่างนี้สอดคล้องกับสิ่งที่คนเดินเท้าต้องการ คือสภาพแวดล้อมในการเดินเท้าที่ปลอดภัย น่าดึงดูดใจ และมีความสะดวกสบายในการเดิน (Georgia Department of Transportation, 2018)

สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปเป็นประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. ผลจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองของทุกกลุ่มตัวอย่าง พบว่าปัจจัยด้านคุณลักษณะของสะพานที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ความปลอดภัยในการให้บริการ สิ่งอำนวยความสะดวก และภูมิทัศน์ที่สวยงาม โดยมีความสัมพันธ์เชิงบวก หมายความว่ากลุ่มตัวอย่างมีแนวโน้มเลือกใช้สะพานมากขึ้นหากสะพานมีคุณลักษณะ 3 ประการดังกล่าว ส่วนปัจจัยลักษณะประชากรศาสตร์ที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ เพศ โดยมีความสัมพันธ์เชิงบวก หมายความว่าผู้เดินทางเพศชายมีแนวโน้มเลือกใช้สะพาน นอกจากนี้พบว่าปัจจัยระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้โดยสารเรือข้ามฟากนับตั้งแต่รอเรือจนถึงท่าเรือฝั่งตรงข้าม มีนัยสำคัญในกลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ และกลุ่มไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ โดยมีความสัมพันธ์เชิงบวก หมายความว่าผู้เดินทางมีแนวโน้มเลือกใช้สะพานมากขึ้น หากเรือข้ามฟากใช้เวลาในการเดินทางมากขึ้น

2. ปัจจัยด้านอายุมีนัยสำคัญทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง แต่มีทิศทางความสัมพันธ์ที่ไม่เหมือนกัน โดยในกลุ่มที่ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำ มีความสัมพันธ์เชิงลบ หมายความว่าผู้เดินทางอายุต่ำกว่า 30 ปีมีแนวโน้มจะเลือกใช้สะพาน เนื่องจากในกลุ่มดังกล่าว คนอายุต่ำกว่า 30 ปี ส่วนใหญ่มีจุดประสงค์การเดินทางคือเดินทางไปโรงเรียน มหาวิทยาลัย ทำงาน และโรงพยาบาล ย่อมต้องการการเดินทางที่สามารถคำนวณเวลาได้ เพื่อไปถึงจุดหมายได้อย่างตรงต่อเวลา ซึ่งแตกต่างกับกลุ่มที่ไม่ได้ใช้เรือข้ามฟากเป็นประจำที่ปัจจัยด้านอายุมีความสัมพันธ์เชิงบวก ซึ่งหมายความว่าผู้เดินทางอายุต่ำกว่า 30 ปี มีแนวโน้มที่จะไม่เลือกใช้สะพาน เนื่องจากในกลุ่มตัวอย่างดังกล่าว คนที่อายุไม่เกิน 30 ปี ส่วนใหญ่มีจุดประสงค์คือเดินทางไปท่องเที่ยว ซึ่งไม่ต้องการความรวดเร็วในการเดินทาง

จากการศึกษาพบว่าผู้เดินทางให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในการเดินทาง ความสะดวกสบาย และระยะเวลาในการเดินทาง ซึ่งการศึกษานี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาสะพานคนเดินข้ามแม่น้ำ หรือปรับปรุงบริการเรือข้ามฟากให้มีคุณลักษณะที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้เดินทางต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กลุ่มสถิติวิเคราะห์ สำนักแผนงาน กรมเจ้าท่า. 2563. รายงานประจำปีงบประมาณ 2562. กรมเจ้าท่า, กรุงเทพฯ.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

Department of Transportation. 2018. Pedestrian and Streetscape Guide. Department of Transportation. Atlanta, GA, USA, pp. 3–5.

Louviere, J.J., Hensher, D.A., Swait, J.D., Adamowicz, W. 2000. Choosing a choice model. In: Stated Choice Methods: Analysis and Applications. Cambridge University Press. Cambridge, UK, pp. 34–82.

Ortúzar, J.D., Willumsen, L.G. 2001. Data and Space. In: Modelling Transport, 3rd ed. John Wiley and Sons Ltd. West Sussex, UK, pp. 55–122.

Train, K.E. 2009. Logit. In: Discrete Choice Methods with Simulation, 2nd ed. Cambridge University Press. Cambridge, UK, pp. 34–75.

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของบังใบล้อและพลังงานความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งของขบวนรถโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทยที่ให้บริการในเส้นทาง กรุงเทพฯ-เชียงใหม่ กรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และ กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี

A study on relationship between wheel flange wear and curving friction energy of the state railway of Thailand passenger train sets on Bangkok-Chiangmai, Bangkok-Hat Yai, and Bangkok-Ubon Ratchathani Routes

กวิน หลิมจานนท์[a]*, วิชัย ศิวะโกศิษฐ[a], สาโรช ละอองศิริวงศ์[b], จีรภัทร์ เตชะกุลชัยนันต์[c]

Kawin Limjanon[a]*, Wichai Siwakosit[a], Jeerapat Sarote Laongsiriwong[b], Techakunchaiyanunt[c]

[a]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประทศไทย กรุงเทพฯ 10330

[c]สายงานวิศวกรรมและการก่อสร้าง บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ 10210

[a]Kasetsart University Rail Engineering Center (KURAIL), Mechanical Engineering Deptment, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Mechanical Engineering Department, State Railway of Thailand, Bangkok 10330, Thailand.

[c]Engineering and Construction, Airports of Thailand, Bangkok 10210, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: kawin.li@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสึกหรอของบังใบล้อและพลังงานความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งของขบวนรถโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า รถโดยสารเส้นทางกรุงเทพฯ-เชียงใหม่ มีค่าความสึกหรอของบังใบล้อ 6.07 มิลลิเมตร ต่อระยะทาง 204,984 กิโลเมตร รถโดยสารที่ให้บริการทั้งเส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และกรุงเทพฯ-อุบลราชธานี มีค่าความสึกหรอของบังใบล้อ 4.78 มิลลิเมตร ต่อระยะทาง 268,288 กิโลเมตร ในขณะที่พลังงานความเสียดทานระหว่างบังใบล้อและรางต่อความยาวโค้ง ที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งบนเส้นทางกรุงเทพฯ-เชียงใหม่ มีค่า 34,025.15 จูลต่อเมตร เส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่ มีค่า 15,013.02 จูลต่อเมตร และ เส้นทางกรุงเทพฯ-อุบลราชธานี มีค่า 19,849.67 จูลต่อเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานความเสียดทานขณะเข้าโค้งที่เกิดขึ้นมีผลต่อค่าความสึกหรอของบังใบล้อรถโดยสาร

คำสำคัญ: ค่าความสึกหรอของบังใบล้อ, บังใบล้อ, พลังงานความเสียดทาน

Abstract

This is a study on a relationship between wheel flange wear and curving friction energy of the State Railway of Thailand train sets. The results show that a train set running on Bangkok-Chiangmai route has a flange wear of 6.07 mm per 204,984 km while another train set running on both Bangkok-Hat Yai and Bangkok-Ubon Ratchathani routes has a flange wear of 4.78 mm per 268,288 km. Values of curving friction energy per curve length on each route are 34,025.01 J/m, 15,013.02 J/m, and 19,849.67 J/m for Bangkok-Chiangmai route, Bangkok-Hat Yai route, and Bangkok-Ubon Ratchathani route respectively. The study concludes that a value of curving friction energy is clearly related to wheel flange wear.

Keywords: flange wheels, potential friction energy, wheel flange wear

คำนำ

การรถไฟแห่งประเทศไทยได้จัดซื้อขบวนรถโดยสารเชิงพาณิชย์จากบริษัท CNR (China CNR Corporation Limited) จากสาธารณรัฐประชาชนจีน จำนวน 115 คัน โดยมีลักษณะของแคร่ล้อเป็นชนิดที่มีฐานล้อกว้างกว่าฐานล้อเดิมของการรถไฟแห่งประเทศไทยแต่ยังคงใช้ล้อรถไฟแบบ“คอนทัวร์วิฑูร” (การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2505) มีการใช้เครื่องวัดเลเซอร์ที่ชื่อว่า เครื่อง Calipri (Calipri C40 Instruction Manual Technical module descriptions) ในการเก็บข้อมูลค่าความสึกหรอของล้อรถไฟโดยสาร 115 คัน จากการตรวจวัดความสึกหรอของล้อรถไฟโดยสาร 115 คัน พบว่าที่พิกัดความสึกหรอของโคนบังใบล้อที่ 6 มิลลิเมตร รถไฟโดยสารในแต่ละเส้นทางมีระยะทางการวิ่งไม่เท่ากัน และลักษณะทางโค้งของแต่ละเส้นทางแตกต่างกัน (ฝ่ายช่างโยธา, 2562a; 2562b; 2562c) ด้วยเหตุนี้ จึงมีการศึกษา คำนวณและวิเคราะห์ผลของแรงกระทำต่อล้อและรางรถไฟที่มีผลต่อค่าความสึกหรอของล้อรถไฟบริเวณโคนบังใบ ของรถไฟโดยสาร 115 คัน โดยใช้หลักการของ Wienstock and Greif (1980) ใน 3 เส้นทาง ได้แก่ กรุงเทพฯ-เชียงใหม่ กรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และ กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลรถไฟโดยสาร 115 คัน คำนวณและวิเคราะห์ความสึกหรอของล้อรถไฟบริเวณโคนบังใบที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้ง โดยเริ่มจากการคำนวณหาแรงกระทำต่อล้อและรางขณะเข้าโค้งในรัศมีต่างๆ จากนั้นคำนวณหาแรงเสียดทานและพลังงานความเสียดทานจากข้อมูลทางโค้งของเส้นทางการเดินรถ เพื่อวิเคราะห์ผลความสึกหรอของล้อรถไฟบริเวณโคนบังใบที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้ง

คำนวณและวิเคราะห์ผลของแรงกระทำต่อล้อและรางรถไฟขณะเข้าโค้ง ในรัศมีโค้งที่ทำให้เกิดแรงกระทำต่อล้อรถไฟโดยสาร 115 คัน บริเวณโคนบังใบ โดยใช้ Equation 1–3 (Weinstock and Greif, 1980):

Free Curving

เกิดขึ้นเมื่อ R1<R<R0

$$R_1 = \frac{\left(1+h^2\right)l}{\frac{q}{l}} \tag{1}$$

$$R_0 = \frac{\left(1+h^2\right)r_0}{\alpha\left(\frac{q}{l}+\frac{Ph}{4f}\right)} \tag{2}$$

Flange Forces

$$F_{g1} = 0$$

$$F_{g2} = -4\left(\frac{\left(1+h^2\right)\frac{l}{R}-\frac{\alpha q}{r_0}}{h\left(1-\frac{\alpha l}{r_0}\right)}\right)+\frac{P\left(\frac{\alpha l}{r_0}\right)}{1-\frac{\alpha l}{r_0}} \tag{3}$$

เมื่อ R = Radius of Curving (meter) q = Flange Clearance (merter)

h = Ratio of wheel base to track gauge P = Centrifugal Force (Newton)

r_o = Wheel radius of undisplaced wheelset (meter) α = Wheel conicity (rad)

f = Creep coefficient (Linear theory) l = Half of Track gauge (merter)

F_{g2} = Flange force (Newton)

กำหนดค่า Track Plan Acceleration มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นค่า P มีค่าเท่ากับ 0

จากการเก็บข้อมูลรถไฟโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทย 115 คัน คำนวณและวิเคราะห์ผลของแรงกระทำต่อล้อและรางรถไฟขณะเข้าโค้งตามหลักการของ Wienstock and Robert (1980) พบว่ามีการเข้าโค้งแบบ Free Curving ที่รัศมี 177.80 เมตร ถึง 2,871.16 เมตร เกิดแรงกระทำที่โคนบังใบ (Fg 1 = 0, Fg 2) เท่านั้น และเนื่องจากล้อของรถไฟโดยสาร 115 คัน ใช้ระบบดิสเบรก ดังนั้นแรงกระทำที่พื้นล้อทั้งหมด ไม่มีผลต่อความสึกหรอบริเวณพื้นล้อ ทำให้การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่บริเวณความสึกหรอของโคนบังใบเท่านั้น หลังจากนั้นทำการหาแรงเสียดทานและพลังงานเสียดทานต่อไป โดยใช้ Equation 4–5

Friction Force

$$f = \mu N \tag{4}$$

เมื่อ f = Friction Force (newton) μ = Flange Coefficient of Friction

N = Normal Force on Flange Wheel (newton)

Friction Energy

$$E_f = fs \tag{5}$$

เมื่อ E_f = Friction Energy (joule) f = Friction Force (newton) s = Length of Curve (meter)

ข้อมูลการกลึงล้อรถโดยสารของการรถไฟแห่งประทศไทย

ปัจจุบันล้อชุดใหม่ของรถไฟโดยสาร 115 คัน มีความหนา 70 มิลลิเมตร เมื่อความหนาล้อรถไฟลดลงหรือถึงพิกัดความสึกหรอที่ 5–8 มิลลิเมตร ทางฝ่ายช่างกลของการรถไฟแห่งประเทศไทยจะนำล้อรถไฟเข้ารับการกลึงเพื่อปรับปรุงสภาพโปรไฟล์ของล้อรถไฟ โดยในการกลึงแต่ละครั้งความหนาล้อรถไฟจะหายไป 10 มิลลิเมตร ทำให้ล้อ 1 ชุด สามารถเข้ารับการกลึงได้ 4 ครั้ง ก่อนเลิกใช้ที่ความหนา 28 มิลลิเมตร (การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2505)

แนวทางการดำเนินงาน

ข้อมูลรถไฟ 115 คัน ของการรถไฟแห่งประเทศไทย

สำหรับการศึกษานี้ใช้ข้อมูลรถไฟ 115 คัน ของการรถไฟแห่งประเทศไทยในคำนวนแรงกระทำต่อล้อและรางรถไฟที่มีผลต่อความสึกหรอของโคนบังใบ (การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2505; 2564) แสดงดัง Table 1

Table 1 Technical Parameter of 115 Train of State Railway of Thailand

Technical Parameter	Parameter Index
Flange Clearance	0.009 m
Wheel Conicity	0.05 rad
Ratio of Wheef Base to Track Gauge	2.182 m
Wheel Radius of Undisplaced Wheel Set	0.425 m
Track Gauge	1.054 m
Flange Coefficient of Friction	0.5
Creep Coefficient (Linear Theory)	75
Normal Force on A Wheel (W=560000 N, 8 Wheel)	70000 N

หมายเหตุ: ดัดแปลงจากการรถไฟแห่งประเทศไทย (2505; 2564)

วัดข้อมูลล้อรถไฟโดยเครื่องวัดเลเซอร์ที่ชื่อว่า เครื่อง Calipri (Calipri C40 Instruction Manual Technical module descriptions)

วิธีการวัดข้อมูลล้อรถไฟโดยเครื่องวัดเลเซอร์ Calipri เริ่มจากการยิงเลเซอร์ลงบนผิวสัมผัสของโปรไฟล์ล้อรถไฟ ระยะยิงเลเซอร์ห่างจากผิวสัมผัสของโปรไฟล์ล้อไฟประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นเครื่องวัดเลเซอร์ Calipri ประมวลผลเป็นรูปโปรไฟล์ล้อเสมือนจริงและเก็บข้อมูลล้อรถไฟในรูปแบบ PDF การศึกษาครั้งนี้สนใจข้อมูลของล้อรถไฟบริเวณโคนบังใบ (Fw2) เท่านั้น โดยเริ่มเก็บค่าความสึกหรอของล้อรถไฟบริเวณโคนบังใบก่อนเริ่มใช้งานจนถึงค่าพิกัดความสึกหรอที่ 6 มิลลิเมตร ของรถไฟ 2 ขบวน เส้นทางการเดินรถไฟกรุงเทพฯ-เชียงใหม่ และเส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่-อุบลราชธานี ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลล้อรถไฟ 115 คัน รวมทั้งสิ้น 12 เดือน อยู่ระหว่างมีนาคม พ.ศ .2562 ถึงมีนาคม พ.ศ. 2563 ดังแสดงใน Fig. 1



Fig. 1 Calipri Instrument

วิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา

- คำนวณหาแรงกระทำบริเวณโคนบังใบ
- ศึกษาเส้นทางรถไฟจากบัญชีข้อมูลโค้ง (บัญชีข้อมูลโค้ง การรถไฟแห่งประเทศไทย)
- คำนวณหาพลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้ง (Curving Friction Energy)

ผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผล

คำนวณหาแรงกระทำบริเวณโคนบังใบ

ตามหลักการของ Wienstock and Greif (1980) เมื่อนำข้อมูลรัศมีโค้งของทางรถไฟที่ศึกษาทั้ง 3 เส้นทางและข้อมูลของรถไฟ 115 คัน แทนค่าในสมการที่ 1–3 พบว่าที่รัศมีเข้าโค้งน้อยมีแรงกระทำบริเวณโคนบังใบสูงมาก และลดลงเรื่อยๆเมื่อมีรัศมีเข้าโค้งสูงขึ้น กำหนดให้ทางโค้งรัศมี 180–350 เมตร (Fg = 160,000 N ถึง 80,000 N) เป็นโค้งแคบ โค้งรัศมี 350–2,800 เมตร เป็นโค้งกว้าง (Fg = 80,000 N ถึง 0 N) โดยพิจารณาปริมาณแรงกระทำบริเวณโคนบังใบที่น้อยกว่า 50%ของแรงกระทำบริเวณบังใบสูงสุดเป็นโค้งแคบ และปริมาณแรงกระทำบริเวณโคนบังใบที่มากกว่า 50% ของแรงกระทำบริเวณบังใบสูงสุดเป็นโค้งกว้าง ดังแสดงใน Fig. 2

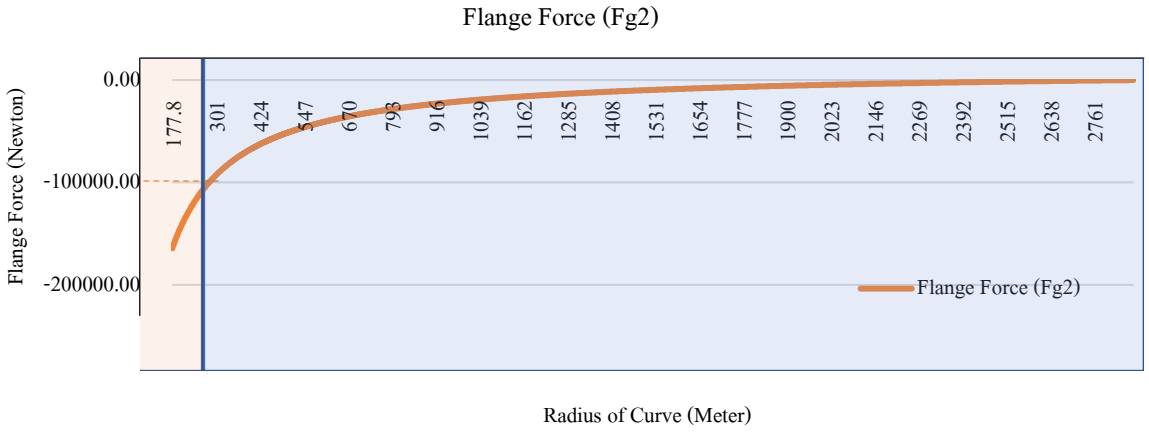


Fig. 2 Force on wheel Graph (Wienstock and Greif, 1980)

ศึกษาเส้นทางรถไฟจากบัญชีข้อมูลโค้ง

ศึกษาเส้นทางการเดินรถไฟ 3 เส้นทาง ได้แก่ กรุงเทพฯ-เชียงใหม่ กรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และ กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี (ฝ่ายช่างโยธา, 2562a; 2562b; 2562c) เพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงกระทำต่อล้อและรางรถไฟตามหลักการของ Wienstock and Greif (1980), Friction Force และ Friction Energy ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย รัศมีโค้ง และความยาวโค้ง เท่านั้น โดยแยกข้อมูลเป็นโค้งทางซ้าย และโค้งทางขวา แสดงดัง Fig. 3 และ Fig. 4

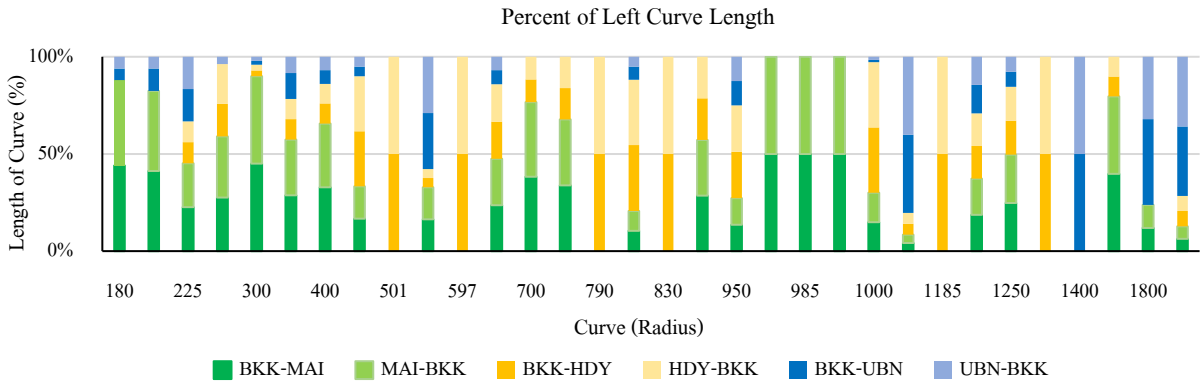


Fig. 3 Percentage of left curve Length on Bangkok-Chiangmai, Bangkok-Hat Yai and Bangkok-Ubon rachathani routes Chart

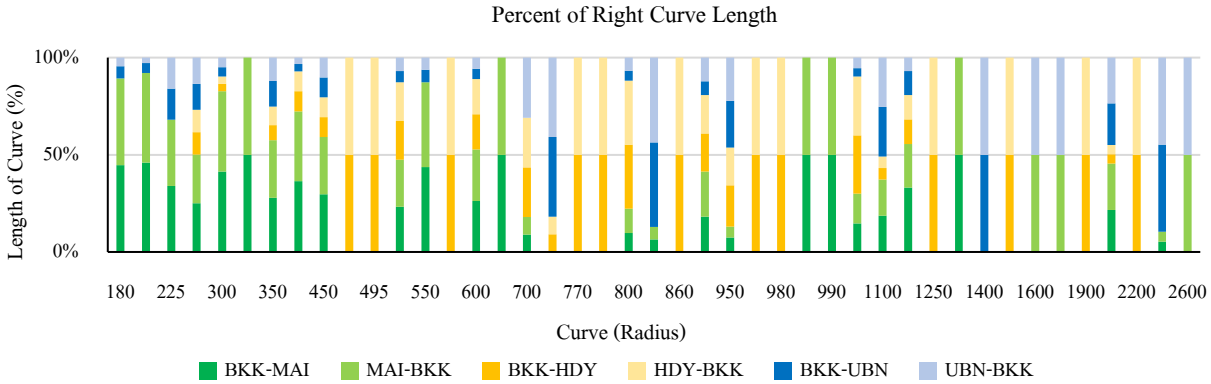


Fig. 4 Percentage of Right curve Length on Bangkok-Chiangmai, Bangkok-Hat Yai and Bangkok-Ubon rachathani routes Chart

จาก Fig. 3 และ Fig. 4 พบว่าที่เปอร์เซ็นต์ความยาวโค้งทั้งโค้งซ้ายและโค้งขวาในทางโค้งที่มีรัศมีต่ำกว่า 350 เมตร ในเส้นทางการเดินรถไฟกรุงเทพฯ-เชียงใหม่ มีปริมาณมากกว่า เส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และ กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี ซึ่งช่วงทางโค้งที่มีรัศมีต่ำกว่า 350 เมตรเป็นช่วงที่ทำให้เกิดแรงกระทำบริเวณโคนบังใบสูงและเมื่อยิ่งมีความยาวโค้งมากยิ่งทำให้เกิดแรงกระทำบริเวณโคนบังใบนาน

คำนวณหาพลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้ง (Curving Friction Energy)

จากข้อมูล รัศมีและความยาวโค้งจากบัญชีข้อมูลโค้ง และแรงที่กระทำบริเวณโคนบังใบขณะเข้าโค้งที่ได้จากการคำนวณ นำค่ามาแทนในสมการที่ 4–5 เพื่อหาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นและพลังงานความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งรวมที่เกิดขึ้นตลอดเส้นทาง พบว่าในเส้นทางการเดินรถไฟกรุงเทพฯ-เชียงใหม่ มีปริมาณพลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งมากกว่า กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี และ เส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่ ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 5

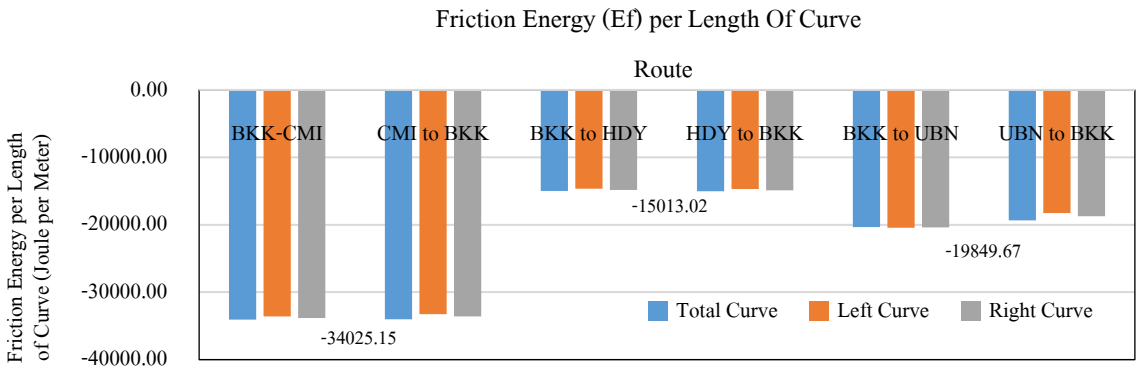


Fig. 5 Friction Energy per length of curve on Bangkok-Chiangmai, Bangkok-Hat Yai and Bangkok-Ubon rachathani routes Chart

จาก Fig. 5 พบว่าจากข้อมูลพลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งในแต่ละเส้นทาง พบว่าพลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้ง ในโค้งทางซ้ายและโค้งทางขวาขาไปและขากลับมีค่าใกล้เคียงกันโดยมิได้ตั้งใจ เป็นผลทำให้ล้อซ้ายและล้อขวาในแต่ละเส้นทางมีความสึกหรอใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นทางการเดินรถไฟกรุงเทพฯ-เชียงใหม่ มีพลังงานความเสียดทานต่อความยาวโค้งที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้ง (34,025.15 จูลต่อเมตร) สูงกว่าเส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่ (15,013.02 จูลต่อเมตร) และเส้นทางกรุงเทพฯ-อุบลราชธานี (19,849.67 จูลต่อเมตร) คิดเป็นประมาณ 2.3 เท่า และ 1.7 เท่าตามลำดับ ทำให้ล้อรถไฟ เส้นทางกรุงเทพฯ-เชียงใหม่มีความสึกหรอสูงกว่าเส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และ กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี ซึ่งเป็นไปตามการเก็บข้อมูลของล้อรถไฟโดยสาร 115 คัน

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาข้อมูลความสึกหรอล้อรถไฟโดยสาร 115 คัน จากเครื่องมือวัดเลเซอร์ Calipri และจากการคำนวณตามทฤษฎีของ Wienstock and Robert (1980) พบว่าเส้นทางการเดินรถไฟกรุงเทพฯ-เชียงใหม่ มีปริมาณพลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งที่เกิดขึ้นขณะเข้าโค้งและความสึกหรอของล้อบริเวณโคนบังใบสูงกว่าเส้นทางกรุงเทพฯ-หาดใหญ่ และ กรุงเทพฯ-อุบลราชธานี แสดงให้เห็นว่าทางโค้งที่มีพลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสึกหรอของล้อรถไฟโดยสาร 115 คัน ดังนั้นถ้าต้องการลดปริมาณความสึกหรอของล้อรถไฟบริเวณโคนบังใบลง สามารถทำได้โดยการปรับปรุงเส้นทางให้มีรัศมีทางโค้งมากกว่า 350 เมตร (พลังงานความเสียดทานที่สูญเสียต่อความยาวโค้งเกิดขึ้นขณะเข้าโค้งสูงมากกว่า 50% ของพลังงานความเสียดทานสูงสุด) ตลอดเส้นทาง ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดทางสภาพเส้นทางและภูมิประเทศด้วยอีกประการหนึ่งก่อนดำเนินการปรับปรุงเส้นทาง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ อบรมการใช้เครื่องมือ และความปลอดภัยในการใช้งาน ขอขอบคุณกองบำรุงทางเขตกรุงเทพ กองบำรุงทางเขตนครสวรรค์ กองบำรุงทางเขตลำปาง ศูนย์บำรุงทางสายเหนือ บำรุงทางเขตหัวหิน กองบำรุงทางเขตทุ่งสง กองบำรุงทางเขตหาดใหญ่ ศูนย์บำรุงทางสายใต้ กองบำรุงทางเขตฉะเชิงเทรา กองบำรุงทางเขตสุรินทร์ ศูนย์บำรุงทางสายตะวันออก ฝ่ายช่างโยธา ที่ได้อนุเคราะห์บัญชีข้อมูลโค้ง เพื่อศึกษาลักษณะเส้นทางการเดินรถ

เอกสารอ้างอิง

การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2505. ประวัติการเปลี่ยนแปลง Wheel Flange Contour แบบ “คอนทัวร์วิฑูร”. ฝ่ายการช่างกล, การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2 กุมภาพันธ์ 2505.

การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2564. 115 New Train Carriages Project. http://procurement.railway.co.th/resultproject/115_new_train_carriages_project/index.html. 15 มกราคม 2564.

ฝ่ายช่างโยธา. 2562a. บัญชีข้อมูลโค้งทางประธานสายเหนือสายตะวันออก. กองบำรุงทางเขตกรุงเทพ ศูนย์บำรุงทางสายเหนือ กองบำรุงทางเขตฉะเชิงเทรา กองบำรุงทางเขตสุรินทร์ ศูนย์บำรุงทางสายตะวันออก. ฝ่ายช่างโยธา, 2 ตุลาคม 2562

ฝ่ายช่างโยธา. 2562b. บัญชีข้อมูลโค้งทางประธานสายใต้ กองบำรุงทางเขตกรุงเทพ กองบำรุงทางเขตหัวหิน กองบำรุงทางเขตทุ่งสง กองบำรุงทางเขตหาดใหญ่ ศูนย์บำรุงทางสายใต้. ฝ่ายช่างโยธา, 2 ตุลาคม 2562

ฝ่ายช่างโยธา. 2562c. บัญชีข้อมูลโค้งทางประธานสายเหนือ. กองบำรุงทางเขตกรุงเทพ กองบำรุงทางเขตนครสวรรค์ กองบำรุงทางเขตลำปาง ศูนย์บำรุงทางสายเหนือ. ฝ่ายช่างโยธา, 2 ตุลาคม 2562

Weinstock, H., Greif, R. 1980. Analysis of wheel/rail force and flange force during steady state curving of rigid trucks, Urban Mass Transportation Administration, Washington DC, United States.

การพัฒนาเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัลสำหรับการรถไฟแห่งประเทศไทย

A development of a digital wheel contour measuring device for the state railway of Thailand

สุรสิทธิ์ คงแก้ว[a,b], วิชัย ศิวะโกศิษฐ[a,*], เอกชัย พัฒนะประยูรวงศ์[c], ชานนท์ บุญรัศมี[a], พิชญุตม์ อมรรัชยาวิจารณ์[a], วนัสวีร์ ทองประเสริฐ[a]

Surasit Kongkaew[a,b], Wichai Siwakosit[a,*], Ekachai Patthanaprayoonwong[c], Chanon Boonrassamee[a], Pichayut Amornratchayawichan[a], Wanaswee Tongprasert[a]

[a]ศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท มินเซน แมชีนเนอรี่ จำกัด พระนคร 10200 กรุงเทพฯ

[c]บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด ห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310

[a]Kasetsart University Rail Engineering Center (KURAIL), Mechanical Engineering Dept., Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Min Sen Machinery Co., Ltd., Pranakorn, Bangkok 10200, Thailand.

[c]SRTET Co.Ltd., Huay Kwang, Bangkok 10310, Thailand.

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

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงถึงการพัฒนาเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัลสำหรับการรถไฟแห่งประเทศไทยที่สามารถสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่จัดหาได้ในประเทศ ข้อมูลจากการวัดสามารถนำไปประมวลกับซอฟแวร์ที่มีใช้ทั่วไปได้ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของเครื่องมือวัดในแนวนอนและแนวตั้งจากการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดสามมิติมีค่าเป็น 0.2827 มม. และ 0.1281 มม. ตามลำดับ ผลการทดลองวัดขนาดคอนทัวร์ล้อสึกเปรียบเทียบกับคอนทัวร์วิทูร สามารถใช้คำนวณระยะสึกของบังใบล้อได้ระหว่าง 5.3905 ± 0.2827 มม. และ ระยะสึกของพื้นล้อมีค่าระหว่าง 1.9415 ± 0.1281 มม.

คำสำคัญ: คอนทัวร์วิทูร เครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อ ล้อรถไฟ

Abstract

This paper presents a development of a digital wheel contour measuring device for the state railway of Thailand which can be built with locally procured materials and equipment. The measured data can be processed with generally available software that a user prefers. The absolute errors of the device in horizontal and vertical directions are 0.2827 mm and 0.1281 mm respectively. A measurement of a worn wheel can be used to calculate a wheel flange wear of 5.3905 ± 0.2827 mm and a wheel tread wear of 1.9415 ± 0.1281 mm.

Keywords: Vidura contour, contour measuring device, train wheel

คำนำ

การรถไฟแห่งประเทศไทยมีการใช้งานเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อเพื่อติดตามลักษณะการสึกหรอของล้อรถไฟตามระยะทางที่มีการใช้งาน และมีการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดและค่าพิกัดที่กำหนดไว้ สามารถแสดงให้เห็นถึงความผิดปกติของการสึกหรอของล้อรถไฟได้ รัชชานนท์ และคณะ (2561) ได้ทำการศึกษาการสึกหรอของรถโดยสารชนิด Daewoo ของการรถไฟแห่งประเทศไทยโดยใช้เครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบ Yoshida ของฝ่ายการช่างกล การรถไฟแห่งประเทศไทย ตามที่แสดงไว้ใน Fig. 1 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่ทำการลอกรูปคอนทัวร์ล้อจากการลากก้านสัมผัสไปตามคอนทัวร์ล้อและใช้ปากกาลูกลื่นขีดเส้นตามคอนทัวร์ล้อที่ทำการวัดลงบนแผ่นกระดาษ และมีการควบคุมการเลื่อนของหัวอ่านและหัวปากกาโดยใช้มือหมุนและเกลียวแม่แรงทำให้มีความทนทานและแม่นยำในการเคลื่อนที่ ดังนั้นระยะความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดที่เกิดขึ้นได้ในแนวตั้งและแนวนอนของเครื่องมือชนิดนี้จึงมีค่าประมาณ 0.5 มม. ซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดของหัวปากกาลูกลื่น ข้อดีของเครื่องมือวัดชนิดนี้คือความคงทนต่อการใช้งานมาก และสามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการฝึกหัดมากนัก การรถไฟแห่งประเทศไทยยังมีการใช้งานเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อชนิดไม่สัมผัสแบบ Calipri ซึ่งการวัดคอนทัวร์ล้อมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำเพียง 0.08 มม. (NEXTSENSE, 2020) แต่เครื่องมือวัดต้องมีการฝึกอบรมเฉพาะและตัวเครื่องมือวัดมีราคาสูง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการจัดสร้างเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อที่สามารถผลิตขึ้นจากวัสดุอุปกรณ์ที่จัดหาได้ในประเทศ มีราคาไม่แพง สามารถบันทึกข้อมูลในรูปแบบดิจิตัลได้โดยตรง สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการประมวลผลโดยสามารถเลือกใช้ซอฟแวร์ได้อย่างอิสระ และทราบค่าความคลาดเคลื่อนได้แน่นอนทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดมีความน่าเชื่อถือและใช้นำไปเปรียบเทียบกับพิกัดการสึกของล้อรถไฟได้อย่างถูกต้อง

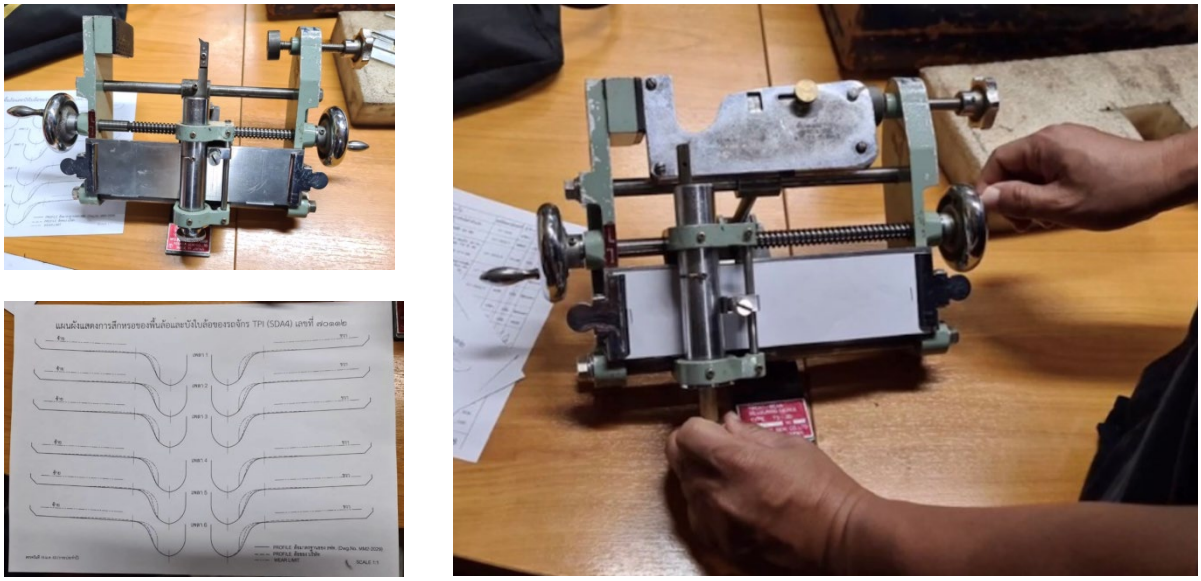


Fig. 1 A “Yoshida” wheel contour measuring device of SRT

อุปกรณ์และวิธีการ

การสร้างเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัล



Fig. 2 A new digital wheel contour measuring device (CMD)

เครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัลใช้โครงสร้างในลักษณะเดียวกับเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบ Yoshida ของการรถไฟแห่งประเทศไทย ซึ่งสามารถยึดกับล้อรถไฟได้ และติดตั้งเครื่องมือวัดขนาดแบบดิจิตัลตามแนวนอนและแนวตั้ง โดยเครื่องมือวัดมีการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊คเพื่อบันทึกข้อมูลระยะในแนวนอนและแนวตั้งที่ได้จากการเลื่อนเครื่องมือวัดโดยใช้มือหมุนตาม Fig. 2 เครื่องมือวัดนี้สามารถใช้งานกับล้อรถไฟที่มีความหนาได้ถึง 135 มม. ซึ่งเป็นล้อที่มีความหนาสูงสุดของการรถไฟแห่งประเทศไทย หลังจากทำการบันทึกข้อมูลเสร็จแล้ว จะทำการประมวลผลโดยการใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่าต่างๆ ต่อไป

การหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด

การหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดของเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัล ทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการวัดระยะในแนวตั้งและแนวนอนของชิ้นส่วนทดสอบที่ได้จากเครื่องมือวัด และผลการวัดจากเครื่องวัดสามมิติ (Coordinate Measuring Machine, CMM) ชนิด ACCRETECH รุ่น XYZAX AXCEL ที่มีความแม่นยำสูงในการวัด มีค่าความคลาดเคลื่อนในแนวตั้งและแนวนอนไม่เกิน ± 2.325 ไมครอน (Accretech, 2020) โดยใช้ห้องปฏิบัติการการวัดละเอียดของบริษัท บางพลี พรีซิชั่น จำกัด Bangplee Precision Company Limited ในการทดสอบ การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Error) ในแนวนอน Δx และ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในแนวตั้ง Δy เป็นไปตาม Equations 1–2

$$\Delta x = \left| \max_i (x_{CMM_i} - x_{CMD_i}) \right| \quad (1)$$

(2)

$$\Delta y = \left|\max_i(y_{CMM_i} - y_{CMD_i})\right|$$

โดย x_{CMM_i} = ระยะในแนวนอนที่วัดได้จากจากเครื่อง CMM

y_{CMM_i} = ระยะในแนวตั้งที่วัดได้จากจากเครื่อง CMM

x_{CMD_i} = ระยะในแนวนอนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัล

y_{CMD_i} = ระยะในแนวตั้งที่วัดได้จากเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัล

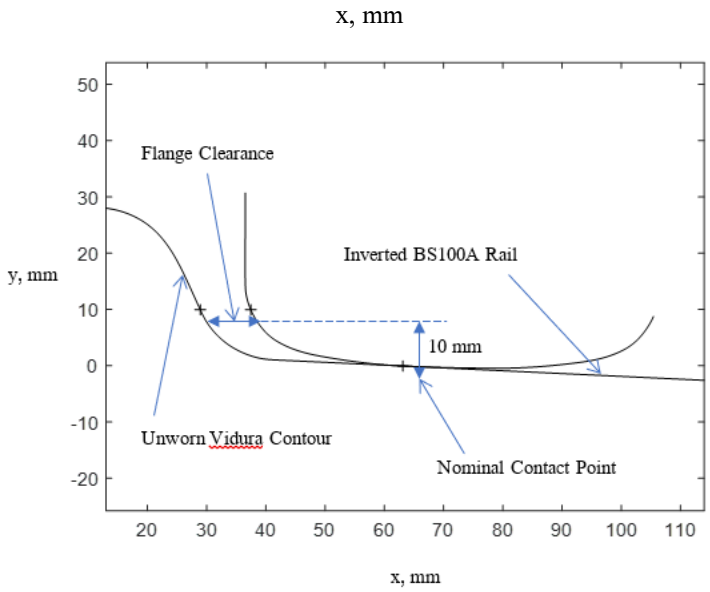


Fig. 3 A flange clearance and a nominal contact point between an unworn Vidura contour and a BS100A rail

การคำนวณค่าจากข้อมูลการวัด

ผู้วิจัยจะได้ทำการวัดคอนทัวร์ล้อรถไฟที่ศูนย์ซ่อมบำรุงรถสินค้าโดยใช้เครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัลที่ได้พัฒนาขึ้น และนำข้อมูลจากการวัดมาทำการคำนวณตำแหน่งจุดสัมผัสที่กำหนด (Nominal Contact Point) และระยะห่างระหว่างบังใบล้อและขอบราง (Flange Clearance) เพื่อคำนวณระยะการสึกของพื้นล้อ (Tread Wear Depth) และ ระยะการสึกของบังใบล้อ (Flange Wear Depth) ทำการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากคอนทัวร์วิทูร (Vidura Contour) และคอนทัวร์ของรางรถไฟชนิด BS100A ที่ใช้ในการรถไฟแห่งประเทศไทย วิธีการคำนวณระยะต่างๆ เป็นไปตาม วิชัย (2563) โดยค่าที่ทำการวัดจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดในแนวนอนและแนวตั้งตามค่าที่ได้จากการทดสอบ Fig. 3 แสดงระยะห่างระหว่างบังใบล้อและขอบรางเป็น 8.5223 มม. และ จุดสัมผัสที่ถูกกำหนดมีพิกัดเป็น (63.1340 มม., -0.0567 มม.) สำหรับกรณีของล้อคอนทัวร์วิทูร และ รางชนิด BS100A

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัลเป็นไปตามรูปที่ 4 จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 และ สมการที่ 2 พบว่าΔx มีค่า 0.2827 มม. และΔy มีค่า 0.1281 มม. ดังนั้นค่าวัดได้จากเครื่องมือในแนวนอน x มม.และค่าที่วัดได้จากเครื่องมือในแนวตั้ง y มม.จะมีค่าที่วัดได้จริงในช่วง $x \pm \Delta x$ มม. และ $y \pm \Delta y$ มม.ตามลำดับ

Fig. 5 แสดงผลการวัดจากเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบดิจิตัลจากล้อรถไฟบรรทุกสินค้าที่มีการใช้งานมาประมาณ 300,000 กม. ผลจากการวัดถูกนำมาเปรียบเทียบกับขนาดของล้อคอนทัวร์วิทูรที่ยังไม่ได้ใช้งาน และคำนวณค่าต่างๆ ได้ ระยะห่างระหว่างบังใบล้อและขอบรางของล้อสึกมีค่า 13.9128±0.2827 มม. ในขณะที่ตำแหน่งพิกัดของจุดสัมผัสที่ถูกกำหนดของล้อสึกคือ (76.7429±0.2827 มม., -1.8848±0.1281 มม.) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างบังใบล้อและขอบรางของล้อที่ยังไม่ใช้งาน และ ตำแหน่งพิกัดของจุดสัมผัสที่ถูกกำหนดของล้อที่ยังไม่ใช้งาน จะพบว่าบังใบมีระยะการสึกระหว่าง 5.3905±0.2827 มม.และ ระยะการสึกของพื้นล้อซึ่งเป็นผลต่างของระยะในแนวตั้งของจุดสัมผัสที่ถูกกำหนดของล้อที่ยังไม่ใช้งานและล้อสึกมีค่าระหว่าง 1.9415± 0.1281 มม.

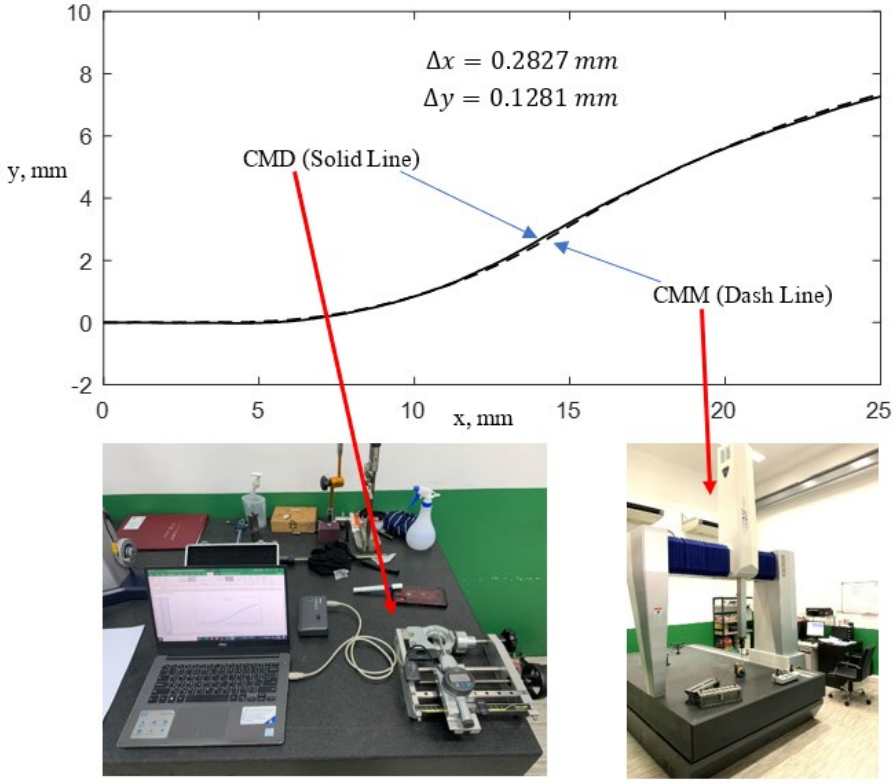


Fig. 4 A comparison of measurements from CMD and CMM to quantify maximum absolute errors in x and y directions of the device

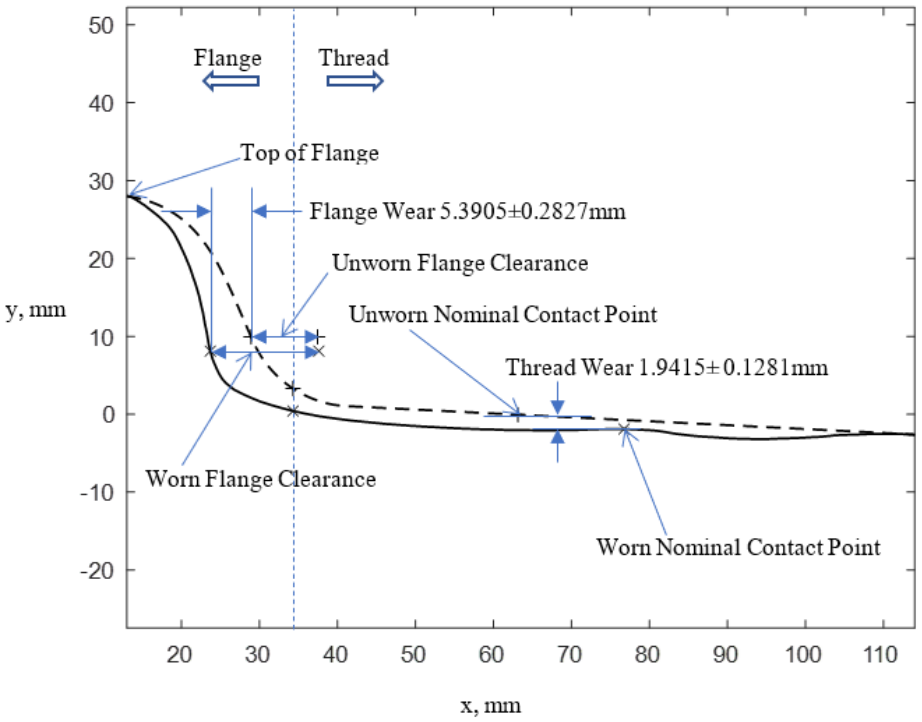


Fig. 5 Results from a new wheel contour measuring device in comparison with unworn Vidura contour

สรุป

เครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อชนิดดิจิตัลถูกสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่จัดหาได้ภายในประเทศ โครงสร้างเครื่องมือมีความแข็งแรงทนทาน มีลักษณะการใช้งานได้ง่ายเหมือนเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อแบบ Yoshida มีการทดสอบเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์กับเครื่องมือวัดขนาดสามมิติ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในแนวนอนและแนวตั้งเป็น 0.2827 มม. และ 0.1281 มม. ตามลำดับ ค่าที่วัดได้สามารถนำไปประมวลโดยใช้ซอฟแวร์ที่ใช้แพร่หลายทั่วไปตามที่ผู้ใช้งานมีความถนัดและสะดวก

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายการช่างกล การรถไฟแห่งประเทศไทยที่ได้เอื้อเฟื้อการศึกษาเครื่องมือวัดคอนทัวร์ล้อ Yoshida และการทดลองวัดคอนทัวร์ล้อด้วยเครื่องมือวัดที่ได้ประดิษฐขึ้นใหม่ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท มินเซน แมชีนเนอรี่ จำกัด บริษัท บางพลี พรีซิชั่น จำกัด และ บริษัท เอสไฟว์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้งานห้องปฏิบัติการการวัดละเอียดของทางบริษัทฯ โดยใช้เครื่องมือ ACCRETECH รุ่น XYZAX AXCEL ในการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะของเครื่องมือ และ ผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องมือวัดล้อคอนทัวร์วิฑูร คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURAIL) ในการเอื้อเฟื้อข้อมูลด้านการคำนวณ

เอกสารอ้างอิง

รัชชานนท์ อภิญญายรรยง, ธนา ภู่เผือกรัตน์, สิทธิพงษ์ พรหมลา, วิชัย ศิวะโกศิษฐ. 2561. การศึกษาความสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ของการรถไฟแห่งประเทศไทย. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ, หน้า 335–341

วิชัย ศิวะโกศิษฐ. 2563. หลักการวิศวกรรมระบบราง. สำนักพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Accretech Co.Ltd. 2020. XYZAX AXCEL Catalog. https://www.accretech.jp/english/product/measuring/cmm/files/axcel_ph_e.pdf, 24 December 2020.

NEXTSENSE, 2020. Calipri CX4, https://www.nextsense-worldwide.com/en/industries/railway/wheel-profile-measuring-tool.html, 24 December 2020.

ศึกษามูลค่าการลงทุนในการจัดหาระบบรถไฟสำหรับรถไฟฟ้าในเมืองในประเทศไทย

CAPEX cost of railway systems for METRO Projects in Thailand

วิชิต จิตรพินิจ*, วิชัย ศิวะโกศิษฐ

Wichit Jitpinij*, Wichai Siwakosit

ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

KURAIL, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: wichit.ji@ku.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบมูลค่าการลงทุนเพื่อเป็นข้อมูลตั้งต้นในการกำหนดรูปแบบการประเมินมูลค่าการลงทุนในการจัดหาระบบรถไฟ (Railway System) สำหรับรถไฟฟ้าในเมือง (Metro Train) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่องการสร้างรูปแบบการคำนวณหามูลค่าการลงทุนฯ (Cost Model of Railway Systems For Metro Projects in Thailand [CAPEX]) พบว่ามูลค่าการลงทุนระบบรถไฟ (Railway System) ของรถไฟฟ้าแบบรางเหล็กโดยประมาณคือ 686–986 ล้านบาท/กม ในขณะที่ระบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) จะอยู่ที่ 432–736 ล้านบาท/กม เมื่อพิจารณาสัดส่วนมูลค่าการลงทุนของระบบต่างๆ ที่ประกอบเข้ากันเป็นระบบรถไฟฟ้านั้นจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งรถไฟฟ้าแบบรางเหล็กและรถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) กล่าวคือขบวนรถไฟฟ้ามีมูลค่าสูงสุดคิดเป็นกว่าร้อยละ 30 ของมูลค่ารวม รองลงมาคือระบบไฟฟ้า ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบสื่อสารตามลำดับ โดยระบบอื่นๆ ที่ลดหลั่นกันลงมาจะมีสัดส่วนใกล้กันมากและไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นชนิดและจำนวนของขบวนรถไฟฟ้ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมูลค่าการลงทุนของโครงการ เพราะระบบอื่นๆ จะมีคุณลักษณะคล้ายคลึงกันมาก

คำสำคัญ: มูลค่าการลงทุน, รถไฟในเมือง, รถไฟฟ้าแบบรางเหล็ก, รถไฟฟ้ารางเดี่ยว, ระบบรถไฟ

Abstract

This study forms part of the research for the Cost Model of Railway System for Metro Projects in Thailand (CAPEX). The output of this paper will be used as the baseline for cost modelling. It compiles and compares the CAPEX cost for Railway Systems of Metro Project (both Conventional Metro and Monorail) in Thailand. The result shows that the cost of a conventional metro is in a range of 686–986 M THB/km, while the cost of Monorail falls between 432–736 M THB/km. The variation of the cost is greatly dominated by type and quantity of rolling stock. On both types of railway, the Rolling Stock takes the highest proportion, more than 30% of the overall cost, followed by Power Supply, Signalling, and Telecommunication System, the remaining sub-systems share a similar size of the cost proportions. It can be observed that Rolling Stock type and fleet size greatly affect overall cost while other systems do not have significant impact due to the similarities in terms of system characteristic and performance.

Keywords: CAPEX, conventional metro, metro project, monorail, railway system.

คำนำ

รถไฟในเมืองหรือ Metro Train ถือได้ว่าเป็นรูปแบบการเดินทางที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับเมืองที่มีขนาดใหญ่ เป็นแหล่งธุรกิจและมีประชากรและการจราจรหนาแน่น ปัจจุบันในประเทศไทยมีรถไฟในเมือง (Metro Train) ให้บริการทั้งหมดสามเส้นทาง คือรถไฟฟ้าสายสีเขียว สายสีน้ำเงินและสายสีม่วง โดย ณ วันที่จัดทำบทความนี้มีสถานีที่เปิดให้บริการแล้ว 106 สถานี ความยาวเส้นทางรวมกันกว่า 129 กิโลเมตรและกำลังอยู่ในช่วงก่อสร้างโครงการต่อขยายเพิ่มขึ้นอีก ในปี 2020 มีผู้โดยสารใช้บริการทั้งหมดเฉลี่ยวันละกว่าหนึ่งล้านเที่ยว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับชีวิตคนเมืองไปแล้ว นอกเหนือจากเส้นทางที่ให้บริการแล้วนั้นยังมีโครงการต่างๆ ที่อยู่ในระหว่างการก่อสร้างได้แก่ สายสีส้ม สายสีชมพู และสายสีเหลือง และโครงการอื่นในแผนการก่อสร้างอีก โดยที่บางโครงการเช่นสายสีชมพูและสายสีเหลืองเป็นรูปแบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) แต่ก็มีระบบรถไฟ (Railway System) ที่เหมือนกับรถไฟในเมืองแบบรางเหล็กเช่น ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบไฟฟ้า ระบบสื่อสาร SCADA ระบบเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ ระบบประตูชานชลา

มีงานศึกษาและงานวิจัยหลากหลายในระดับสากลไม่ว่าจะเป็นอเมริกา ยุโรป และเอเชียที่มีความพยายามจะสร้างเกณฑ์มาตรฐาน หรือ Benchmark ในการประเมินราคาก่อสร้างรถไฟรวมถึงรถไฟในเมือง โดยส่วนใหญ่จะเป็นการนำเสนอในรูปแบบราคาต่อหน่วยความยาวเส้นทาง เช่น ต่อไมล์หรือต่อกิโลเมตร อย่างไรก็ดีพบว่าผลการสำรวจศึกษามูลค่าการลงทุนมีค่าแตกต่างกันของแต่ละโครงการค่อนข้างมาก (Flyvbjerg 2008) อีกทั้งเกณฑ์ที่กำหนดขึ้นมาในแต่ละภูมิภาค (Region) นั้นไม่สามารถจะปรับใช้ได้อย่างแม่นยำกับภูมิภาคอื่นๆ พบว่าบางงานศึกษาวิจัยจะมีการระบุไว้ว่าเกณฑ์การประเมินที่นำเสนอนั้นเหมาะสมหรือใช้อ้างอิงได้ภายในในทุกภูมิภาคนั้นๆ เท่านั้น (RAILPAG)

ความแตกต่างของราคาค่าก่อสร้างหรือมูลค่าเงินลงทุนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นคุณลักษณะของโครงการ สถานที่ (Location) สภาพภูมิประเทศ (Geographical) ความซับซ้อนทางเทคนิค กฎหมายและข้อกำหนด การเมือง แผนการตลาด เทคโนโลยีที่เลือกใช้ สมรรถนะ (Performance) ของระบบ ภาษี ค่าจ้างแรงงาน และความแตกต่างกันในด้านอื่นๆ โดยงานวิจัยในต่างประเทศเท่าที่สืบค้นได้นั้นมูลค่าของการลงทุนจะครอบคลุมทั้งงานโยธาและงานระบบรถไฟ ไม่ได้แยกสัดส่วนงานระบบรถไฟและงานโยธา หรือบางงานวิจัยก็แยกออกมาเป็นบางระบบเท่านั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับโครงการในประเทศตามขอบเขตของการศึกษานี้ได้

หลักปฏิบัติโดยทั่วไปของการประเมินราคาสำหรับงานระบบรถไฟในโครงการรถไฟในประเทศไทยจะทำในช่วงการศึกษาความเหมาะสมของโครงการ โดยเป็นการประเมินเป็นรายโครงการและจะสรุปราคาจริงในช่วงการก่อสร้างหรือเมื่อลงนามสัญญา

บทความนี้จะเป็นการเปรียบเทียบมูลค่าการลงทุนเพื่อเป็นข้อมูลตั้งต้นในการกำหนดรูปแบบการประเมินมูลค่าการลงทุนในการจัดหาระบบรถไฟ (Railway System) สำหรับรถไฟฟ้าในเมือง (Metro Train) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่องการสร้างรูปแบบการคำนวณหามูลค่าการลงทุนฯ อย่างไรก็ดีการศึกษานี้รวมถึงงานวิจัยเป็นการนำเสนอการประเมินมูลค่าเบื้องต้น (estimated baseline) เพื่อให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง (Stakeholder) ในการกำหนดทิศทางการพัฒนาโครงการรถไฟเช่นฝ่ายวางแผน ผู้บริหาร หรือผู้สนใจลงทุนได้รับรู้ถึงมูลค่าการลงทุนเบื้องต้นได้รวดเร็วที่สุด (As early as possible) เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์โครงการว่ามีความเหมาะสมที่จะทำการศึกษาในรายละเอียดต่อไปหรือไม่ หรือใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อนำไปต่อยอดสำหรับการคำนวณอื่นๆ รวมไปถึงเงินอุดหนุนที่รัฐอาจจำเป็นต้องมีส่วนร่วมอีกด้วย โดยมิได้มีความตั้งใจที่จะนำมาแทนที่การประเมินมูลค่าการลงทุนหรือราคาค่า

ก่อสร้างในช่วงของการศึกษาความเหมาะสม ซึ่งเป็นประเมินและวิเคราะห์โดยละเอียดจากข้อมูลการออกแบบ (Conceptual design) ที่เฉพาะเจาะจงตามคุณลักษณะและข้อกำหนดของแต่ละโครงการ (Project features and Requirements) โดยการศึกษานี้จะครอบคลุมเฉพาะระบบรถไฟประกอบไปด้วย รถไฟฟ้า (Rolling Stock) ระบบอาณัติสัญญาณ (Signalling System) ระบบไฟฟ้า (Power Supply system) ระบบสื่อสาร (Telecommunication system) SCADA System ระบบเก็บค่าโดยสารอัติโนมัติ (Automatic Fare Correction System) ระบบประตูกั้นชานชาลา (Platform screen Door) เครื่องมือเครื่องจักรในศูนย์ซ่อม (Depot Workshop Equipment) โดยมิได้ครอบคลุมมูลค่างานก่อสร้างงานโยธา ระบบรางและทางวิ่ง และงานประกอบอาคารต่างๆ

แนวทางการดำเนินงาน

รวบรวมข้อมูลโครงการและมูลค่าการลงทุนของระบบรถไฟในเมือง (Metro Train) โครงการต่างๆ ในประเทศไทยทั้งโครงการที่ก่อสร้างแล้วเสร็จและให้บริการผู้โดยสารแล้ว โครงการที่ยังอยู่ในระหว่างการก่อสร้างและโครงการที่อยู่ในแผนการก่อสร้างในอนาคต โดยที่โครงการที่ก่อสร้างแล้ว และโครงการที่กำลังก่อสร้างจะใช้มูลค่าการลงทุนจริง เท่าที่สามารถจะสืบค้นและเข้าถึงได้ ไม่ว่าจะเป็นจากข้อมูล Online หน่วยงานที่เกี่ยวข้องหรือจากผู้เกี่ยวข้องกับโครงการ สำหรับโครงการที่อยู่ในแผนการดำเนินงานจะเป็นข้อมูลจากรายงานผลการศึกษาความเหมาะสม หรือผลการวิเคราะห์โครงการที่จัดทำโดยที่ปรึกษา ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจึงนำมาคัดกรองเฉพาะข้อมูลที่เหมาะสมมีความคลาดเคลื่อนน้อย และวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูล

ระบบรถไฟสำหรับรถไฟฟ้าในเมือง (Railway System for Metro Train)

ในปัจจุบันรถไฟในเมืองจะเป็นรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า หรืออาจเรียกอย่างคุ้นหูว่ารถไฟฟ้า (Electrified Railway) ในรถไฟฟ้าในเมือง (Metro Train) นั้นมีความสำคัญอย่างมากในการให้บริการที่มีเป้าหมายเพื่อความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือสูงสุด การออกแบบหรือเลือกใช้ระบบรถไฟ (Railway System) นั้นจะอ้างอิงกับมาตรฐานทั้งในระดับประเทศและนานาชาติ ซึ่งระบบรถไฟ (Railway System) ประกอบได้ด้วยระบบย่อยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ตัวรถไฟฟ้า (Rolling stock) ถือเป็นยานพาหนะสำหรับขนส่งผู้โดยสาร สำหรับโครงการรถไฟในเมืองนั้นจะนิยมใช้รถไฟฟ้าอยู่สองชนิดคือ รถไฟฟ้าล้อเหล็กวิ่งบนรางเหล็ก และรถไฟฟ้าล้อยางวิ่งบนคาน (Guideway Beam) หรือเรียกอีกย่างว่ารถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) รถไฟฟ้าทั้งสองชนิดเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้า โดยรับพลังงานไฟฟ้าผ่านทางขารับไฟฟ้าหรือเรียกว่า Collector shoes โดยจะใช้ไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 750 Vdc ส่งผ่านทางรางจ่ายไฟฟ้า สำหรับรถไฟฟ้าแบบล้อเหล็กจะมีความยาวต่อตู้หรือคันประมาณ 20–25 เมตร ความจุผู้โดยสารต่อตู้ประมาณ 360 คน (BTS Website) รถไฟฟ้าแบบรางเดี่ยวนั้นจะมีขนาดเล็กกว่ารถไฟฟ้าแบบล้อเหล็ก และสามารถวิ่งบนทางที่มีโค้งที่แคบกว่า นำมาต่อพ่วงเข้าด้วยกันเป็นขบวนรถไฟ โดยที่จำนวนตู้หรือคันต่อขบวนจะกำหนดให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้โดยสาร (Demand Forecast)
- ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Supply System) ถือเป็นหัวใจสำคัญของระบบ เพราะการขับเคลื่อนรถไฟฟ้านั้นใช้กำลังไฟฟ้า ระบบรถไฟฟ้ารวมถึงระบบอำนวยความสะดวกต่างๆ ภายในสถานีและศูนย์ควบคุมก็ใช้กำลัง

งานไฟฟ้าทั้งหมด โดยจะรับไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้าฯ และแยกออกเป็นสองระบบจ่ายไฟฟ้าย่อยๆ คือระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction Power) และระบบไฟฟ้าบริการ (Auxiliary Power)

- ระบบอาณัติสัญญาณ (Signalling System) ถือเป็นหัวใจสำคัญของการเดินรถอย่างปลอดภัย เป็นระบบควบคุมการเดินรถทั้งหมดเพื่อการเดินรถด้วยความปลอดภัยสูงสุด โดยส่วนใหญ่ระบบอาณัติสัญญาณและควบคุมการเดินรถสำหรับรถไฟฟ้าในเมืองจะเป็นแบบอัตโนมัติ ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ มีการติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างรถไฟฟ้าและระบบภาคพื้นตลอดเวลาผ่านทางคลื่นความถี่วิทยุ เรียกว่าระบบอาณัติสัญญาณแบบ Communication Base Train Control (CBTC) เป็นระบบที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศรวมถึงในประเทศไทยด้วย ซึ่ง CBTC นี้จะประกอบไปด้วยระบบย่อยๆ ทำงานร่วมกัน คือ ระบบบังคับสัมพันธ์ (Interlocking) ระบบ Automatic Train Control (ATC) ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบ Automatic Train Protection (ATP), Automatic Train Operation (ATO)
- ระบบสื่อสาร (Telecommunication System) เป็นระบบอำนวยความสะดวกที่จะขาดไม่ได้ในรถไฟฟ้าสมัยใหม่ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการติดต่อประสานงานไม่ว่าจะเป็นระหว่างพนักงานกับพนักงาน หรือพนักงานกับผู้โดยสาร อีกทั้งยังใช้เป็นส่วนเสริมในการสังเกตการณ์เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้โดยสารด้วย ระบบสื่อสารจะประกอบไปด้วยระบบย่อยต่างๆ เช่น ระบบส่งผ่านข้อมูลสื่อสารหลัก (Backbone Communication System) ระบบโทรศัพท์ (Telephone System) ระบบวิทยุสื่อสาร (Radio System) ระบบโทรทัศน์วงจรปิด (Closed Circuit Television System) ระบบนาฬิกาหลัก (Master clock) ระบบแจ้งข้อมูลผู้โดยสาร (Passenger Information System) ระบบส่งข้อมูลความจุสูงผ่านทางคลื่นความถี่วิทยุ (Broadband Radio System)
- ระบบควบคุมและจัดเก็บข้อมูล (SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition) ทำหน้าที่ช่วยในการควบคุมบริหารจัดการทางด้านวิศกรรม และการซ่อมบำรุงระบบต่างๆ ซึ่งใช้ในการตรวจสอบ ติดตามผลและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ เครื่องมือและการบริการ รวมถึงเก็บและประมวลผลการใช้กำลังงานไฟฟ้า
- ระบบจัดเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ (Automatic Fared Collection System - AFC) ทำหน้าที่ในการขายบัตรโดยสาร เก็บค่าโดยสารและเก็บข้อมูลรูปแบบการเดินทางของผู้โดยสาร
- ระบบประตูกั้นชานชาลา (Platform Screen Door) เพื่อกั้นขอบชานชาลาป้องกันผู้โดยสารตกลงไปบนทางรถไฟไม่ว่าจะโดยตั้งใจหรืออุบัติเหตุ
- ศูนย์ซ่อมบำรุง (Depot and Depot Workshop Equipment) ในโครงการรถไฟฟ้าฟ้าหรือขนส่งมวลชนใดๆ การซ่อมบำรุงถือเป็นกิจกรรมที่มีความสาคัญอย่างยิ่งถึงการประสบความสำเร็จของโครงการ เพราะส่งผลถึงความปลอดภัย ความตรงเวลา ความน่าเชื่อถือและเป็นชื่อเสียงขององค์กร อย่างที่ทราบกันดีว่ากิจกรรมการซ่อมบำรุงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ศูนย์ซ่อม โดยมูลค่าการลงทุนในการศึกษานี้ จะคิดเฉพาะเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในกิจกรรมซ่อมบำรุงเท่านั้น

มูลค่าการลงทุนระบบรถไฟ = ขบวนรถไฟฟ้า + ระบบไฟฟ้า + ระบบอาณัติสัญญาณ + ระบบสื่อสาร + ระบบ SCADA + ระบบเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ + ระบบประตูกั้นชานชาลา + เครื่องมือเครื่องจักรในศูนย์ซ่อมบำรุง

รถไฟฟ้าในเมืองที่ทำการศึกษา (Metro Trains under study)

ข้อมูลของรถไฟฟ้าในเมืองที่ทำการศึกษาแสดงดัง Fig. 1 จะสังเกตเห็นว่าระบบรถไฟที่ศึกษานั้นมีทั้งรถไฟฟ้าแบบล้อเหล็กวิ่งบนรางเหล็ก และรถไฟฟ้าล้อยางวิ่งบนคานหรือเรียกว่า Monorail อย่างไรก็ดีเนื่องจากขนาดและส่วนประกอบของรถไฟฟ้าที่แตกต่างกัน มูลค่าการลงทุนจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

การเปรียบเทียบข้อมูลมูลค่าการลงทุนของระบบรถไฟจะถูกแยกออกเป็นสองส่วนคือรถไฟฟ้าแบบรางเหล็กและรถไฟฟ้าแบบ Monorail โครงการที่เลือกใช้รถไฟฟ้าแบบรางเหล็กส่วนใหญ่จะเป็นเส้นทางสายหลักมีจำนวนผู้โดยสารจากผลการคาดการณ์สูง เนื่องจากขบวนรถไฟฟ้ามีความจุผู้โดยสารมากกว่ารถไฟฟ้าแบบ Monorail สำหรับเส้นทางสายรองที่มีผู้โดยจำนวนผู้โดยสารน้อยกว่า หรือในเส้นทางที่มีข้อจำกัดเรื่องรัศมีโค้งหรือข้อจำกัดด้านพื้นที่ ก็จะเลือกใช้รถไฟฟ้าแบบ Monorail ที่มีขนาดเล็กกว่า

Year	Metro Railway	Line Length (Km)	Number of Stations	Number of Cars	Avg. Station Distant (Km)	Railway Type
1999	BTS (original)	23	23	105	1.00	Heavy Rail
2009	BTS (Silom Extension 2.2)	2.2	2	-	1.10	Heavy Rail
2011	BTS (BMSE 5.25)	5.25	5	-	1.05	Heavy Rail
2020	BTS (Extension GLE)	32	25	184	1.28	Heavy Rail
2016	Purple Line	23	16	63	1.44	Heavy Rail
2017	Purple Line (Extension)	24	17	-	1.41	Heavy Rail
2004	Blue Line	21	18	57	1.17	Heavy Rail
2020	Blue Line (Extension)	27	19	105	1.42	Heavy Rail
2018	Orange Line	36	28	108	1.29	Heavy Rail
2012	Pink Line	35	30	105	1.17	Mono Rail
2015	Yellow Line	30	23	109	1.30	Mono Rail
2015	Grey Line	26	15	54	1.73	Mono Rail
2018	Brown Line	22	20	92	1.10	Mono Rail
2018	Hat Yai Monorail	13	12	14	1.08	Mono Rail

**ปีที่แสดงคือปีที่เปิดให้บริการสำหรับรถไฟฟ้าที่ให้บริการแล้ว และปีที่ปรากฏในรายงานความเหมาะสมสำหรับรถไฟฟ้าที่ยังไม่ได้เปิดให้บริการ

Fig. 1 Railway Under Study

ผลการศึกษามูลค่าการลงทุนระบบรถไฟคิดแบบต่อกิโลเมตร ทั้งของรถไฟฟ้าแบบรางเหล็กและรถไฟฟ้าแบบ Monorail แสดงดัง Fig. 2 และ Fig. 3 จะเห็นได้ว่ามูลค่าเงินลงทุนแบบไม่รวมมูลค่าของตัวรถไฟฟ้าของรถไฟแบบรางเหล็กจะอยู่ระหว่าง 369 – 613 ล้านบาท/กม เฉลี่ย 528 ล้านบาท/กม และเมื่อรวมมูลค่าขบวนรถไฟฟ้าด้วยก็จะอยู่ระหว่าง 686–986 ล้านบาท/กม เฉลี่ย 840 ล้านบาท/กม ในขณะที่ระบบรถไฟฟ้าแบบรางเดี่ยว (Monorail) จะอยู่ที่ประมาณ 347–499 เฉลี่ย 408 ล้านบาท/กม และ 432–736 เฉลี่ย 573 ล้านบาท/กม ตามลำดับ อย่างไรก็ดีสำหรับโครงการ Monorail หาดใหญ่นั้นมีมูลค่าการลงทุนค่อนข้างต่ำเนื่องมาจากในช่วงเริ่มต้นโครงการมีความต้องการใช้

ขบวนรถไฟฟ้าเพียง 7 ขบวน ขบวนละ 2 ตู้โดยสาร รวมเป็น 14 ตู้โดยสาร ซึ่งเป็นจำนวนที่มีความแตกต่างจากโครงการต่างจากโครงการอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตเห็นว่าเมื่อไม่พิจารณามูลค่าลงทุนของขบวนรถ มูลค่าของระบบประกอบอื่นๆ จะมีความใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

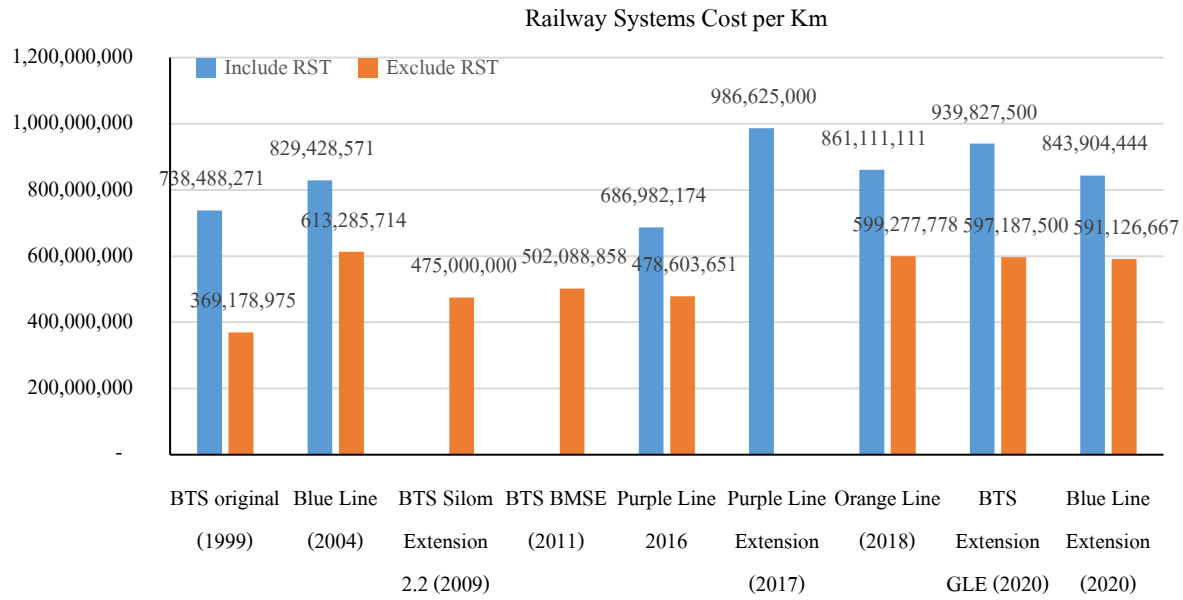


Fig. 2 Railways System Cost per Km

ผลการศึกษาเมื่อแยกวิเคราะห์สัดส่วนมูลค่าการลงทุนของระบบย่อยที่ประกอบเข้ากันเป็นระบบรถไฟฟ้าทั้งของรถไฟฟ้าแบบล้อเหล็กและรถไฟฟ้าแบบล้อยางแสดงดัง Fig. 4 และ Fig. 5 โดยที่ตัวรถไฟฟ้าจะมีมูลค่าสูงที่สุด รองลงมาคือระบบไฟฟ้า ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบสื่อสาร สำหรับระบบอื่นๆ เช่นระบบเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ เครื่องมือเครื่องจักรในศูนย์ซ่อม ประตูกั้นชานชาลา และต่ำที่สุดคือระบบ SCADA โดยมีสัดส่วนที่ใกล้กันมากและสามารถสลับลำดับกันได้ขึ้นอยู่กับผู้ประเมินราคาในโครงการนั้นๆ

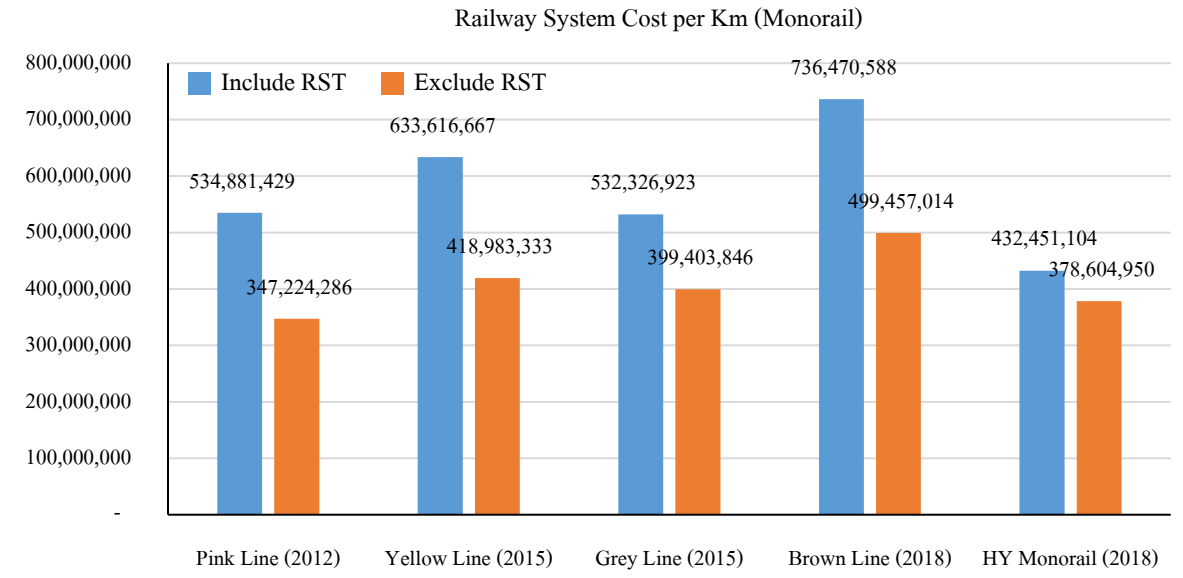


Fig. 3 Railways System Cost per Km (Monorail)

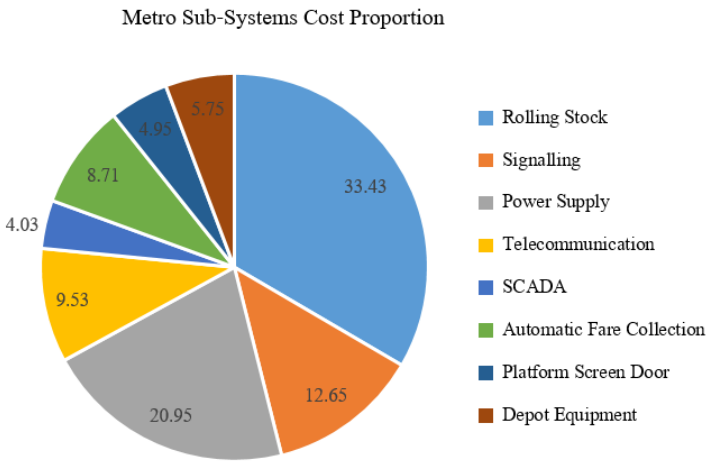


Fig. 4 Metro Sub-Systems Cost Proportion

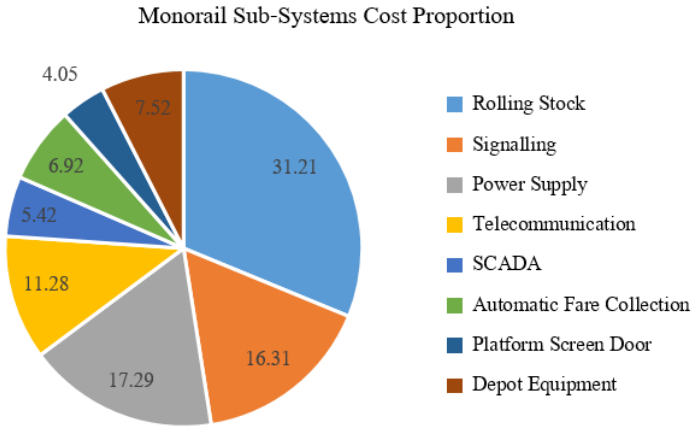


Fig. 5 Sub-Systems Cost Proportion (Monorail)

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากข้อมูลการศึกษาจะสังเกตเห็นว่ามูลค่าการลงทุนของระบบรถไฟฟ้าแบบล้อเหล็กจะสูงกว่ารถไฟฟ้าแบบรางเดี่ยว (Monorail) โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 46 และร้อยละ 30 เมื่อไม่รวมมูลค่าของตัวรถไฟฟ้า ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากขนาดและชิ้นส่วนของรถไฟฟ้าที่ต่างกัน ขนาดและความยาวของชานชาลาที่ต่างกัน อีกทั้งโครงการรถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) ที่ศึกษาจะเป็นรูปแบบทางยกระดับทั้งหมด ในขณะที่รถไฟฟ้าล้อเหล็กมีทั้งแบบทางยกระดับ และอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งมีอาจมีผลกระทบกับมูลค่าการลงทุนของบางระบบเช่น ประตูกั้นชานชาลา ระบบสื่อสาร ดังนั้นในงานวิจัยเรื่องการสร้างรูปแบบการคำนวณหามูลค่าการลงทุนของระบบรถไฟทั้งสองชนิดจะต้องค่า multiplier เข้ามาเกี่ยวข้อง

และเมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนมูลค่าการลงทุนของระบบย่อยแต่ละระบบที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบรถไฟจะเห็นว่าทั้งระบบรถไฟฟ้าแบบล้อเหล็กและรถไฟฟ้าแบบ Monorail มีผลที่สอดคล้องกันกล่าวคือมูลค่าของตัวรถไฟฟ้า (Rolling Stock) จะเป็นสัดส่วนที่สูงสุดโดยมีปริมาณถึงกว่าร้อยละ 30 รองลงมาคือระบบไฟฟ้า (Power

Supply System) ประมาณร้อยละ 20 ระบบอาณัติสัญญาณ (Signalling) ประมาณร้อยละ 12–16 และระบบอื่นๆ ลดหลั่นกันลงมาเรื่อยๆ อาจมีการเรียงลำดับสัดส่วนที่ต่างกันบ้างในบางระบบแต่ไม่ได้ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ชนิดและจำนวนของขบวนรถไฟฟ้ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมูลค่าการลงทุนของโครงการ เพราะระบบอื่นๆจะมีคุณลักษณะคล้ายคลึงกันมาก

เอกสารอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. 2555. รายงานศึกษาทบทวนความเหมาะสมโครงการรถไฟฟ้าสายสีชมพู ช่วงแคราย-มีนบุรี.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. 2558. รายงานศึกษาทบทวนความเหมาะสมโครงการรถไฟฟ้าสายสีเหลือง ช่วงลาดพร้าว-สำโรง.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. 2561. รายงานการศึกษาและวิเคราะห์โครงการตามพระราชบัญญัติการให้เอกชนร่วมลงทุนในกิจการของรัฐ 2556 โครงการรถไฟฟ้าสายสีส้ม ช่วงตลิ่งชัน-มีนบุรี.

สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร. 2558. โครงการศึกษาความเหมาะสม จัดทำแบบเบื้องต้น และจัดเตรียมเอกสารประกวดราคา โครงการรถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) สายสีเทา ช่วงวัชรพล-สะพานพระราม 9

สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร. 2558. รายงานความเหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจ วิศวกรรม และผลกระทบสิ่งแวดล้อม .

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร กระทรวงคมนาคม. 2561. รายงานการศึกษาความเหมาะสมโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำตาล ช่วงแคราย-ลำสาลี.

องการบริหารส่วนจังหวัดสงขลา. 2563. รายงานเสนอผลการศึกษาและวิเคราะห์โครงการ ตามมาตรา 22 แห่งพระราชบัญญัติการร่วมลงทุนระหว่างรัฐและเอกชน พ.ศ. 2562 โครงการระบบขนส่งมวลชนโดยระบบรางอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.

European Investment Bank, Railway Project Appraisal Guidelines (RAILPAG), European Commission. Project Cost Estimating Manual.

Flyvbjerg et al. 2008. Comparison of capital costs per route-kilometre in Urban Rail. European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR) 8: 17–30.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย โครงการรถไฟฟ้า. https://www.mrta.co.th/th/projectelectrictrain/bangkok-and-vicinities/, 3 ธันวาคม 2563.

การศึกษาวิธีการยืดอายุการใช้งานของพื้นล้อรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ โดยการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถทุกวัน

A study of the extension of wheel thread service life of the airport rail link train by alternating daily running directions

เจษฎา อุปโยคิน*, กฤษดนัย พีระพลชัยกุล, อัสนี หวังสถิตไพศาล, อิสรา สร้างเกียรติขจร, วิชัย ศิวะโกศิษฐ

Jedsada Upayokhin*, Kritdanai Peerapolchaikul, Ausanee Whangsatidpaisan, Itsara Srangkiatkajorn, Wichai Siwakosit

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kasetsart University, Bangkok 10900, Thialand.

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาวิธีการยืดอายุการใช้งานของพื้นผิวหน้าสัมผัสล้อรถไฟที่ใช้งานในระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ โดยการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถทุกวัน และทำการรวบรวมข้อมูลจากสถิติการกลึงล้อรถไฟ ตามรอบการซ่อมบำรุง ในระยะเวลาประมาณ 3 ปีย้อนหลัง ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์และคำนวณระยะทางการใช้งานของล้อที่เพิ่มขึ้น ถ้ามีการสร้างจุดกลับรถในช่วงระหว่าง สถานีลาดกระบังและสถานีสุวรรณภูมิ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการสลับทิศทางการเดินรถสามารถยืดอายุการใช้งานของล้อรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ได้ระยะทางประมาณ 60,000 กิโลเมตร คิดเป็นอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 7.69

คำสำคัญ: การยืดอายุการใช้งานของพื้นล้อ, ล้อรถไฟ, แอร์พอร์ต เรล ลิงก์

Abstract

This paper presents a study of the extension of wheel thread service life of the airport rail link train by alternating daily running directions. The 3 year records of wheel turning depth were studied and applied for a calculation of extended service life of a wheel set in the case that the reverse triangle track between Suvarnabhumi and Ladkrabang stations could be provided. The results showed that the daily alteration of running directions could extend the service life of a wheel set for 60,000 km or maximum 7.69 % of the current service life.

Keywords: airport rail link, extension of wheel thread service life, train wheel

คำนำ

ในปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนของประเทศไทยเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาเร่งด่วนที่มีการจราจรติดขัด ซึ่งระบบรถไฟฟ้าของประเทศไทยมีการใช้งานล้อคอนทัวร์ (wheel profile) S1002 เป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นลักษณะรูปทรงของหน้าตัดล้อรถไฟตามมาตรฐานสหภาพยุโรป EN 13715 ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากล้อโปรไฟล์อื่นๆ คือ พื้นล้อจะมีความโค้งรับกับหัวราง ไม่ว่าจะเป็นรถไฟฟ้าบีทีเอส รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน หรือรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์

ล้อรถไฟฟ้าของแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ ที่ผ่านการใช้งานในทุกๆวัน อาจจะเกิดความสึกหรอหรือเสียหายขึ้นได้จากปัจจัยหลากหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นความเร็วของขบวนรถที่ใช้งาน สภาพของทางรถไฟและโหลดต่างๆที่ขบวนรถจะต้องรองรับนั้น และจากข้อมูลสถิติของการกลึงล้อจะพบว่าการสึกหรอของพื้นผิวหน้าสัมผัสล้อของล้อทั้งสองข้าง จะมีค่าอัตราการสึกหรอที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ต้องทำการกลึงล้อข้างที่เกิดการสึกหรอน้อยกว่าในปริมาณที่มากกว่า เพื่อให้เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อทั้งสองข้างมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อความคล่องตัวและความปลอดภัยในการให้บริการ แก่ผู้โดยสารต่อไป ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อล้อข้างที่เกิดการสึกหรอน้อยกว่าไปโดยที่ไม่จำเป็น และทำให้อายุการใช้งานล้อสั้นลงไปด้วยเช่นเดียวกัน

การศึกษาวิธีการยืดอายุการใช้งานของพื้นล้อรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ จะเป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลของสถิติการกลึงล้อในระยะเวลาประมาณ 3 ปีย้อนหลัง และทำการคาดการณ์เพิ่มเติมว่าถ้าเกิดมีการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถในทุก ๆ วันจะสามารถยืดอายุการใช้งานของพื้นล้อได้มากน้อยเพียงใดนั่นเอง



Fig. 1 CITY LINE of Airport Rail Link

ทฤษฎีและหลักการ (theory and principle)

เนื่องจากในปัจจุบัน อัตราของการสึกหรอของล้อทั้งสองข้างของขบวนรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ มีขนาดที่ ไม่เท่ากัน ซึ่งเกิดจากสภาพของเส้นทางวิ่งที่มีทางโค้งหลักเพียงทางโค้งเดียว ตรงบริเวณที่ออกจากสถานีลาดกระบัง ไปยังสถานีสุวรรณภูมิ ประกอบกับขบวนรถไฟฟ้ามีการวิ่งแบบทางเดียวทั้งขาไปและขากลับ จึงส่งผลให้ในแต่ละครั้งที่ทำการกลึงล้อ จะต้องทำการกลึงล้อข้างที่เกิดการสึกหรอน้อยกว่าออกไปเป็นปริมาณที่มากกว่า เพื่อให้ล้อทั้งสองข้าง มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกันและพร้อมที่จะนำออกไปให้บริการต่อไป จึงเป็นการสูญเสียเนื้อล้อ

ข้างที่มีการสึกหรอน้อยกว่าไปโดยไม่มีประโยชน์ ดังนั้น ถ้าสามารถหาวิธีที่จะทำให้ล้อทั้งสองข้างที่ผ่านการใช้งานมาเกิดการสึกหรอที่ใกล้เคียงกันก็จะช่วยลดปัญหาการสูญเสียเนื้อล้อไปโดยเปล่าประโยชน์และช่วยยืดอายุการใช้งานของตัวล้อให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น โดยจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนล้อใหม่ไปด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งแนวทางที่งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาก็คือการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถในทุก ๆ วัน เพื่อเป็นการทำให้อัตราการสึกหรอของล้อทั้งสองฝั่งมีขนาดที่ใกล้เคียงกันนั่นเอง แต่สืบเนื่องจาก ในปัจจุบันทางแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ยังไม่มีโครงสร้างที่สามารถใช้เป็นจุดกลับรถของขบวนรถไฟฟ้าได้ในเส้นทางปัจจุบัน แต่ในอนาคตอันใกล้นี้ จะเกิดโครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อมสามสนามบินโดยจะมีการใช้โครงสร้างเดิมของทางแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะมีการสร้างโครงสร้างไว้เป็นจุดกลับรถของขบวนรถไฟฟ้าในอนาคต โดยทางผู้วิจัยคาดการณ์ว่า จุดที่มีโอกาสสร้างจุดกลับรถเพิ่มเติมได้มากที่สุด คือ ในช่วงทางที่ออกจากสถานีลาดกระบังไปยังสถานีสุวรรณภูมิ โดยรายละเอียดที่ทางผู้วิจัยได้คาดการณ์เกี่ยวกับการเดินรถในช่วงกลับรถของขบวนรถไฟฟ้านั้นจะแสดงให้เห็นดังใน Fig.2 ค่าที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอของล้อรถไฟ ได้แก่ อัตราการสึกหรอของพื้นล้อต่อระยะทางวิ่ง และความลึกในการกลึงล้อในแต่ละรอบของการซ่อมบำรุง เป็นไปตาม Table 1

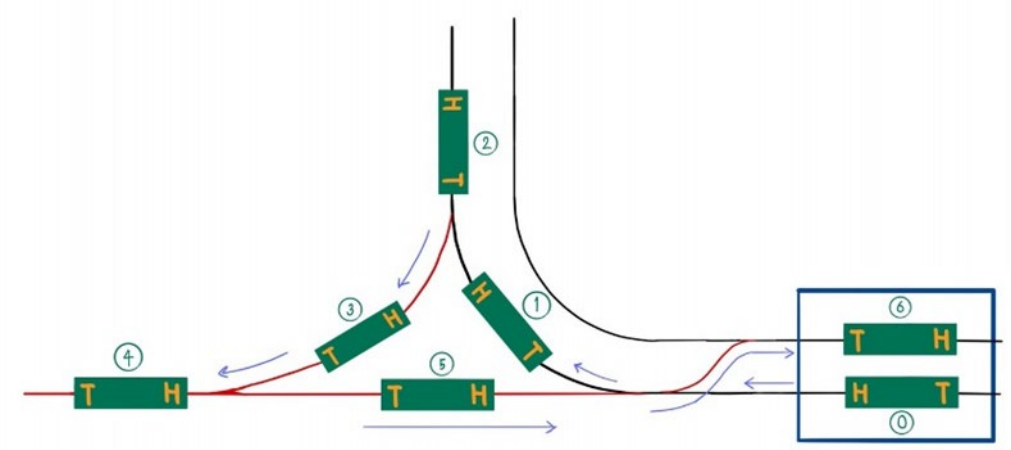


Fig. 2 Predict Triangular junction of Airport Rail Link between LAT KRABANG station and Suvarnabhumi station

Table 1 Wheel thread wear parameters

	Left	Right
Wear depth (mm)	$(\partial y/\partial s)_L \Delta s = Y_L$	$(\partial y/\partial s)_R \Delta s = Y_R$
Turning depth (mm)	Y_{T_L}	Y_{T_R}

โดยที่ Y คือ ระยะการสึกหรอของพื้นล้อรถไฟ ณ ตำแหน่งที่ทำการวัด, mm

s คือ ระยะทางในการเดินรถ, km

Δs คือ ระยะทางในการเดินรถของขบวนรถนั้น ๆ ในแต่ละรอบของการกลึงล้อ

$\frac{\partial y}{\partial s}$ คือ อัตราการสึกหรอของพื้นล้อรถไฟต่อระยะทางในการเดินรถ

Y_T คือ ระยะความลึกในการกลึงล้อรถไฟเพื่อทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางล้อทั้งสองข้างมีขนาดที่เท่ากัน

ซึ่งหากมีการสร้างโครงสร้างทางกลับรถให้ขบวนรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ ดังที่ได้เสนอไปดังกล่าวก่อนหน้านี้ อัตราการสึกหรอของพื้นล้อรถไฟ $(\partial y/\partial s)_{Avg}$ จะเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของทั้งล้อซ้ายและล้อขวา โดยที่

$$(\frac{\partial y}{\partial s})_{Avg} = \frac{1}{2}((\frac{\partial y}{\partial s})_{L} + (\frac{\partial y}{\partial s})_{R}) \quad (1)$$

และ ระยะการสึกหรอของล้อรถไฟฟ้าโดยเฉลี่ย Y_{Avg} จะกลายเป็น

$$Y_{Avg} = (\frac{\partial y}{\partial s})_{Avg}.\Delta S \quad (2)$$

โดยมีระยะความลึกในการกลึงล้อ (Y_T) เป็น

$$Y_T = min\{Y_{T_L}, Y_{T_R}\} \quad (3)$$

ซึ่งจะเลือกเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการกลึงล้อเนื่องจากไม่จำเป็นที่จะต้องเผื่อระยะการกลึงที่ชดเชยความไม่เท่ากันของขนาดล้อทั้งสองข้างแล้วนั่นเอง

โดยจะมีการเก็บข้อมูลการสึกหรอและข้อมูลการกลึงของล้อรถไฟฟ้า แอร์พอร์ต เรล ลิงก์ ประเภทขบวนรถ CITY Line 01 และนำมาวิเคราะห์และทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณที่ได้จาก Equation 1 และ 2 เพื่อตรวจสอบว่าสามารถยืดอายุการใช้งานของล้อรถไฟได้มากน้อยเพียงใดนั่นเอง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการที่ได้เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์สถิติของการกลึงล้อ ประกอบกับการสังเกตการสึกหรอของพื้นผิวหน้าสัมผัสล้อที่เกิดขึ้นจากหน้างานจริงทำให้พบว่าพื้นผิวหน้าสัมผัสล้อทั้งสองข้างของขบวนรถไฟฟ้า แอร์พอร์ต เรล ลิงก์ มีอัตราการสึกหรอที่ไม่เท่ากัน โดยส่วนใหญ่จะเกิดการสึกหรอที่ล้อฝั่งขวามากกว่าล้อฝั่งซ้าย ซึ่งก็มีความสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ขบวนรถไฟฟ้ามีการวิ่งในทิศทางเดียวเสมอทั้งขาไปและขากลับ จึงส่งผลให้ล้อทั้งสองข้างมีอัตราการสึกหรอ ที่ไม่เท่ากันนั่นเอง จากปัญหาดังกล่าว ทำให้เวลาที่ถึงรอบการกลึง หลังจากผ่านการใช้งานเป็นระยะทาง 60,000 กิโลเมตรนั้นจะต้องทำการกลึงล้อด้านที่เกิดการสึกหรอน้อยกว่าในปริมาณที่มากกว่าเพื่อให้เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อทั้งสองข้างหลังการกลึงมีค่าใกล้เคียงกันส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อของล้อไปโดยไม่จำเป็นและทำให้อายุการใช้งานของล้อนั้นสั้นลงเรื่อยๆ ตามขีดจำกัดที่ได้กำหนดไว้ คือ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อถูกกลึงจากค่าเริ่มต้นที่ 850 มิลลิเมตร จนเหลือ 786 มิลลิเมตร จะต้องทำการเปลี่ยนล้อใหม่ในทันที



Fig. 3 Depot of Airport Rail Link and Turning operation

ภายหลังจากที่ได้วิเคราะห์ข้อมูลและพบปัญหาดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงได้ลองนึกถึงแนวทางในการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถในทุกวัน เพื่อต้องการให้อัตราการสึกหรอของพื้นล้อรถไฟ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งได้ทำการคาดการณ์ โดยอ้างอิงจากข้อมูลทางสถิติของการกลึงล้อจริง เพื่อพิสูจน์ว่าหากทำการสลับล้อในการใช้งานจะช่วยยืดอายุการใช้งานได้มากหรือน้อยเพียงใดโดยในเอกสารฉบับนี้จะขอยกผลการคาดการณ์ข้อมูลของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรล ลิงก์ ประเภท CITY Line 01 ในเพลาที่ 1 มาเป็นตัวอย่างประกอบ

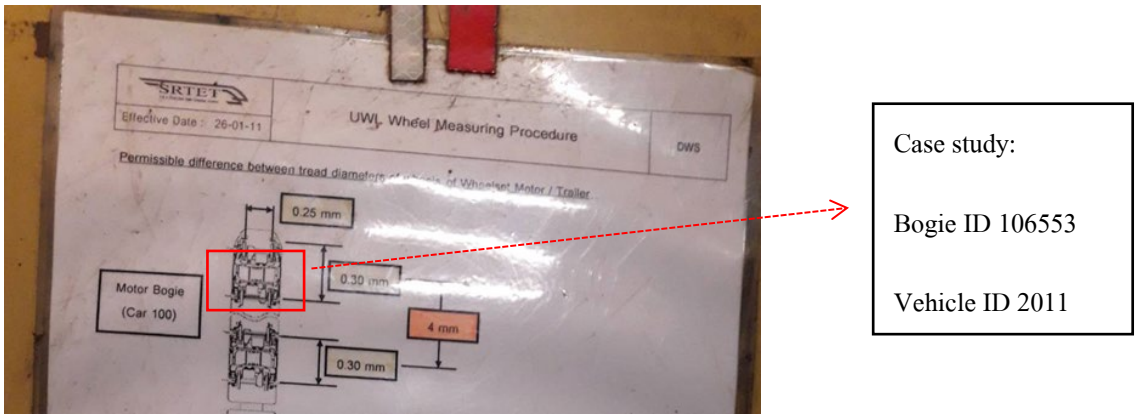


Fig. 4 Top view of Airport Rail Link train

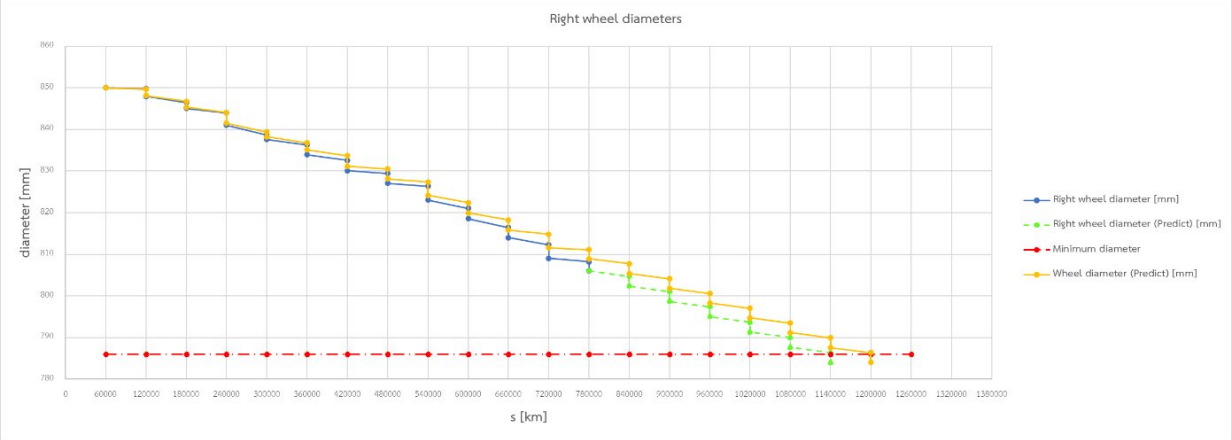


Fig. 5 Left wheel diameters

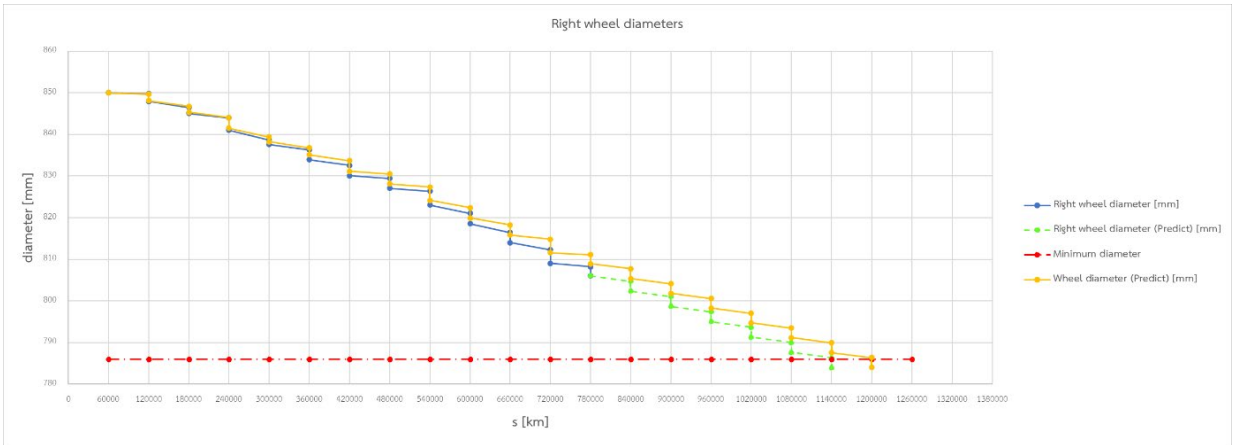


Fig. 6 Right wheel diameters

ใน Fig. 5 และ Fig. 6 จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ของแนวทางที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในรูปแบบกราฟเปรียบเทียบระหว่างล้อที่ทำการทำนายและล้อที่ใช้งานจริงตามข้อมูลทางสถิติของการกลึงล้อ ของเพลาล้อทางด้านซ้ายของขบวนรถ และเพลาล้อทางด้านขวาของขบวนรถตามลำดับ โดยในแกน y จะเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อที่มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ส่วนแกน x จะเป็นระยะทางที่ล้อสามารถใช้งานได้ในหน่วยกิโลเมตรนั่นเอง โดยรายละเอียดในกราฟจะประกอบไปด้วยเส้นประสีแดงที่แสดงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 786 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดการใช้งานเพลาล้อของทางผู้ผลิต เส้นสีน้ำเงินและสีเขียวแสดงถึงค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางล้อตามข้อมูลทางสถิติจริง ส่วนเส้นสีเหลืองนั้นจะแสดงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางล้อของ เพลาล้อที่ได้ทำนายขึ้นมาใหม่โดยใช้แนวทางการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถนั่นเอง โดยสาเหตุที่จะต้องแยกผลลัพธ์ที่คำนวณได้ออกเป็นกราฟเปรียบเทียบของเพลาล้อซ้ายและเพลาล้อขวา เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้สังเกตเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนนั่นเอง

Table 2 Wheel turning operation CITY Line 01

Wheel set	Service life extend	(%)
Axle 1, 2 additional distance 60,000 kilometers	60000/1,140,000	5.26
Axle 3, 4 additional distance 60,000 kilometers	60000/1,200,000	5
Axle 5, 6, 7 and 8 additional distance 60,000 kilometers	60000/780,000	7.69
Axle 9, 10 additional distance 60,000 kilometers	60000/840,000	7.14
Axle 11, 12 additional distance 60,000 kilometers	60000/780,000	7.69

Motor bogie = Axle 1–4 and Axle 9–12, Trailer bogie = Axle 5–8

สรุป

จากการศึกษาข้อมูลสถิติการกลึงล้อย้อนหลังเทียบกับการคาดการณ์ในกรณีที่ทำการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถไฟฟ้า CITY Line 01 พบว่าระยะทางที่สามารถใช้งานล้อมีค่าเพิ่มขึ้นหรือกล่าวได้ว่าสามารถยืดอายุการใช้งานของพื้นล้อรถไฟฟ้าได้ถ้าเราทำการสลับทิศทางการวิ่งของขบวนรถไฟฟ้า เพราะจะทำให้อัตราการสึกหรอของล้อทั้งสองฝั่งมีค่าใกล้เคียงกัน และลดปัญหาในเรื่องที่จะต้องกลึงล้อที่มีการสึกหรอน้อยกว่าไปโดยไม่จำเป็นได้นั่นเอง ซึ่งในกรณีตัวอย่างนี้เพลาล้อทั้ง 12 เพลาล้อของขบวนรถ CITY Line 01 จะสามารถยืดอายุการใช้งานได้เป็นระยะทางเท่ากับ 60,000 กิโลเมตร โดยมีอัตราการยืดอายุการใช้งานของแต่ละเพลาล้อเป็นไปตาม Table 2 ซึ่งจะทำให้สามารถทำการกลึงเพิ่มได้อีก 1 รอบการกลึงนั่นเอง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับขบวนรถไฟฟ้า CITY Line 01

เอกสารอ้างอิง

บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด. 2563. Airport Rail Link. https://www.srtet.co.th/index.php/th/system-airport-expressline/maintenance-main/maintainance-center-2, 24 ธันวาคม 2563.

วิชัย ศิวะโกศิษฐ. 2563. หลักการวิศวกรรมระบบราง, พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก. 2563. รถไฟความเร็วสูงเชื่อม 3 สนามบิน. https://eeco.or.th/th/high-speed-rail-connecting-3-airports, 23 ธันวาคม 2563

Lewis, R., Olofsson, U. 2009. Wheel-rail interface handbook. Woodhead Publishing, Granta Park.

การพัฒนาเครื่องมือวัดความสึกหรอของหัวราง BS100A

A development of BS100A rail head wear measuring device

วิลาวัลย์ ลีลาประทักษ์*, กรรมมันต์ ชูประเสริฐ, วิชัย ศิวโกศิษฐ

Wilawan Lelapratak*, Kummun Chooprasird, Wichai Siwakosit

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: wilawan.le@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือที่มีกลไกการทำงานเป็นแขนกลสองแขนซึ่งมีการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบหมุน และมีตัวเข้ารหัสเป็นตัวรับค่ามุมที่เคลื่อนที่ในการวัดให้มีสามารถวัดค่าความสึกของรางรถไฟได้ โดยจะทำการวัดค่าของหัวรางทั่วไปที่ไม่มีการสึกหรอด้วยเครื่องมือข้างต้น แล้วนำผลที่ได้ไปเทียบกับค่าที่วัดจากเครื่อง CMM ก่อนเพื่อหาค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์สูงสุดของอุปกรณ์ จากนั้นจะทำการจำลองหัวรางที่สามารถวัดค่าความสึกของรางได้อย่างแน่นอนขึ้นมา และนำเครื่องมือเดิมไปวัดค่าหัวรางจำลอง เพื่อหาค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ในการวัดความสึกหรอของราง นำค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ในการวัดความสึกของรางมาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์สูงสุด เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนพิกัดของความสึกหรอของหัวราง BS100A ของเครื่องมือ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อนำเครื่องมือดังกล่าวไปวัดความสึกหรอของรางในพื้นที่จริงได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การวัดความเสียหาย, ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์, เครื่องมือวัดแขนกลสองแขน, รางรถไฟ

Abstract

The aim of this research is to develop a measuring instrument which operates by a mechanism consists of two mechanical arms. The movements of both arms are provided by rotational joints with the encoder as a receiver of the moving angle in the measurement. First of all, use the mentioned instrument to measure standard rail, then compare the result with the data measured by Coordinate Measuring Machine (CMM) to find the maximum absolute error of the instrument. Secondly, use the same instrument to measure imitate worn rail to observe the absolute error in measuring rail wear. Subsequently, compare the absolute error in measuring rail wear with the maximum absolute error to check an instrument error of the rail head wear measurement which will be further developed tool for implementation in the real site.

Keywords: absolute error, measurement of rail wear, rail, two arms mechanism

คำนำ

รถไฟตกรางเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ หนึ่งในสาเหตุเหล่านั้นเกิดจากรางรถไฟที่มีการสึก ซึ่งการสึกของรางรถไฟนั้นเกิดจากรางที่เสียดสีกับล้อรถไฟ หรือเกิดจากการกัดกร่อนของสนิม จึงต้องมีการตรวจสอบการสึกหรอของรางรถไฟเป็นประจำ เพื่อยืดอายุการใช้งานของรถไฟและเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้โดยสาร

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องมือวัดความสึกของหัวราง ซึ่งเป็นเครื่องวัดแขนกล 2 แขน โดยเป็นแขนกลแบบ planar เพื่อตรวจสอบความเสียหายบริเวณหัวรางรถไฟ โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อสอบเทียบเครื่องวัดกับเครื่อง CMM เมื่อสอบเทียบเครื่องวัดแล้วเราจะได้ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ของเครื่องวัดแขนกลมา จากนั้นเราจะนำเครื่องวัดแขนกล 2 แขนมาวัดหัวรางจำลองที่รู้ค่าความสึกของรางแน่นอน เพื่อหาค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ในการวัดความสึกหรอของรางและนำไปเทียบกับค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์สูงสุด เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนพิกัดของความสึกหรอของหัวรางของเครื่องมือ

เครื่องมือวัดแขนกล 2 แขนของงานวิจัยได้ถูกพัฒนามาเพื่อนำมาใช้ในการวัดหัวรางรถไฟ โดยเครื่องวัดแขนกลนั้นมีใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ทว่ามีราคาที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อลดต้นทุนจากการซื้อเครื่องต้นแบบ โดยนำไปพัฒนาให้เหมาะกับการใช้งานในไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine)

เครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) หรือเครื่องวัด 3 มิติ คือเครื่องมือที่ใช้ในการวัดรูปทรงทางเรขาคณิตของวัตถุทางกายภาพ การตรวจวัดนั้นจะใช้หัว probe สัมผัสวัตถุในตำแหน่งที่ต้องการวัด ซึ่งหัว probe นั้นอาจถูกควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงานหรือสั่งการจากคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จาก CMM นั้นจะระบุเป็นพิกัดคาร์ทีเซียนสามมิติ (แกน XYZ) (เวธกา, 2562)



Fig. 1 CMM (Coordinate Measuring Machine)

เครื่องวัดแขนกล 2 แขน

เครื่องวัดแขนกล 2 แขน ประกอบด้วย incremental rotary encoder 2 ตัว ทำหน้าที่ในการตรวจจับทิศทางการหมุนที่แขนเคลื่อนที่โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino MEGA 2560 + Encoder Counter R2) เป็นตัวประมวลผลสัญญาณของ encoder แล้วแปลงมาเป็นมุมที่แขนกลเคลื่อนที่ไป โดยบริเวณปลายของแขนกลที่ 2 จะมี Round Nut เพื่อใช้สัมผัสพื้นผิวที่ต้องการวัด ดัง Fig. 2

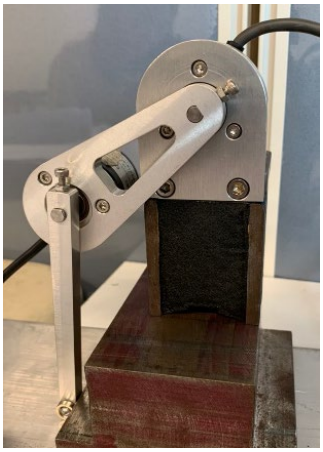


Fig. 2 Two Arm Mechanism

การหาตำแหน่ง Round Nut ของเครื่องวัดแขนกล 2 แขน

การหาตำแหน่งจากการใช้เครื่องวัดแขนกลนั้นจะคำนวณด้วยวิธีทางเรขาคณิต โดยเปลี่ยนค่าเชิงมุมของ encoder ที่วัดได้ตามแขนกลที่เคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวหน้าตัดของรางรถไฟให้เป็นตำแหน่งเชิงเส้นของหน้าตัดของรางรถไฟ ทำให้เกิดเป็นรูปร่างสองมิติดัง Equation 1 และ 2

$$x = l_1\cos(\theta_A + \theta_1) + l_2\cos(\theta_A + \theta_B + \theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$y = l_1\sin(\theta_A + \theta_1) + l_2\sin(\theta_A + \theta_B + \theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

โดย x คือ ตำแหน่งบนแกน x หน่วยเป็น มม.

y คือ ตำแหน่งบนแกน y หน่วยเป็น มม.

l_1 คือ ความยาวของแขนกลตัวที่ 1 หน่วยเป็น มม.

l_2 คือ ความยาวของแขนกลตัวที่ 2 หน่วยเป็น มม.

θ_1 คือ มุมของแขนกลตัวที่ 1 เทียบกับระนาบ x หน่วยเป็น องศา

θ_2 คือ มุมของแขนกลตัวที่ 2 เทียบกับระนาบ x หน่วยเป็น องศา

θ_A คือ มุมที่ encoder ตัวที่ 1 หมุน หน่วยเป็น องศา

θ_B คือ มุมที่ encoder ตัวที่ 2 หมุน หน่วยเป็น องศา

Equation 1 และ 2 จะนำมาคำนวณโดยสัมพันธ์กับตัวแปรใน Fig. 3 โดย θ_A และ θ_B เป็นตัวแปรที่แปรผันได้

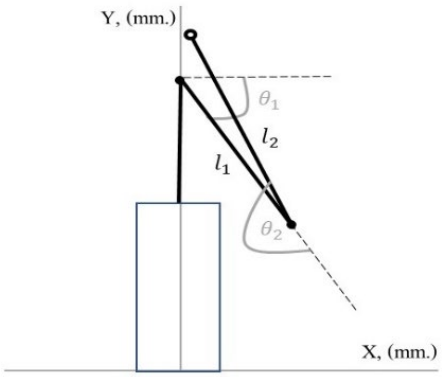


Fig. 3 Two Arm Mechanism Model

อุปกรณ์ยึดเกาะราง

เป็นแผ่นอะลูมิเนียม 2 แผ่นที่ระหว่างกลางมีขาแม่เหล็กยึดติดอยู่ ด้านบนมีแผ่นเหล็กสำหรับวางเครื่องวัดแขนกล 2 แขน และมีแผ่นพลาสติกติดกับแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้วางเครื่องวัดแขนกลเลยจุดที่ต้องการ ใช้ในการยึดเกาะกับรางรถไฟเพื่อเป็นฐานในการวางเครื่องวัดแขนกล 2 แขน เพื่อให้การวัดของแขนกลอยู่ในตำแหน่งเดิมทุกครั้งในการวัด

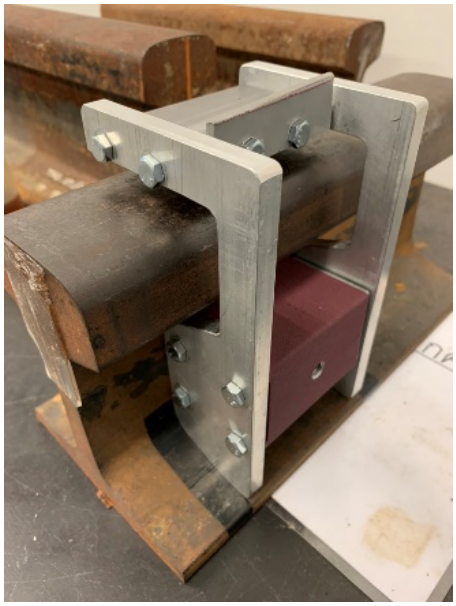


Fig. 4 Bracket

หัวรางจำลอง

เป็นหัวรางจำลองที่ออกแบบขึ้นมาด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS เพื่อให้รู้ค่าความสึกของรางที่แน่นอน ทำขึ้นมาจากไม้อัด โดยมีทั้งหมด 3 รูปแบบดัง Fig. 5



Fig. 5 Rail Wear Models

การติดตั้งเครื่องวัด

ในงานวิจัยนี้ จะติดตั้งเครื่องวัดแขนกลไว้กับอุปกรณ์ยึดเกาะราง โดยเครื่องวัดจะอยู่บริเวณด้านบนแผ่นเหล็ก ชิดกับขอบแผ่นอะลูมิเนียมแผ่นหน้าและแผ่นพลาสติก เมื่อวางได้ตำแหน่งที่ต้องการแล้วแผ่นเหล็กและเครื่องวัดแขนกลจะยึดติดกันด้วยแม่เหล็กที่ฐานของเครื่องวัด หลังจากนั้นวางแขนกลตัวที่ 2 ไว้บนน๊อตที่อยู่ใต้จุดกำเนิดเล็กน้อย เพื่อใช้ตำแหน่งนี้เป็นจุดอ้างอิง Fig. 6



Fig. 6 Two Arm Mechanism at Reference Position

หลังจากติดตั้งเครื่องวัดแขนกล ทำการวัดความยาวและวัดมุมตามระบบพิกัดเชิงขั้วของแขนที่ 1 และ 2 ตาม Fig. 3 เพื่อนำมาใช้ใน Equation 3 และ 4

วิธีสอบเทียบ

เก็บค่า θ_A และ θ_B ที่ได้จากเครื่องวัดแขนกล แล้วนำค่าทุกค่ามาแทนลงใน Equation 3 และ 4 จะได้เป็น

$$x = 65\cos(\theta_A - 47.4) + 98\cos(\theta_A + \theta_B - 47.4 - 187.51) \quad (3)$$

$$y = 65\sin(\theta_A - 47.4) + 98\sin(\theta_A + \theta_B - 47.4 - 187.51) \quad (4)$$

จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่อง CMM เพื่อทำการหาค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์สูงสุด max (Δx) และ max (Δy) จะได้ผลลัพธ์ออกมาดัง Fig. 7 โดยจากภาพแกนในแนวนอน คือ แนวแกน X และแกนในแนวตั้งคือแนวแกน Y มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรทั้ง 2 แกน ค่าที่อยู่ในกราฟคือตำแหน่งต่าง ๆ ที่วัดได้ในแนวแกน X และแกน Y

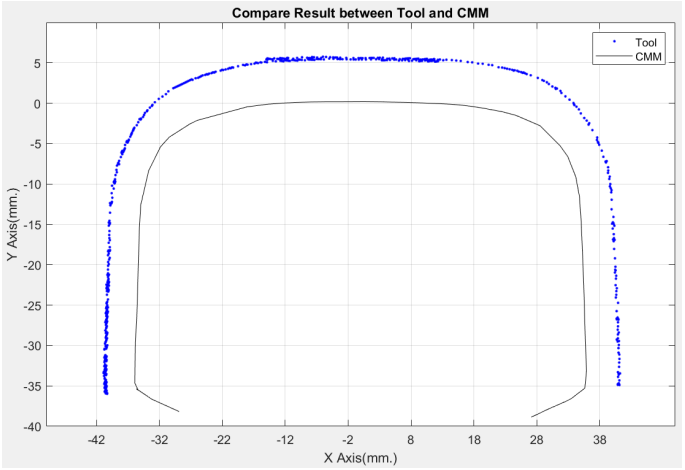


Fig. 7 Compare Result between Tool and CMM

เมื่อพล๊อตกราฟและทำการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB จะเห็นได้ว่าค่า Δx และ Δy ตามแนวแกน x และ y มีค่าเท่ากับ 5.059 มม. และ 5.228 มม. ตามลำดับ ซึ่งเมื่อลบรัศมีของ Round Nut ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.99 มม. ออก ก็จะเหลือค่า Δx และ Δy เป็น 0.069 มม. และ 0.238 มม. ตามลำดับ

การวัดค่าหัวรางจำลอง

นำหัวรางจำลองตัวที่ต้องการจะวัดมาติดที่ปลายของรางรถไฟตาม Fig. 8 เพื่อให้ได้มีจุดกำเนิดเดียวกับการวัดหัวรางจริง

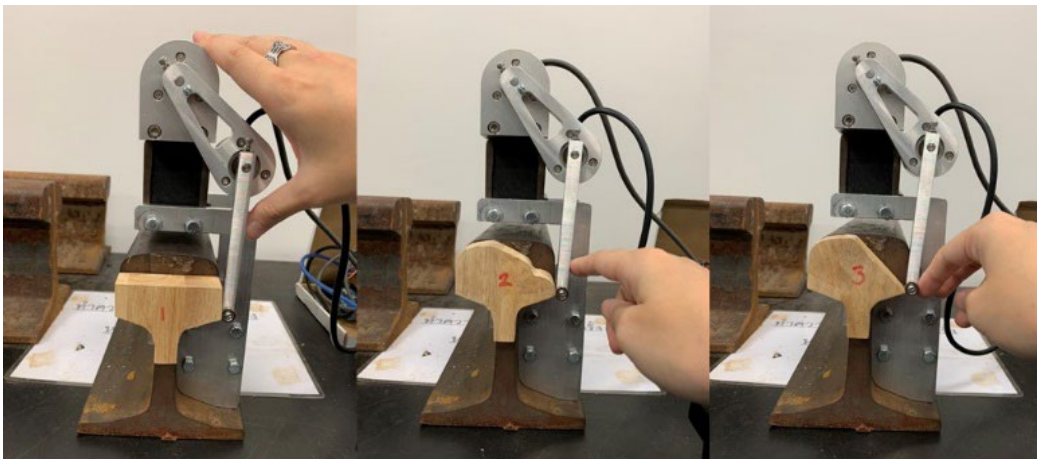


Fig. 8 Measured Rail Wear Model 1, 2 and 3

การวัดการสึกหรอของหัวราง

การวัดการสึกหรอของหัวรางที่กำหนดได้โดย International Union of Railways (UIC) มีการกำหนดได้ตาม Fig. 9 โดยมีการวัดระยะการสึกของหัวรางในแนวดิ่ง w_1 เทียบกับรูปทรงของหัวรางเดิม และมีการวัดระยะการสึกของหัวรางในแนวระดับ w_2 เทียบกับรูปทรงของหัวรางเดิม และระยะการสึกของหัวรางในแนวเส้นทแยงมุม w_3 เทียบกับรูปทรงหัวรางเดิม โดยแนวของเส้นทแยงมุม 45 องศาวัดจากจุดสัมผัสระหว่างขอบรางและเส้นสัมผัสที่ทำมุม 45 องศากับแนวระดับในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และลากเส้นทแยงมุมจากจุดสัมผัสนั้นมาตัดกับเส้นแนวดิ่งที่ลากลงมาจากสันราง (วิชัย, 2563) ซึ่งค่าพิกัดการสึกสูงสุดที่กำหนดให้ใช้ได้ของหัวราง BS100A คือไม่เกิน 27% ของเนื้อที่หน้าตัดหัวราง (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561)

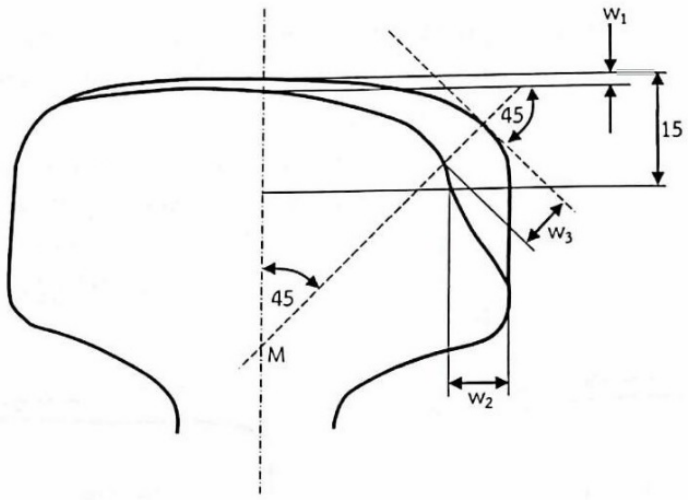


Fig. 9 UIC Rail Head Wear Measurement

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลังจากเก็บข้อมูลจากการวัดหัวรางทั้ง 3 แล้ว นำผลที่ได้มาพล๊อตกราฟในโปรแกรม MATLAB แล้วเปรียบเทียบผลกับผลที่ได้จากรางจริง จะได้ดัง Fig. 10 และ Table 1

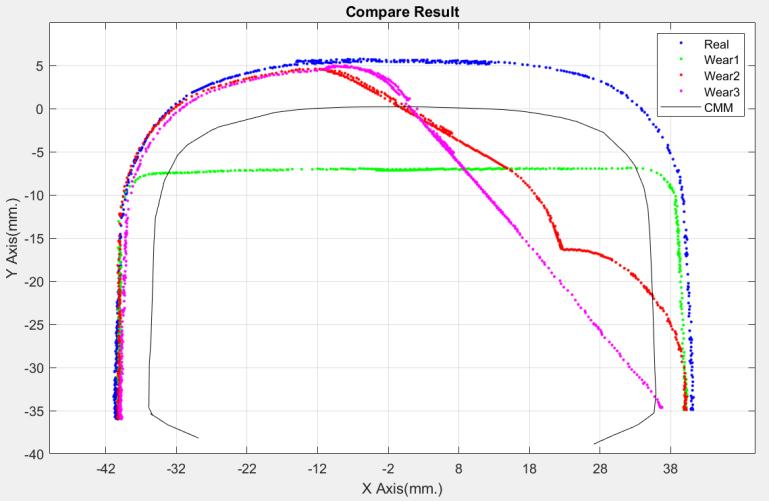


Fig. 10 Compare Result of Real Rail, Rail Wear Model 1, Rail Wear Model 2, and Rail Wear Model 3

Table 1 Result

Real Wear Model	Measured Wear Axis	Result (mm.)	Real Value (mm.)	Absolute Error (Δ) (mm.)
1	w_1	12.634	13	0.366
	w_2	0.987	0	0.987
	w_3	10.97	10.49	0.48
2	w_1	3.257	4.72	1.463
	w_2	17.129	17.30	0.171
	w_3	17.441	17.42	0.021
3	w_1	4.1	5.49	1.39
	w_2	23.293	25.47	2.17
	w_3	22.18	22.01	0.17

โดยภาพใน Fig. 10 แกนในแนวนอน คือ แนวแกน X และแกนในแนวตั้งคือแนวแกน Y มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรทั้ง 2 แกน ค่าที่อยู่ในกราฟคือตำแหน่งต่าง ๆ ที่วัดได้ในแนวแกน X และ แกน Y

จาก Table 1 จะได้ว่า ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ของหัวรางจำลองทั้งสามแบบ มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.17 มม. ซึ่งเมื่อนำมาเทียบกับค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์สูงสุด ที่มีค่า max (Δx) และmax(Δy) เป็น 0.069 มม. และ 0.238 มม. ตามลำดับ แล้ว จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเครื่องมือไปวัดกับหัวรางจำลองแล้วมีค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์มากกว่าค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์สูงสุด แต่เนื่องจากหัวรางจำลองที่สร้างมามีขนาดเล็กกว่าหัวรางจริง และมีความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ เช่น การติดหัวรางจำลองเอียง ตามที่เห็นดังตัวอย่าง Fig. 11



Fig. 11 The Gap between Rail Wear Model and Real Rail & Human Error

จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าเครื่องมือวัดแขนกลสองแขนที่ทำการพัฒนาขึ้นมาสามารถใช้ในการวัดการสึกหรอของรางได้

สรุป

จากการนำเครื่องมือวัดแขนกลสองแขนมาทดสอบด้วยการนำมาเทียบผลที่วัดหัวรางจริงได้กับผลที่วัดด้วยเครื่อง CMM ได้ผลดัง Fig. 7 และนำเครื่องวัดแขนกลสองแขนมาวัดหัวรางสึกจำลองได้ผลดัง Table 1 แล้วนำค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์มาเปรียบเทียบกัน จะได้ว่าเครื่องวัดแขนกลที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำมาใช้ในการวัดการสึกหรอของหัวรางได้จริง

ทว่าในการทำวิจัยครั้งนี้ ยังมีความผิดพลาดจากหัวรางจำลองที่มีขนาดเล็กกว่าหัวรางจริง และความผิดพลาดในการติดตั้งหัวรางจำลองที่เกิดขึ้นจากมนุษย์ ดังนั้นในการนำไปใช้ในพื้นที่จริงจึงไม่เกิดข้อผิดพลาดดังกล่าว

อย่างไรก็ตามในการนำอุปกรณ์ไปใช้ในพื้นที่จริง จะต้องทำการพัฒนาเครื่องวัดแขนกลสองแขนให้สามารถทำงานและบันทึกข้อมูลได้โดยไม่ต้องเชื่อมสายอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อความสะดวกในการพกพาอุปกรณ์ไปใช้งานในพื้นที่จริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กรรมมันต์ ชูประเสริฐ และ รศ.ดร.วิชัย ศิวะโกศิษฐ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไข ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง จนทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ นาย เลิศ ทองเจือ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือในการทำหัวรางสึกจำลองและอุปกรณ์ยึดเกาะรางขึ้นมา

ขอขอบพระคุณ นาย พงษ์ศักดิ์ รุจิพืช ที่ได้ช่วยเหลือในการให้ข้อมูลของหัวรางจริงที่วัดด้วยเครื่อง CMM

ขอขอบพระคุณ นางสาว เวธกา กนกเวชยันต์ รวมถึงทุกคนที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจกันตลอดมา ขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

วิชัย ศิวโกศิษฐ. 2563. หลักการวิศวกรรมระบบราง, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เวธกา กนกเวชยันต์. 2562. เครื่องตรวจวัดหน้าตัดสองมิติของรางรถไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. 2561. คู่มือการบำรุงรักษาโครงสร้างทางรถไฟ. http://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/ProjectOTP/2560/Project06/ManualMA.pdf, 14 ธันวาคม 2563.

เวลาเข้าสู่สมดุลของระบบปรับความดันไฮดรอลิกร่วมกับวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง

Settling time of hydraulic pressure converter system with high-speed on-off valve

อาทิตย์ แสงงาม*, ปิโยรส จิระวัฒนา

Arthit Sangngam*, Piyoros Jirawattana

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, KhonKaen 40002, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: arthit.san@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเวลาเข้าสู่สมดุล ของระบบปรับความดันไฮดรอลิก ด้วยไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ทำงานร่วมกับวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง เป้าหมายของงานวิจัยคือ การคำนวณหาเวลาเข้าสู่สมดุลเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า duty ratio ของสัญญาณสั่งการทำงานของวาล์ว และสัดส่วนการกระจัดของมอเตอร์ต่อปั๊ม โดยที่ระบบปรับความดันไฮดรอลิกที่ทำการศึกษานั้น ประกอบด้วยวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง วาล์วกันกลับ ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์แบบมาตรฐานติดตั้งล้อตุนกำลัง และวาล์วลิ้น หลักการทำงานของระบบเริ่มจากวาล์วเปิดปิดความเร็วสูงได้รับสัญญาณ PWM ที่มีค่า duty ratio และความถี่เป็นตัวแปรในการสั่งทำงาน เป็นการสลับทอร์กไฮดรอลิกที่ทางขาเข้าของไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ มีผลทำให้ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์หมุนสลับขึ้น-ลง และเข้าสู่สมดุลเนื่องจากการต้านการไหลที่ทางออกด้วยวาล์วลิ้น จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มทั้งค่า duty ratio และสัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊ม ส่งผลทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลลดลง

คำสำคัญ: วาล์วความเร็วสูง, เวลาเข้าสู่สมดุล, ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์

Abstract

Settling time of a hydraulic pressure converter with a hydraulic transformer working with high-speed on-off valve is studied in the paper. The goal of the research is to calculate the settling time by changing the duty ratio of the PWM signal and motor-to-pump displacement ratio. The system consists of a high-speed on-off valve driven by a PWM signal, a check valve, a conventional hydraulic transformer with flywheel, and a throttle valve. The system is started by sending a PWM signal with a duty ratio and frequency signal as control variables to a high-speed on-off valve. The control signal forces the opening and closing of the hydraulic torque on the inlet side of the hydraulic transformers. This causes the hydraulic transformers speed to rise and fall. The steady-state is then reached by the load pressure created by the throttle valve. The results shown that increasing both the duty ratio and the motor-to-pump displacement ratio resulted in the reduction of settling time.

Keywords: high-speed valve, hydraulic transformer, settling time

คำนำ

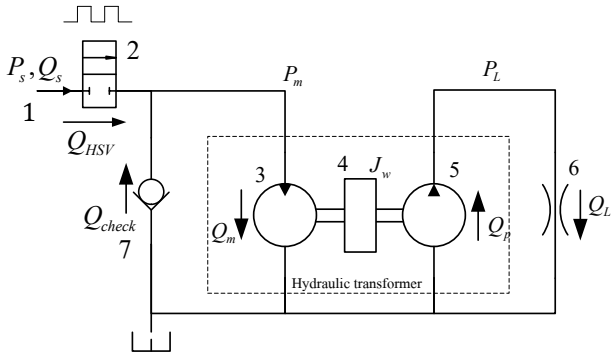
เวลาเข้าสู่สมดุลเป็นค่าที่แสดงถึงความรวดเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณควบคุม การตอบสนองที่รวดเร็วจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เช่นเดียวกันกับระบบควบคุมความดันที่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็ว สำหรับการควบคุมความดันแบบต่อเนื่อง ที่ควบคุมด้วยวาล์วเซอร์โว (servo valve) และวาล์วพรอพพอร์ชันนัล (proportional vavle) มีค่าใช้จ่ายสูงจึงจะมีความแม่นยำ อีกทั้งการออกแบบระบบควบคุมยังมีความซับซ้อนด้วยข้อจำกัดดังกล่าว วาล์วเปิดปิดจึงถูกนำมาใช้ทดแทนการควบคุมด้วยวาล์วแบบต่อเนื่อง ในการใช้วาล์วเปิดปิดที่ทำงานเพียงสองตำแหน่งคือเปิดสุดและปิดสุด จะส่งผลต่อการแกว่งของผลตอบสนองที่ได้ แต่การลดการแกว่งของสัญญาณสามารถทำได้โดยการสลับวาล์วด้วยความถี่สูง

การประยุกต์ใช้วาล์วเปิดปิดกับระบบควบคุมความดันและควบคุมในงานไฮดรอลิกนั้น มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องด้วยคุณสมบัติของวาล์วที่ควบคุมง่ายไม่ซับซ้อน งานวิจัยของ Jeong and Kim (2001) ได้ศึกษาการควบคุมความดันไฮดรอลิก ด้วยวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง การวิเคราะห์ได้รวมผลของพลศาสตร์ของวาล์วด้วย ซึ่งพบว่าความดันเฉลี่ยนั้นขึ้นอยู่กับค่า duty cycle และความถี่ของสัญญาณสั่งทำงาน ส่วนขนาดการแกว่งจะขึ้นอยู่กับค่า duty cycle และความถี่เช่นกัน หลักการทำงานของวาล์วเปิดปิดคือปิดสุดและปิดสุดเท่านั่น จึงทำให้สัญญาณขาออกมีการแกว่งขึ้นและลงสลับกัน เพื่อความราบเรียบของสัญญาณที่ได้จำเป็นต้องมีตัวเหนี่ยวนำไฮดรอลิก (hydraulic indutor) รวมถึงวาล์วเปิดปิดต้องทำงานด้วยความถี่สูง งานวิจัยของ Wang et al. (2011) ทำการออบแบบระบบปรับความดันด้วยวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง โดยใช้มอเตอร์ไฮดรอลิกติดตั้งล้อตุนกำลัง ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฮดรอลิก โดยวงจรที่ออกแบบเหมือนกับวงจรสวิตช์โหมดบัคคอนเวอร์เตอร์ (switchmode buck converter) ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การสลับการทำงานของวาล์ว พบว่าความดันเฉลี่ยที่ทางออกของภาระโหลดนั้นขึ้นอยู่กับค่า duty cycle ของสัญญาณ PWM และสามารถปรับความดันได้อย่างต่อเนื่อง แต่ไม่เกินความดันจากต้นกำลังไฮดรอลิก (supply pressure) นอกจากนี้ยังมีระบบที่สามารถเพิ่มความดันให้สูงกว่าความดันต้นกำลัง ซึ่งเรียกว่าบูสท์คอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในงานวิจัยของ Feng et al. (2013) โดยการใช้มอเตอร์ติดตั้งล้อตุนกำลัง ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำไฮดรอลิก การออกแบบวงจรเหมือนกับวงจรสวิตช์โหมดบูสท์คอนเวอร์เตอร์ (switchmode boost converter) ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับความดันได้สูงกว่าความดันต้นกำลังไฮดรอลิก นอกจากการใช้มอเตอร์เป็นตัวเหนี่ยวนำไฮดรอลิกแล้ว ยังมีตัวเหนี่ยวนำอีกประเภทหนึ่งที่ใช้ในวงจรไฮดรอลิก คือการใช้ท่อเหนี่ยวนำ (inertance tube) (Pan et al., 2014; Pan and Plummer, 2018; Wiens, 2016) เนื่องจากค่าเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับความยาวของท่อ การใช้ท่อความยาวเป็นตัวเหนี่ยวนำจึงมีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ในการติดตั้ง

วาล์วเปิดปิดมีข้อได้เปรียบคือควบคุมง่าย การตอบสนองเร็ว คงทนต่อความปนเปื้อนของน้ำมันไฮดรอลิก จึงทำให้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาวาล์ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวาล์ว การออกแบบวาล์วเปิดปิดแบบหมุนเป็นงานที่ศึกษาถึงการบังคับวาล์วด้วยกลไกการหมุน ดังแสดงในงานวิจัยของ Tu et al. (2008) ด้วยข้อจำกัดของวาล์วที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือเกิดการแกว่ง หรือการกระเพื่อมของผลตอบสนองตามการสั่งของสัญญาณ PWM การลดการแกว่งสามารถทำได้โดยการบังคับวาล์วเปิดปิดด้วยความเร็วสูง โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงความถี่ของวาล์วที่สูงถึง 200 Hz ประยุกต์ใช้งานกับระบบควบคุมไฮดรอลิก (Ouyang et al., 2008) และอีก

คุณสมบัติของวาล์วคือต้องตอบสนองเร็วโดยมีงานที่ศึกษาการตอบสนองของวาล์วเร็วที่ 1 มิลลิวินาที และมีการประยุกต์ใช้กับระบบเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อสั่งจ่ายน้ำมัน (Passarini and Nakajima, 2003)

ระบบไฮดรอลิกมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ใช้สำหรับปรับกำลังทางไฮดรอลิก การควบคุมโดยทั่วไปเป็นการควบคุมแบบต่อเนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงการกระจัดของแต่ละทางการไหล (Lee and Li, 2018; Shen et al., 2013) ขณะเดียวกันมีหลายงานวิจัยที่นำวาล์วเปิดปิดมาใช้แทนระบบที่ควบคุมด้วยวาล์วแบบต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าวาล์วเปิดปิดจะมีข้อดีคือควบคุมง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ผลที่ได้จะเกิดการแกว่งของผลตอบสนอง ซึ่งสามารถลดได้โดยการใช้ล้อตุนกำลัง เพื่อศึกษาผลการตอบสนองของระบบ ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการคำนวณเวลาเข้าสู่สมดุล กับระบบปรับความดันด้วยวาล์วเปิดปิดความเร็วสูงโดยใช้ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์แบบมาตรฐานเป็นตัวเหนี่ยวนำไฮดรอลิก



(1. Pressure line 2. High-speed on-off valve 3. Hydraulic motor
4. Flywheel 5. Hydraulic pump 6. Throttle valve 7. Check valve)

Fig. 1 Pressure converter system with high-speed on-off valve and hydraulic transformer

อุปกรณ์และวิธีการ

หลักการทำงานระบบปรับความดันด้วยวาล์วเปิดปิดความเร็วสูงร่วมกับไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบให้เป็นอุดมคติด้วยสมการคณิตศาสตร์พร้อมทั้งหาคำตอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ระบบปรับความดันไฮดรอลิกด้วยวาล์วเปิดปิดความเร็วสูงร่วมกับไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ประกอบด้วย วาล์วเปิดปิดความเร็วสูงสลับเปิดปิดความดันจากต้นกำลังด้วยการสั่งงานผ่านสัญญาณ PWM วาล์วกันกลับ (check valve) ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์แบบมาตรฐาน (conventional hydraulic transformer) ติดตั้งล้อตุนกำลัง วาล์วลิ้น (throttle valve) ซึ่งแสดงดัง Fig. 1 ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์แบบมาตรฐานมีส่วนประกอบที่เป็นมอเตอร์และปั๊มไฮดรอลิก ตำแหน่งระหว่างการติดตั้งวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง มอเตอร์และวาล์วกันกลับเรียกว่าถังความดันสลับ (switching chamber) ทางเข้ามอเตอร์รับทอร์กของไหลจากถังความดันสลับที่ได้จากการสลับวาล์วเปิดปิด ส่วนทางออกมีปั๊มไฮดรอลิก และต้านการไหลด้วยวาล์วลิ้นเป็นการจำลองภาระโหลด

การทำงานเริ่มจากการเปิดสัญญาณ PWM เป็นการสั่งวาล์วเปิด ความดันและอัตราการไหลในถังความดันสลับมีค่าเท่ากับความดันต้นกำลัง มอเตอร์รับทอร์กของไหลและหมุนด้วยความเร็วเร่งขึ้นขับล้อตุนกำลังและปั๊ม

ความดันที่ทางออกของปั๊มสูงขึ้นด้วยการจำลองจากการต้านของวาล์วลิ้น ความเร็วรอบของไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์และความดันที่ได้เป็นความดันขาขึ้น แสดงดัง Fig. 2a เป็นสถานะของการสะสมพลังงานในล้อตุนกำลัง

การปิดสัญญาณ PWM เป็นการสั่งวาล์วปิด ความดันในถังความดันสลับจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ยังคงหมุนต่อด้วยความเฉื่อยของล้อตุนกำลัง จึงทำให้ดูดน้ำมันจากถังพักผ่านวาล์วกันกลับ ไม่มีทอร์กขับมอเตอร์แต่ระบบถูกต้านโดยภาระโหลดที่เป็นวาล์วลิ้น ทำให้ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์มีความเร็วส่งผลให้ความดันภาระโหลดลดลง แสดงดัง Fig. 2b ระบบจะทำงานสลับเปิดอีกครั้งและเป็นเช่นนี้ต่อไปตามการสั่งการทำงานของวาล์ว ในการวิเคราะห์เพื่อหาความเร็วและความดันนั้นกำหนดวาล์วตอบสนองอย่างรวดเร็วตามสัญญาณ PWM

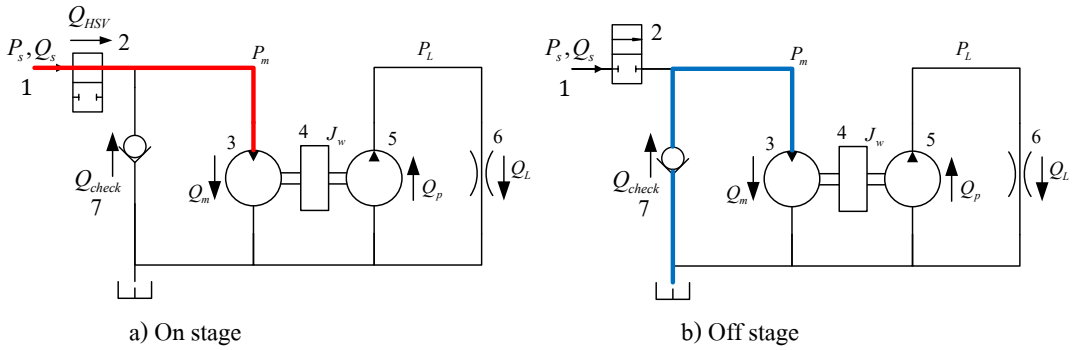


Fig. 2 Working process of pressure converter system

การวิเคราะห์ระบบปรับความดัน

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความดันภาระโหลด โดยกำหนดให้ ที่สภาวะคงตัวระบบสลับการทำงานด้วยความถี่สูง จึงสามารถประมาณความเร็วรอบของไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ให้มีค่าคงที่ และจากการพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ โดยทอร์กขับคือ ทอร์กการไหลจากถังความดันสลับ และทอร์กที่ต้านคือ ทอร์กจากภาระโหลด ซึ่งจำลองโดยวาล์วลิ้น จะได้

$$P_m D_m - P_L D_p = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega \qquad (1)$$

โดยที่ P_m คือความดันทางเข้ามอเตอร์

P_L คือความดันภาระโหลดหรือความดันที่ทางออกปั๊ม

D_m คือการกระจัดของมอเตอร์

D_p คือการกระจัดของปั๊ม

J คือโมเมนต์ความเฉื่อยรวมระหว่างมอเตอร์ ล้อตุนกำลังและปั๊ม

B คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนืดรวม

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากที่สภาวะคงตัว ค่าเฉลี่ยของความดันภาระโหลด หรือความเร็วรอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และหากไม่คิดผลของความหนืด จะทำให้สามารถหาผลความความดันตกเฉลี่ยในหนึ่งคาบของสัญญาณ ได้จากผลต่างระหว่างความดันระบบและความดันในถังสลับ $\Delta P = P_s - P_m$ ส่วนสมการการไหลผ่านวาล์วเปิดปิด จะสามารถหาได้จากสมการอัตราการไหล ตาม Equation 2

$$Q_{HSV} = k_q A_v \sqrt{(P_s - P_m) D} \quad (2)$$

โดยที่ Q_{HSV} คืออัตราการไหลผ่านวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง

k_q คือค่าคงที่การไหลผ่าน $k_q = C_d \sqrt{2/\rho}$

C_d คือค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการไหล

ρ คือความหนาแน่นของน้ำมันไฮดรอลิก

A_v คือพื้นที่หน้าตัดของวาล์วเปิดปิดความเร็วสูง

D คือค่า duty ratio

P_s คือความดันระบบ

อัตราการไหลของภาระโหลด คืออัตราการไหลผ่านวาล์วลิ้น ซึ่งอัตราการไหลผ่านวาล์วลิ้น สามารถคำนวนได้จากความสัมพันธ์ของสมการการไหลผ่านช่องแคบ (orifice) ซึ่งเป็นการจำลองภาระโหลด ตาม Equation 3

$$Q_t = k_q A_t \sqrt{P_L} \quad (3)$$

โดยที่ Q_t คืออัตราการไหลผ่านวาล์วลิ้น

A_t คือพื้นที่หน้าตัดวาล์วลิ้น

ส่วนการไหลของมอเตอร์และปั๊ม จะได้มาจากผลคูณระหว่างความเร็วรอบและการกระจัด นั่นคือ $Q_p = \omega D_p$ และ $Q_m = \omega D_m$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมการของปั๊มและมอเตอร์ในอุดมคติ ไม่มีการคิดของการสูญเสียของระบบ เมื่อมอเตอร์และปั๊มประกอบกันขึ้น เป็นไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ ทั้งสองจะมีเพลาหมุนร่วมกัน อัตราการไหลก็จะเท่ากัน ดังนั้น จะได้

$$Q_m = \frac{D_m}{D_P} Q_p \quad (4)$$

อัตราการไหลของปั๊มคืออัตราการไหลผ่านภาระโหลด $Q_p = Q_t$ และอัตราการไหลผ่านวาล์วเปิดปิดคืออัตราการไหลที่ผ่านมอเตอร์ $Q_{HSV} = Q_m$ ความสัมพันธ์ของ Equation 2, 3 และ4 จะได้ความสัมพันธ์ของสมการความดันที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการการไหล Equation 5

$$k_q A_v \sqrt{(P_s - P_m) D} = \frac{D_m}{D_P} k_q A_t \sqrt{P_L} \quad (5)$$

Equation 1 และ 5 เมื่อพิจารณาสภาวะคงตัวและความหนืดจากของไหลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความดันจากต้นกำลัง ที่สภาวะคงตัวความดันภาระโหลดสมมูล (equivalent load pressure) จะคำนวณได้ตาม Equation 6

$$\bar{P}_L = \frac{P_s D}{\frac{D_p}{D_m} D + \left(\frac{D_m}{D_p} \frac{k_q A_t}{k_q A_v} \right)^2} \quad (6)$$

การคำนวณเวลาสู่สมดุล

การคำนวณเวลาสู่สมดุล คำนวณจากการกำหนดความดันเฉลี่ยของการสลับวาล์วเท่ากับผลคูณระหว่างความดันระบบและค่า duty ratio ($P_m = P_s D$) (Wang et al., 2011) พลศาสตร์ของมอเตอร์และปั๊มที่ได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่เชิงเส้น ตาม Equation 7

$$a - b\omega^2 = \frac{d\omega}{dt} \tag{7}$$

โดยที่ $a = P_s D \frac{D_m}{J},\ b = \frac{1}{J}\frac{D_p^3}{k_q^2 A_t^2}$

การหาผลเฉลยของสมการพลศาสตร์จะได้เป็นดัง Equation 8

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{b}}\left[1 - \frac{2}{e^{2\sqrt{ab}\cdot t} + 1}\right] \tag{8}$$

ความเร็วรอบเพลามอเตอร์ซึ่งต่อร่วมกับปั๊มไฮดรอลิกนั้น เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้วหาได้จากการหาค่าลิมิตของสมการ (8) เมื่อเวลาเข้าสู่ค่าอนันต์จะได้ความเร็วรอบ ตาม Equation 9

$$\omega_{ss} = \sqrt{\frac{a}{b}} \tag{9}$$

สำหรับการหาเวลาเข้าสู่สมดุลหาได้โดยการคิด 98% ของค่าสุดท้าย เมื่อแทนค่าที่เวลาสู่สมดุลในสมการผลเฉลย แล้วทำการแก้สมการหาเวลา เวลาที่ได้นั้นคือเวลาสู่สมดุล

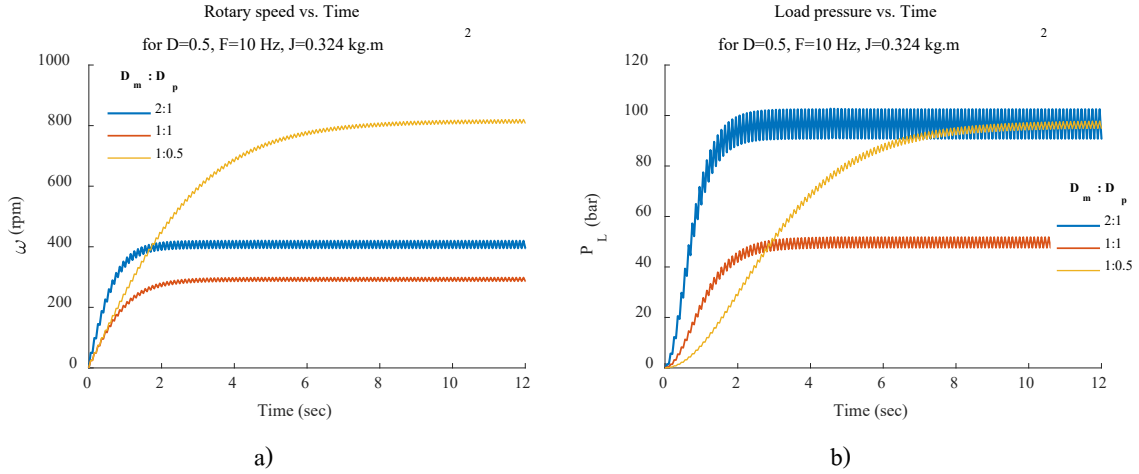
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

เวลาเข้าสู่สมดุลแสดงถึงความเร็วในการตอบสนองของระบบ ซึ่งเป็นเวลาของสภาวะชั่วครู่ การวิเคราะห์หาเวลาสู่สมดุลจะทำการเปรียบเทียบสองกรณีคือ เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊ม และค่า duty ratio

ผลการตอบสนองกรณีที่สัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊มเท่ากับ 1 ที่ค่า duty ratio เท่ากับ 0.5 ความดันและความเร็วเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 49.7 บาร์ และ 292 รอบต่อนาที ตามลำดับ จะได้เวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 3.12 วินาที หากเปรียบเทียบกับเมื่อเพิ่มสัดส่วนการขจัดมอเตอร์ต่อปั๊มเป็น 2 ต่อ 1 โดยเพิ่มการกระจัดมอเตอร์ ความดันและความเร็วรอบเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 96.6 บาร์ และ 407 รอบต่อนาที ตามลำดับ มีเวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 2.20 วินาที นั่นคือการเพิ่มสัดส่วนการกระจัดโดยการเพิ่มการกระจัดมอเตอร์ให้เป็น 2 เท่า มีผลทำให้เวลาตอบสนองเร็วขึ้น 29.49% แต่ค่าเฉลี่ยเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน สำหรับสัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊มเป็น 1 ต่อ 0.5 (ลดการกระจัดของปั๊ม) ความดันและความเร็วรอบที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 96.6 บาร์และ 815 รอบต่อนาที ตามลำดับ มีเวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 8.63 วินาที นั่นคือการลดการกระจัดของปั๊มทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลเพิ่มขึ้น 176.6% เมื่อเทียบกับกรณีที่สัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊มเท่ากับ 1 แสดงการตอบสนองความเร็วรอบและความดันภาระโหลด ดัง Fig. 3a และ 3b ตามลำดับ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า duty ratio ซึ่งคือค่าสัดส่วนเวลาเปิดสัญญาณในหนึ่งคาบ หากเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สมดุลกรณีที่สัดส่วนมอเตอร์ต่อปั๊มเท่ากับ 1 จะเห็นว่าการเพิ่ม duty ratio ตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.8 โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.2 มีเวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 4.76, 3.91, 3.41, 3.12, 2.82, 2.60 และ 2.44 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงใน Fig. 4 จะเห็นว่า เวลาเข้าสู่สมดุลมีค่าลดลงเมื่อ duty ratio เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับกรณีที่สัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊มเท่ากับ 2:1 และ 1:0.5 มีเวลาเข้าสู่สมดุลลดลงเมื่อค่า duty ratio เพิ่มขึ้นเช่นกัน นั่นคือเวลาในการตอบสนองของระบบมีค่าเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มค่า duty ratio เนื่องจากการที่เพิ่มค่า duty ratio นั้นเป็นการเพิ่มสัดส่วนเวลาในการเปิด นั่นคือมอเตอร์ได้รับทอร์กไฮดรอลิกในช่วงเวลายาวนานกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่า duty ratio ที่ต่ำกว่า จึงทำให้ความเร็วรอบเพลา

มอเตอร์หมุนได้เร็วมากกว่าก่อนที่วาล์วจะปิดการไหลด้วยการสั่งของสัญญาณ PWM ซึ่งจะทำให้ความดันภาระโหลดสัมพันธ์กับความเร็วรอบเช่นกัน



a) b)

Fig. 3 Rotary speed and load pressure response

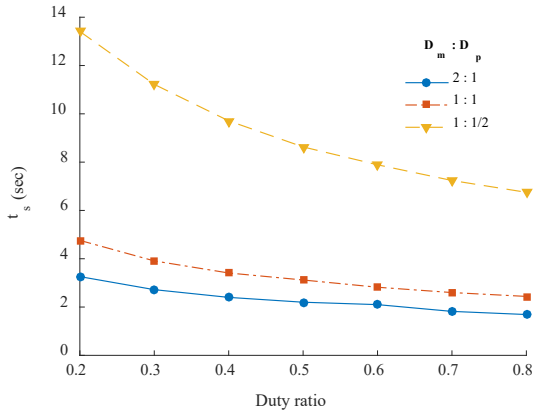


Fig. 4 Settling time with different duty ratio

สรุป

ในการประยุกต์วาล์วเปิดปิด ทำงานร่วมกับไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ เพื่อปรับความดันในระบบไฮดรอลิก วาล์วจะทำงาน โดยการสลับเปิดและปิด จึงทำให้ผลตอบสนองมีการแกว่งเกิดขึ้น ดังนั้น เพื่อศึกษาผลการตอบสนองของระบบ จึงนำเสนอผลของการเปลี่ยนแปลงค่า duty ratio และสัดส่วนการกระจัดของมอเตอร์ต่อปั๊ม ที่มีต่อเวลาเข้าสู่สมดุล โดยที่ ส่วนแรกคือการเพิ่มค่า duty ratio มีผลให้เวลาเข้าสู่สมดุลลดลง ทำให้ระบบมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจาก การเพิ่ม duty ratio เป็นการเพิ่มสัดส่วนเวลาเปิดของสัญญาณในหนึ่งคาบช่วงเวลาเปิดที่นานขึ้น ทำให้ไฮดรอลิกทรานส์ฟอร์เมอร์ได้รับทอร์กไฮดรอลิกจากต้นกำลังไฮดรอลิกมากขึ้น เวลาเข้าสู่สมดุลจึงมีค่าลดลง สำหรับทุกกรณีของสัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊ม ส่วนที่สอง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนการกระจัดมอเตอร์ต่อปั๊ม โดยการเพิ่มการกระจัดมอเตอร์มีผลทำให้ระบบตอบสนองได้เร็วขึ้น สำหรับทุกค่า duty ratio ส่วนการลดการกระจัดของปั๊ม มีผลทำให้ระบบตอบสนองได้ช้าลง สำหรับทุกค่า duty ratio

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการวิจัย ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร ที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Feng, W., Linyi, G., Ying, C. 2013. A hydraulic pressure-boost system based on high-speed on-off valves. mechatronics, IEEE/ASME Transactions on. 18: 733–743.

Jeong, H.-S., Kim, H.-E. 2001. Experimental based analysis of the pressure control characteristics of an oil hydraulic three-way on/off solenoid valve controlled by PWM signal. J. Dyn. Syst. Meas. Control. 124: 196–205.

Lee, S., Li, P.Y. 2018. Supervisory control for a switched mode hydraulic transformer. In: BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control, V001T01A065.

Ouyang, X., Yang, H., Jiang, H., Xu, B. 2008. Simulation of the piezoelectric high-speed on/off valve. Chin. Sci. Bull. 53: 2706–2711.

Pan, M., Johnston, N., Plummer, A., Kudzma, S., Hillis, A. 2014. Theoretical and experimental studies of a switched inertance hydraulic system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: J. Syst. Contr. Eng. 228: 12–25.

Pan, M., Plummer, A. 2018. Digital switched hydraulics. Front. Mech. Eng. 13: 225–231.

Passarini, L.C., Nakajima, P.R. 2003. Development of a high-speed solenoid valve: An Investigation of the Importance of the Armature Mass on the Dynamic Response. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 25: 329–335.

Shen, W., Jiang, J., Su, X., Karimi, H.R. 2013. Angle displacement robust controller for the port plate of the hydraulic transformer. Math. Probl. Eng. 5: 1–9. doi:10.1155/2013/617054

Tu, H.C. et al. 2008. High speed rotary pulse width modulated on/off valve. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2007. Seattle, WA, pp. 89–102.

Wang, F., Gu, L., Chen, Y. 2011. A continuously variable hydraulic pressure converter based on high-speed on–off valves. Mechatronics 21: 1298–1308.

Wiens, T. 2016. Improving Performance of a Switched Inertance Buck Converter Via Positioning of Reservoir Flow Valve. J. Dyn. Syst. Meas. Control. 138: 124502-124502-6. doi.org/10.1115/1.4034045

การจำลองการอพยพหนีไฟในอาคารโรงงานผลิตถุงลมนิรภัย

Evacuation simulator of airbag factory buildings

วัฒนาพร กลิ่นบัว[a]*, สุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ[b]

Watanaporn Klinbua[a]*, Supat Patvichaichod[b]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัยและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี 20230

[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี 20230

[a]Department of Safety Engineering and Environmental Management, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Chonburi 20230, Thailand.

[b]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Chonburi 20230, Thailand.

* Corresponding author. Email address: watanaporn@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจำลองอพยพหนีไฟของผู้ใช้อาคารโรงงานผลิตถุงลมนิรภัย ด้วยโปรแกรม Pathfinder เพื่อเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงเส้นทางหนีไฟ ให้สอดคล้องตามกฎหมาย และเกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร โดยอาคารที่จำลองการอพยพหนีไฟเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีชั้นลอย มีพื้นที่รวมทั้งหมด 7,130 ตารางเมตร และมีจำนวนผู้ใช้อาคารรวม 607 คน ซึ่งทำการจำลองการอพยพหนีไฟใน 3 สถานการณ์ ผลการศึกษาพบว่า การจำลองการอพยพหนีไฟในสถานการณ์ที่ 1 และสถานการณ์ที่ 2 มีเวลาในการอพยพเป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด ส่วนการจำลองการอพยพหนีไฟในสถานการณ์ที่ 3 ใช้เวลาในการอพยพไม่เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด ซึ่งในสถานการณ์ที่ 3 ใช้เวลาในการอพยพ 5.52 นาที ผู้วิจัยจึงทำการเพิ่มประตูทางออกหนีไฟจำนวน 2 ประตู หลังจากเพิ่มประตูหนีไฟ พบว่า ผลการจำลองการอพยพหนีไฟในสถานการณ์ที่ 3 ใช้เวลา 3.78 นาที ซึ่งเป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด

คำสำคัญ: การจำลอง, โปรแกรม Pathfinder, อพยพ

Abstract

This research was established to simulate the fire evacuation in the building of an airbags manufacturing factory by using the Pathfinder program to propose guidelines for designing the fire evacuation route in accordance with the laws and to ensure the safety of the building users. The building that was simulated for fire evacuation is a reinforced concrete building with a mezzanine. It has a total area of 7,130 square meters and a total occupancy of 607 people. This research simulates fire evacuation in 3 situations. Simulations for fire evacuation in scenario 1 and scenario 2 have evacuation times as required by law. But scenario 3 resulted in an evacuation time of 5.52 minutes which does not follow the requirements of the law. Improving the evacuation times was accomplished by installing additional exit doors. After adding these exit doors, it was found that the simulation results for the fire evacuation time were 3.78 minutes, which was within the limit required by law.

Keywords: evacuation, pathfinder program, simulation

คำนำ

อัคคีภัย เป็นภัยใกล้ตัวที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน จำนวนมหาศาล โดยเฉพาะการเกิดอัคคีภัยในที่ที่มีการชุมนุมคน เช่น บ้านพักอาศัย โรงแรม โรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ ในอดีตที่ผ่านมาได้เกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้โรงงานผลิตตุ๊กตาเคเดอร์ จังหวัดนครปฐม เมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม 2536 ที่ทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวน 188 คน และผู้บาดเจ็บอีก 469 คน สภาพอาคารโรงงานพังทลายทั้งหมด จากการตรวจสอบพบว่าโรงงานก่อสร้างไม่ได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ไม่ได้สร้างบันไดหนีไฟ ประตูทางเข้า-ออกมีน้อย และคับแคบเกินกว่ากฎหมายกำหนด ไม่มีระบบการเตือนภัยที่สมบูรณ์และได้มาตรฐาน (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี) การอพยพคนจากเพลิงไหม้ถือเป็นปัจจัยหลักที่ควรคำนึงถึงเป็นอย่างมาก ส่วนที่สำคัญของอาคารที่ใช้อพยพ คือ ความปลอดภัยของเส้นทางหนีไฟ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการจำลองการอพยพ เนื่องจากการจำลองด้วยโปรแกรมสามารถประเมินสถานการณ์ภายในอาคาร พร้อมทั้งสามารถดูพฤติกรรมการอพยพไปยังทางออกของคน เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพรวมของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้น และมองเห็นแนวทางในการรับมือกับเหตุการณ์ดังกล่าว

ตามกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับการป้องกันและระงับอัคคีภัย พ.ศ. 2555 และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงาน พ.ศ. 2552 กำหนดให้นายจ้างจัดให้มีเส้นทางหนีไฟทุกชั้นของอาคารอย่างน้อยชั้นละสองเส้นทางซึ่งสามารถอพยพลูกจ้างที่ทำงานในเวลาเดียวกันทั้งหมดสู่จุดที่ปลอดภัยภายในเวลาไม่เกินห้านาที มีงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์โปรแกรมจำลองด้านพลศาสตร์อัคคีภัยและการอพยพสำหรับที่พักคนงานโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ (อารยา, 2552) ทำการศึกษาพฤติกรรมการอพยพและการคาดการณ์เวลาอพยพของผู้ที่อยู่ในอาคาร โดยใช้โปรแกรม Fire Dynamics Simulator with Evacuation (FDS+Evac) ทำให้สามารถเห็นพฤติกรรมการอพยพได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อเกิดเพลิงไหม้ผู้อพยพจะตอบสนองต่อเหตุการณ์และต่างพยายามอพยพออกสู่ภายนอกด้วยทางออกที่ใกล้ที่สุด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการอพยพ (Zhong-an et al., 2011) พบว่า เวลาที่ใช้ในการอพยพจะลดลงถ้ามีการเพิ่มบันไดและขยายให้กว้างขึ้น ต่อมาในปี 2562 ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้โปรแกรม Pathfinder ในการอพยพหนีไฟ (อภิชัย, 2562) ทำการศึกษาการอพยพหนีไฟในโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ พบว่าบันไดและประตูหนีไฟที่ 1 มีความหนาแน่นของผู้อพยพทำให้ขีดความสามารถในการอพยพไปยังจุดรวมพลล่าช้า จึงได้กำหนดให้มีประตูห้องอีก 1 ประตูเป็นทางออกสำหรับเส้นทางอพยพ ผลปรากฏว่าพนักงานคนสุดท้ายสามารถอพยพออกจากอาคารเข้าสู่บันไดหนีไฟโดยใช้เวลา 231.1 วินาทีซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด

ดังนั้นเพื่อให้การอพยพหนีไฟของพนักงานในโรงงานผลิตถุงลมนิรภัย มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการจำลองการอพยพหนีไฟของพนักงานออกจากอาคารเพื่อดูพฤติกรรมการอพยพไปยังทางออกของพนักงาน และวิเคราะห์ระยะเวลาที่ใช้ในการอพยพเทียบเคียงกับกฎหมาย ทำให้สามารถมองเห็นภาพรวมของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้น และใช้เป็นแนวทางในการเสนอแนะ ปรับปรุงเส้นทางหนีไฟ และปรับปรุงแผนตอบโต้เหตุฉุกเฉินให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุอุปกรณ์

1. ระบบคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์เสริมประกอบ
   1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
   CPU – Intel Core i5-8250U (1.60 – 3.40 GHz, 4C/8T)
   GPU – NVIDIA GeForce MX150 (2GB GDDR5)
   RAM – 8 GB DDR4
   1.2 เครื่องพิมพ์
2. โปรแกรมที่ใช้งาน
   2.1 โปรแกรม Pathfinder 2020
   2.2 โปรแกรม AutoCAD 2019

วิธีการ

1. สร้างแบบจำลองการอพยพคนออกจากอาคารโรงงานผลิตถุงลมนิรภัยโดยใช้โปรแกรม Pathfinder

แบบอาคารที่นำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์เพลิงไหม้นั้น เป็นแบบอาคารของโรงงานผลิตถุงลมนิรภัยแห่งหนึ่ง เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีชั้นลอย ขนาดกว้าง 72 เมตร ยาว 85 เมตร มีพื้นที่รวมทั้งหมด 7,130 ตารางเมตร บริเวณชั้นล่างจัดเป็นโรงงานผลิตถุงลมนิรภัย สำนักงานและพื้นที่คลังสินค้า มีประตูทางออกหนีไฟทั้งหมด 9 ประตู บริเวณชั้นลอยจัดเป็นพื้นที่สำนักงาน มีบันไดซึ่งใช้งานปกติ 2 บันได ดังแสดงใน Fig. 1

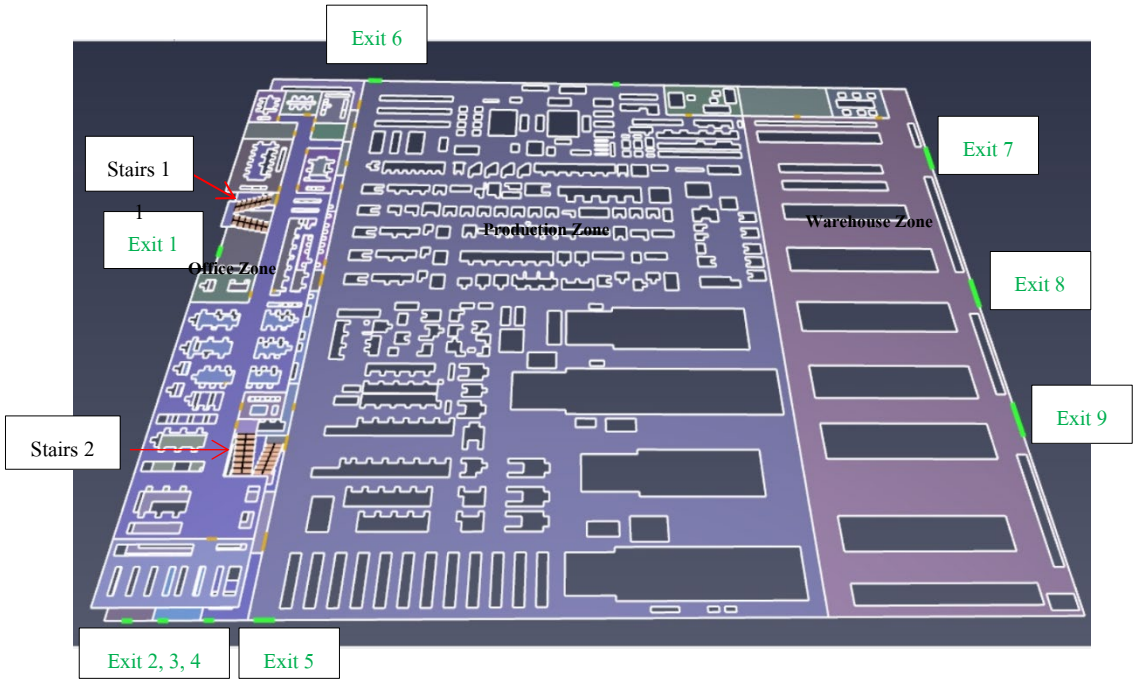


Fig. 1 Draw a building lay out by using Pathfinder program

2. ทำการเพิ่มจำนวนคนผู้ใช้อาคารในโปรแกรม Pathfinder

จำนวนผู้ใช้อาคารคำนวณตามมาตรฐาน NFPA 101 life safety code โดยแบ่งออกเป็นการหาความจุของพื้นที่ภายในชั้น โดยวัดจากพื้นที่ด้านในของผนังอาคาร (Gross Area) หารด้วยค่า Factor ของกิจกรรม Occupancy Load Factor เป็นค่าที่กำหนดขนาดพื้นที่ต่อจำนวนคน ตามกิจกรรมของพื้นที่ สามารถคำนวณหาจำนวนผู้ใช้อาคารสูงสุดอ้างอิงตามมาตรฐาน NFPA 101 เท่ากับ 607 คน และมีจำนวนผู้ใช้อาคารจริง เท่ากับ 490 คน แสดงดัง Table 1

Table 1 Show number of Occupant load in each room that classified by room type

Rooms/spaces	use	Area (m^2)	Occupant load factor (m^2/person)	Occupant load (person)	Occupant (person)
Warehouse	Storage use	1,640	46.5	35	32
Production Line	Industrial use	4,160	9.3	447	326
Office Floor 1	Business use	320	14	23	39
Office Floor 2	Business use	817	14	59	50
	Assembly use	193	Use number of Fixed seats	43	43
			Total	607	490

งานวิจัยนี้จำลองการอพยพหนีไฟโดยใช้จำนวนผู้ใช้อาคารสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ เท่ากับ 607 คน

3. กำหนดค่าพารามิเตอร์และกำหนดสถานการณ์

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ลงในโปรแกรม ประกอบด้วย พฤติกรรมการอพยพ เป็นแบบ Steering คือ เป็นการเคลื่อนที่แบบรักษาระยะห่างระหว่างบุคคลไว้ เส้นทางการเดินเป็นแนววิถีโค้ง (นรินทร์, 2559) ความเร็วในการเคลื่อนที่ จะกำหนดแบ่งตามช่วงอายุชายหญิง โดยเลือกตั้งค่าในโปรแกรมเป็น Uniform distribution และกำหนดสถานการณ์ในการจำลองการอพยพหนีไฟ อ้างอิงตามมาตรฐาน NFPA 101 Life safety code แสดงดัง Table 2

Table 2 Design fire Scenario for Evacuation

Case	Scenario
1	While cutting airbag fabric with laser cutting machine No.5, there was a piece of airbag attached to the machine, causing a fire to spread. All exit doors could be used.
2	A broken lamp fell onto the Micro gas generator area, causing an explosion and a fire which spread rapidly, causing the main fire door to be inaccessible.
3	There was a short circuit in the AHU Room. The door was left open. Smoke spread to the main fire escape route making it impossible to use the fire escape door.

Table 3 Pre-evacuation time (Reference PD 7974-6:2004)

SCENARIO CATEGORY AND MODIFIER	First occupants $\Delta t_{pre(1^{st}\ percentile)}$ (Minutes)	Occupant distribution $\Delta_{tpre(99^{th}\ percentile)}$ (Minutes)
A: Awake and Familiar (Office or industrial)		
M1 B1-B2 A1-A2	0.5	1.0
M2 B1-B2 A1-A2	1	2
M3 B1-B2 A1-A3	*> 15*	*>15*

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์เวลาล่าช้าในการอพยพตามตารางมาตรฐาน Table 3 สามารถพิจารณาได้จาก 3 องค์ประกอบ ได้แก่ 1. ด้านการบริหารจัดการ มีผู้ใช้อาคารผ่านการอบรมด้านการจัดการความปลอดภัยจากอัคคีภัย และไม่มีพนักงานประจำที่ดูแลความปลอดภัยด้านอัคคีภัย 2. ด้านการตรวจจับและแจ้งเหตุเพลิงไหม้มีการติดตั้งระบบตรวจจับและแจ้งเหตุเพลิงไหม้ทั่วทั้งอาคาร และถ้าตรวจจับได้จะแจ้งไปยังผู้ใช้อาคารทันที และ 3. ด้านความซับซ้อนของอาคาร เป็นอาคารชั้นเดียวรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบง่ายมีการกั้นแบ่งห้องไม่มาก มีแผนผังแบบง่าย ดังนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขเป็น M2 B1-B2 A1-A2 สามารถวิเคราะห์ Pre-evacuation time เป็น Δt_{pre1st} (1 นาที) สำหรับคนที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดเพลิงไหม้ จะเริ่มอพยพ และ $\Delta t_{pre99th}$ (2 นาที) สำหรับคนอื่น ๆ ที่ต้องอพยพออกนอกอาคาร

ผลและวิจารณ์ผลทดลอง

การทดลองด้วยการจำลองสภาพเหมือนจริงของอาคารโรงงานผลิตถุงลมนิรภัย เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีชั้นลอย ชั้นที่ 1 มีพื้นที่ใช้สอย 6,120 ตารางเมตร มีจำนวนผู้ใช้อาคาร 505 คน ส่วนชั้นลอยมีพื้นที่ใช้สอย 1,010 ตารางเมตร มีจำนวนผู้ใช้อาคาร 102 คน มีพื้นที่รวมทั้งหมด 7,130 ตารางเมตร และมีจำนวนผู้ใช้อาคารรวม 607 คน แบ่งเป็นชายหญิงคละกัน ใช้โปรแกรม Pathfinder สร้างเป็นแบบจำลองห้องต่าง ๆ ตามสัดส่วนจริง และกำหนดคนในห้องต่าง ๆ จากนั้นกำหนดให้ผู้ใช้อาคารอพยพไปยังประตูทางหนีไฟ โดยจำลองการอพยพหนีไฟใน 3 สถานการณ์

แสดงผลดัง Fig.2, Fig.3, Fig.4

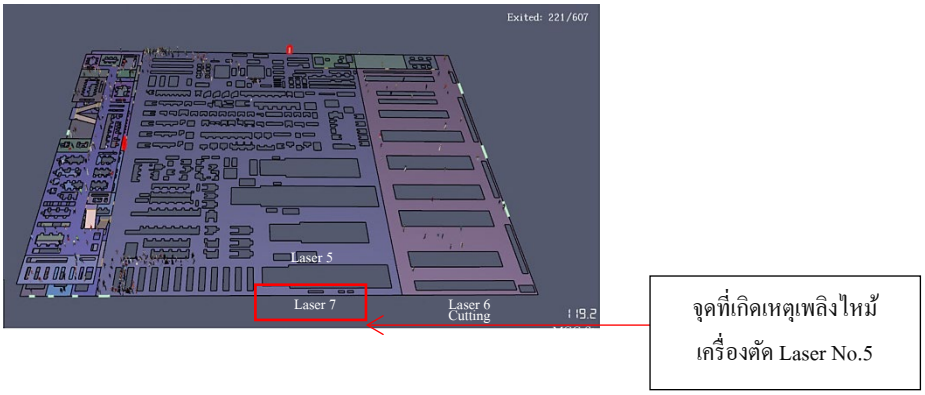


Fig. 2 Show simulation Evacuation in case 1 fire to spread at the Laser No.5 cutting machine in second 119.2

สถานการณ์ที่ 1 ในขณะที่กำลังตัดผ้าถุงลมนิรภัยด้วยเครื่องตัดเลเซอร์หมายเลข 5 เศษผ้าได้ไปติดกับเครื่องจักรทำให้แสงเลเซอร์ไหม้ผ้า เกิดการลุกลาม ประตูทางออกทุกเส้นทางใช้งานได้ จากผลการจำลองอพยพหนีไฟ พบว่า เวลาที่ผู้ใช้อาคารคนสุดท้ายจะอพยพออกนอกอาคารคือวินาทีที่ 232.5 วินาที หรือ 3.87 นาที

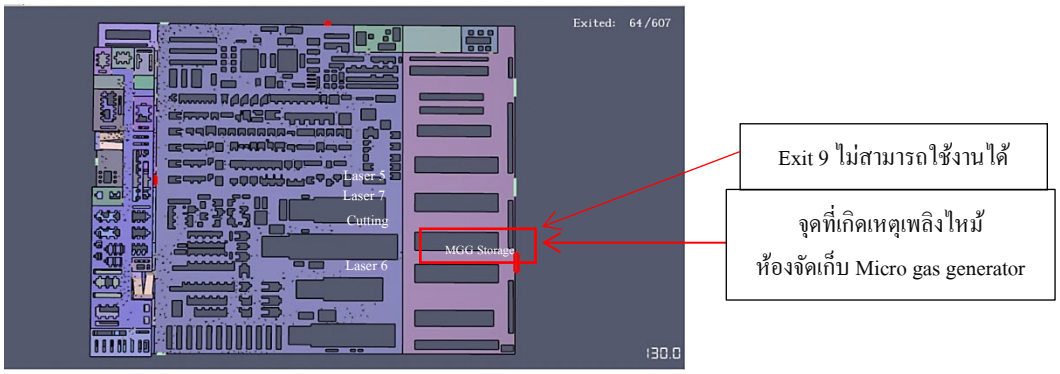


Fig. 3 Show simulation Evacuation in case 2 an explosion at the Micro gas generator storage area in second 130

สถานการณ์ที่ 2 หลอดไฟแตกได้หล่นลงมาบริเวณพื้นที่จัดเก็บ Micro gas generator ทำให้เกิดการระเบิดมีเพลิงไหม้เกิดขึ้น ไฟได้ลุกลามอย่างรวดเร็ว ทำให้กีดขวางประตูหนีไฟหลักใช้งานไม่ได้ ผลการจำลองอพยพหนีไฟ พบว่า เวลาที่ผู้ใช้อาคารคนสุดท้ายจะอพยพออกนอกอาคารคือวินาทีที่ 262.3 วินาที หรือ 4.37 นาที

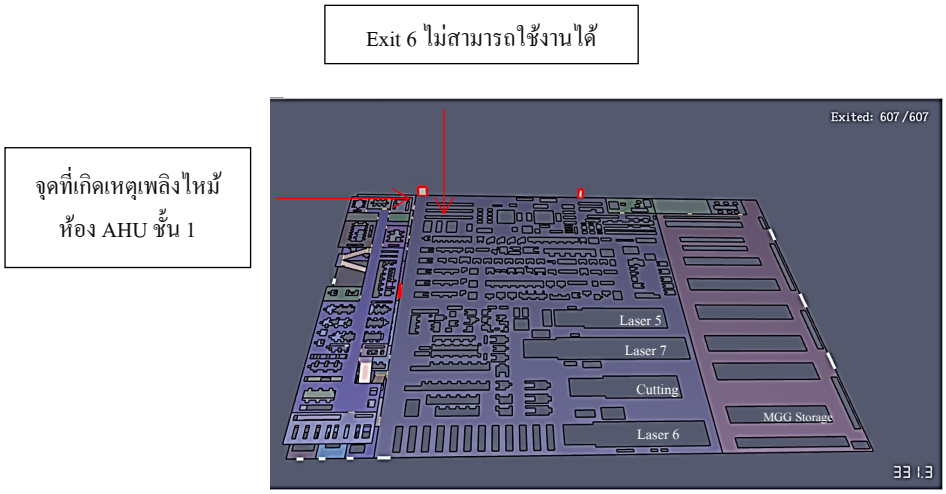


Fig. 4 Show simulation Evacuation in case 3 there was a short circuit in the AHU Room. The door was left open. Smoke spread to the main fire escape route making it impossible to use the fire escape door

สถานการณ์ที่ 3 เกิดไฟฟ้าลัดวงจรในห้อง AHU ที่ไม่มีผู้ใช้งาน ประตูห้องเปิดค้างไว้ ควันไฟได้ลามไปยังเส้นทางหนีไฟหลัก ทำให้ไม่สามารถใช้งานประตูหนีไฟได้ 1 ประตู จากผลการจำลองอพยพหนีไฟ พบว่า เวลาที่ผู้ใช้อาคารคนสุดท้ายจะอพยพออกนอกอาคารคือวินาทีที่ 331.3 วินาที หรือ 5.52 นาที ซึ่งไม่เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด

การจำลองการอพยพหนีไฟทั้ง 3 สถานการณ์สามารถสรุปผลได้ดัง Table 4

Table 4 Summary of fire evacuation times from Exit doors for each Scenario

Scenario	Details	Exit Door flow rate								
		Exit 1	Exit 2	Exit 3	Exit 4	Exit 5	Exit 6	Exit 7	Exit 8	Exit 9
1	Last out (s)	232.4	120.9	128.6	123.1	214.4	183.9	142.2	145.8	138.0
	Total use (Pers)	85	1	2	1	229	252	16	9	12
2	Last out (s)	232.4	64.1	128.6	122.3	262.2	241.1	82.2	92.9	0
	Total use (Pers)	85	1	2	1	229	252	16	21	0
3	Last out (s)	253.0	64.7	68.6	62.3	331.1	0	142.2	145.8	138.0
	Total use (Pers)	91	1	2	1	475	0	16	9	12

สรุป

การจำลองการอพยพหนีไฟของโรงงานผลิตถุงลมนิรภัยด้วยโปรแกรม Pathfinder เพื่อเปรียบเทียบเวลาในการอพยพเทียบกับกฎหมาย โดยทำการจำลองการอพยพหนีไฟใน 3 สถานการณ์ พบว่า การจำลองการอพยพหนีไฟในสถานการณ์ที่ 1 และสถานการณ์ที่ 2 มีเวลาในการอพยพเป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด ส่วนการจำลองการ

อพยพหนีไฟในสถานการณ์ที่ 3 ใช้เวลาในการอพยพไม่เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด ซึ่งในสถานการณ์ที่ 3 ใช้เวลาในการอพยพ 5.52 นาที และพบว่าประตูทางออกหนีไฟที่ 5 บริเวณพื้นที่ไลน์การผลิตมีความหนาแน่นของผู้อพยพทำให้ความสามารถในการอพยพออกจากอาคารล่าช้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเพิ่มประตูทางออกหนีไฟ โดยกำหนดให้ประตูที่มีอยู่แล้ว แต่ไม่ได้กำหนดให้เป็นประตูหนีไฟจำนวน 2 ประตู คือ จุดที่ 1 บริเวณแผนก Module Airbag มีขนาดกว้าง 90 เซนติเมตร จุดที่ 2 บริเวณทางเข้าสำนักงาน มีขนาดกว้าง 180 เซนติเมตร และทำการปรับปรุงเส้นทางหนีไฟใหม่บริเวณประตูหนีไฟที่เพิ่มเข้ามา โดยให้เว้นช่องว่างสำหรับทางออกไปสู่ประตูหนีไฟ หลังจากเพิ่มประตูหนีไฟ พบว่า ผลการจำลองการอพยพหนีไฟในสถานการณ์ที่ 3 ใช้เวลา 227.3 วินาที หรือ 3.78 นาที ซึ่งเป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด แสดงดัง Fig. 5

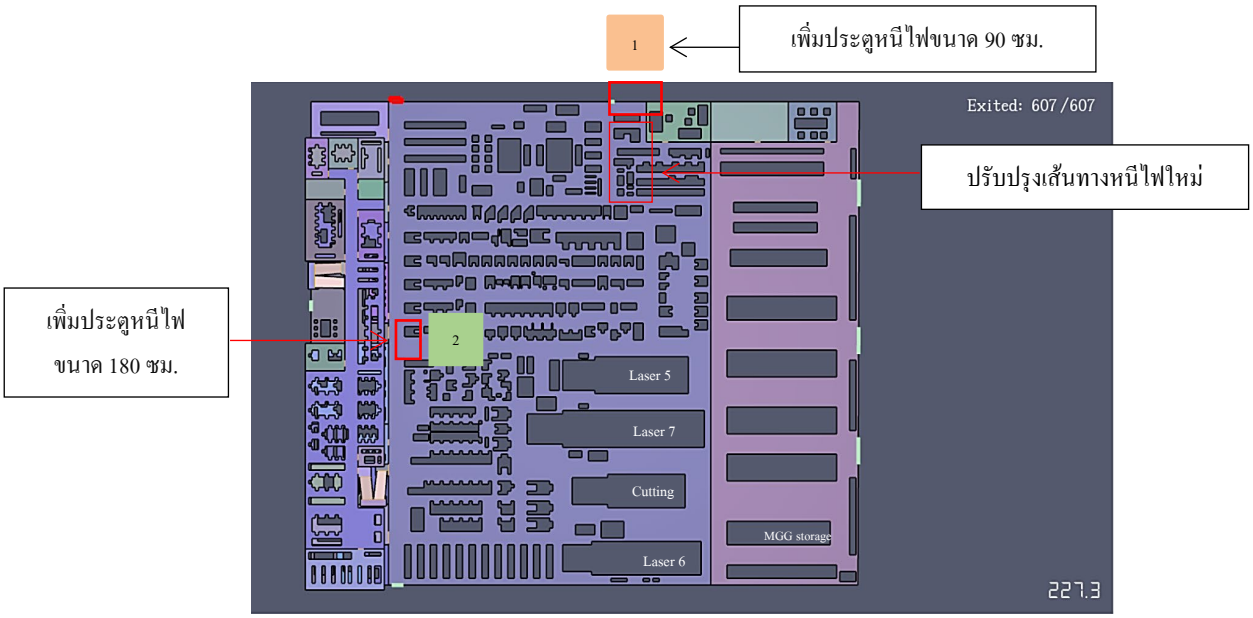


Fig. 5 Show add Exit door 1 (Module) and Exit door 2 (Entrance office)

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงแรงงาน. 2555. กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และภาพแวดล้อมในการทางานเกี่ยวกับการป้องกันและระงับอัคคีภัย พ.ศ. 2555. 9 มกราคม 2556

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2552. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงาน พ.ศ.2552. 30 กันยายน 2552

นรินทร์ บุญประเสริฐ. การเปรียบเวลาอพยพในอาคารสูงระหว่างวิธี SFPE และ Steering ด้วยโปรแกรม Pathfinder. ใน : การประชุมวิชาการในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, ชลบุรี.

วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2563. อัคคีภัยในประเทศไทย. http://sites.Google.com/th.wikipedia.org/wiki/เหตุเพลิงไหม้โรงงานเคเดอร์_พ.ศ._2536/, 15 มกราคม 2563

อภิชัย ทานะเวช, เกรียรติไกร อายุวัฒน์. 2562. การประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองการอพยพเพื่อวิเคราะห์ขีดความสามารถในการอพยพ กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์. ใน: การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

อารยา ดำช่วย. 2552. การประยุกต์โปรแกรมจำลองด้านพลศาสตร์อัคคีภัยและการอพยพสำหรับที่พักคนงานโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

National Fire Protection Association. 2018. NFPA 101 Life Safety Code.

Zhong-an. 2011. Experiment and Simulation Study on High-rise Study Apartment Fire Personal Evacuation in the Campus. Procedia Engineering 11:156-161.

การศึกษาเครื่องสกัดคาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤตแบบเคลื่อนย้ายได้

Study of movable carbon dioxide supercritical fluid extraction

พีรศุษม์ ไชยศรีมณีพรรณ, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์

Peerasutth Chaisrimaneepan, Taweedej Siritanapipat

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineer, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address : taweedej.s@ku.th

บทคัดย่อ

ในทุกวันนี้การสกัดสารสำคัญจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติประกอบไปด้วยวิธีทางกลและทางเคมี เพื่อนำไปใช้ในการผลิต เวชรภัณฑ์ เครื่องสำอาง น้ำหอม หรือ อาหาร โดยอาศัยเครื่องมือที่ซับซ้อน มีราคาสูงและไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ จากการศึกษาพบว่าอีกวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรม คือ การสกัดด้วย “คาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤต” โดยอาศัย CO_2 ซึ่งมีความดันวิกฤติและอุณหภูมิวิกฤติต่ำ จากน้ำแข็งแห้ง ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ราคาถูกและสามารถกำจัดออกจากสารสกัดได้ง่ายร่วมกับการใช้ฮีทเตอร์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันให้เป็นไปตามกฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal Gas Law) จากผลการทดลองพบว่าสามารถสร้าง คาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤต ได้ รวมถึงทำให้อุณหภูมิ และ แรงดันขึ้นไปสูงถึง 120° C ที่กว่า 220 Bar สำหรับกาแฟบด และ ที่ค่าต่าง ๆ สำหรับ ตัวอย่างทดลองอื่น ๆ

คำสำคัญ: คาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤต, ของเหลวยิ่งยวดเหนือจุดวิกฤต, เครื่องสกัดคาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤต

Abstract

In nowadays, the extraction of essential substances from natural products involves by mechanical and chemical process to use in the production of pharmaceutical, cosmetic, perfume or food using sophisticated equipment high price and cannot moved. Studies have shown that another popular method in the industry is extraction with " super critical fluid extraction " by means of CO_2, which has a low critical pressure and low critical temperature. From dry ice, it is non-toxic, non-flammable, inexpensive and can be easily removed from the extract, together with the use of a heater to increase the temperature and pressure in accordance with the Ideal Gas Law can create super critical fluid co_2 extraction above the critical point, as well as raising temperatures and pressures up to 120° C and over 220 Bar for coffee and at different values for other samples.

Keywords: extraction, SFE, supercritical fluid

คำนำ

การสกัดสาระสำคัญจากพืชนั้นมีด้วยกันหลายวิธีธรรมชาติโดยวิธี เช่น“ การกลั่นด้วยไอน้ำ” หรือ“ การสกัดด้วยตัวทำละลาย” รวมไปถึงมีเครื่องมือที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการและคุณภาพของของสารสกัดที่ต้องการ ซึ่งสารสำคัญเหล่านี้มักพบได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักของพืชที่ใช้ทำการสกัด ในปัจจุบันมีความต้องการสารสำคัญ(น้ำมันหอมระเหย) มากขึ้นทั้งในภาคครัวเรือน และ อุตสาหกรรมยา อาทิเช่น คาเฟอีนในเมล็ดกาแฟ, Xanthomas ในมังคุด, Damascena ในดอกกุหลาบ และ Limonene ในใบมะกรูด อย่างไรก็ดีประเทศไทยจำเป็นจะต้องนำเข้าสารเหล่านี้เนื่องจาก การสกัดสารเหล่านี้ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ใช้ระยะเวลาในการสกัดหลายชั่วโมง และใช้เงินลงทุนเป็นจำนวนมาก (ผศ.ดร.ภก. ธนภัทร ทรงศักดิ์) ดังนั้น การศึกษาการสกัดรวมถึงคุณภาพของกระบวนการสกัดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ส่งผลให้การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤตยิ่งยวดเป็นตัวทำละลาย ซึ่งมีจุดเด่นคือเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีกลิ่นและไม่เป็นอันตราย ทำให้สารสกัด (น้ำมันหอมระเหย) ที่สกัดได้ปลอดภัยเมื่อใช้ร่วมกับผลิตภัณฑ์ยา สารแต่งกลิ่น และ สารปรุงรส รวมถึงคุณสมบัติการเป็นสารไม่ติดไฟความหนืดต่ำและง่ายต่อการแทรกซึมจากคุณสมบัติของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ จุดวิกฤตที่มีลักษณะเป็นทั้งของเหลวและก๊าซ ซึ่งเมื่อทำการลดความดันจะทำให้ไม่มีตัวทำละลายเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ (Katherine B. Louie and Trent R. Northern,2020) ทั้งนี้คุณสภาพของการสกัดสามารถปรับได้โดยการควบคุมความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการสกัดพืชต่าง ๆ แต่เครื่องเหล่านี้มีขนาดใหญ่ ต้นทุนสูง และไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาเครื่องสกัดคาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤตแบบเคลื่อนย้ายได้ เพื่อลดระยะเวลาในการสกัดเมื่อเทียบกับวิธีการสกัดอื่นๆ ทำให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และ เพื่อการลดต้นทุนในการนำเข้าจากต่างประเทศ

อุปกรณ์และวิธีการ

แนวคิดในการออกแบบและดำเนินการ

จากผลการศึกษาเราพบว่าสภาวะเหนือจุดวิกฤตยิ่งยวดของคาร์บอนไดออกไซด์นั้น จำเป็นจะต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งค่าทั้งสองนี้มีผลต่อคุณภาพของการสกัด ดังนั้น การออกแบบภาชนะที่ใช้ในการสกัดจึงมีความสำคัญ ต้องสามารถทนต่อแรงดัน และ ความร้อนได้เป็นอย่างดี (Wang et al., 2016) รวมถึงการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนผ่านฮีทเตอร์ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและแรงดันขึ้นไปจนถึงจุดวิกฤติ Fig.1 ซึ่งเป็นไปตามกฎของเทอร์โมไดนามิคอีกทั้งยังจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวัดได้ เพราะหากวัดได้จะควบคุมได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้จัดทำแนวคิดในการออกแบบเป็นขั้นตอน ดัง Fig. 2

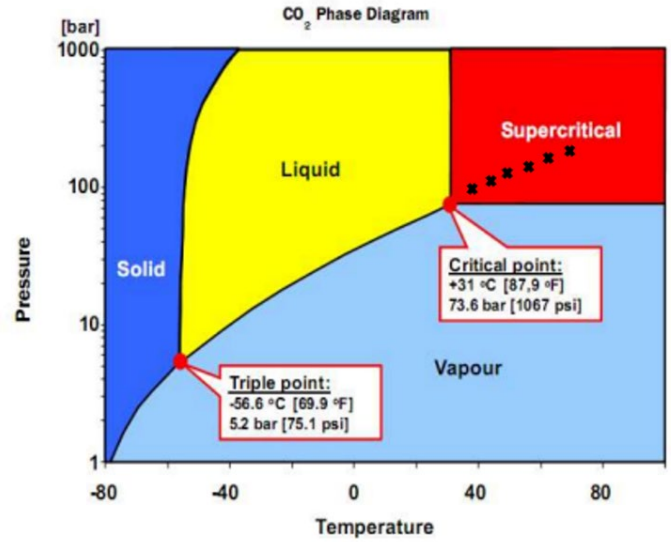


Fig.1 Pressure and Temperature reach the critical point after operate for 20 minutes

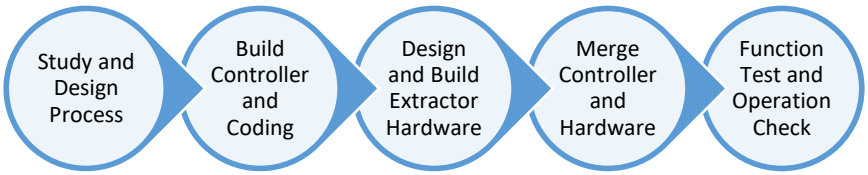
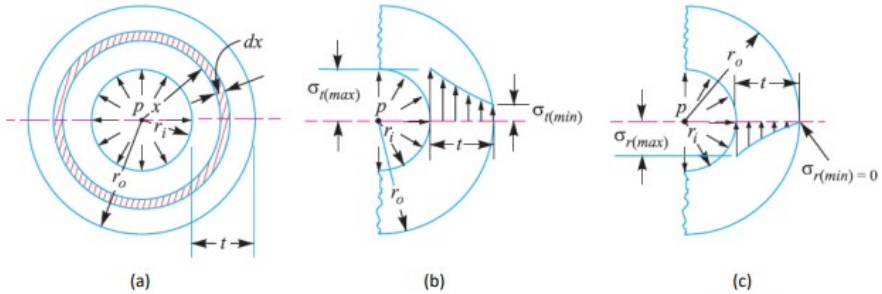


Fig.2 Design concept of Movable Carbon Dioxide Supercritical Fluid Extraction

ขั้นตอนการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์

การออกแบบทางกล

การทำการออกแบบเครื่องสกัดโดยเริ่มจากหลักการคำนวณการออกแบบภาชนะรับแรงดันเพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องสกัดจะสามารถทนแรงดันขนาดใช้งานได้ และ ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายซึ่งอาศัยสมการตาม Fig. 3 รวมกับ



$$(\sigma_n)_{max} = p_i\left(\frac{r_0^2 + r_i^2}{r_0^2 - r_i^2}\right), (\sigma_l)_{max} = p_i\left(\frac{r_i^2}{r_0^2 - r_i^2}\right), (\sigma_r)_{max} = -p_i$$

Fig. 3 Stress distribution in thick-walled cylinder subjected to internal pressure. (a) Thick-walled cylinder (b) Tangential stress distribution (c) Radial stress distribution

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSIS software โดยอาศัยวิธีการ Finite Element Method ในการสร้าง boundary conditions โดยอาศัยสมบัติของวัสดุตาม Fig. 4 เพื่อนำมาวิเคราะห์ในแบบจำลอง จากนั้นทำการ Simulation ดัง Fig. 5

Material	Density (gr/cm^3)	Young modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
Aluminium 6061	2.70	68.9	400
CFRP	1.43	133	577
GFRP	1.75	13.9	194

Fig. 4 Mechanical properties of materials

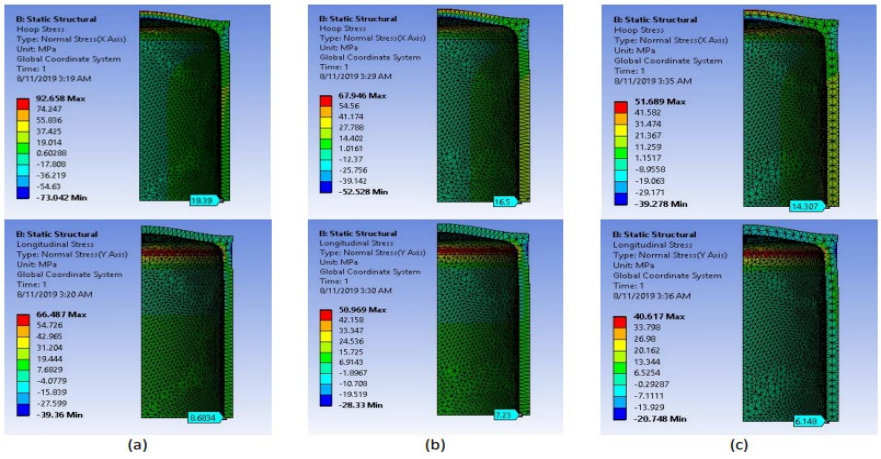


Fig. 5 Hoop and longitudinal stress of cylinder with wall thickness difference (a) 6 mm, (b) 7 mm, (c) 8 mm.

เมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยวิธีการ FEA พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันดัง Table 1 จากนั้นนำค่าที่ได้มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solid Work ดัง Fig. 6 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเลือกท่อ จะได้ท่อไร้ตะเข็บตามมาตรฐาน API 5L GR.B / ASTM A106 GR.B / DIN1629 ST52.0 ตามตาราง Table 2 เป็นส่วนรับแรงดัน จากนั้นเลือกหน้าแปลนด์บอดตามมาตรฐาน JIS 10K ขนาด 3 นิ้ว ดัง Fig.7 เป็นฝาบนและล่างเพื่อใช้ในการจับยึดเพื่อป้องกันการรั่วไหล

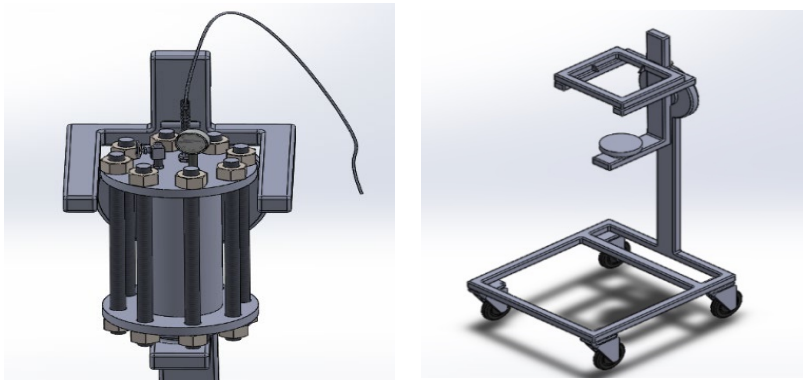


Fig.6 3-D model of extractor and holder

Table 1 Comparison between analytic and simulation of the maximum hoop and longitudinal stress with wall thickness and internal pressure variations

Thickness (mm)	Pressure (MPa)	Analytic		FEA		Error	
		Hoop stress (MPa)	Long. Stress (MPa)	Hoop stress (MPa)	Long. Stress (MPa)	Hoop stress (%)	Long. Stress (%)
6	2	19.39	8.69	19.39	8.68	0.00	0.12
7	2	16.49	7.24	16.5	7.23	0.06	0.14
8	2	14.32	6.16	14.31	6.15	0.07	0.16
9	2	12.64	5.32	12.62	5.31	0.16	0.19
10	2	11.29	4.64	11.27	4.65	0.18	0.22
6	4	38.77	17.37	38.77	17.37	0.00	0.00
7	4	32.98	14.49	32.99	14.46	0.03	0.21
8	4	28.64	12.32	28.62	12.3	0.07	0.16
9	4	25.27	10.64	25.24	10.62	0.12	0.19
10	4	22.58	9.29	22.55	9.30	0.13	0.11
6	6	58.16	26.08	58.16	26.05	0.00	0.12
7	6	49.47	21.73	49.49	21.69	0.04	0.18
8	6	42.96	18.48	42.92	18.44	0.09	0.22
9	6	37.91	15.95	37.86	15.93	0.13	0.13
10	6	33.87	13.93	33.82	13.95	0.15	0.14
6	8	77.54	34.77	77.54	34.73	0.00	0.12
7	8	65.96	28.98	65.99	28.92	0.05	0.21
8	8	57.28	24.64	57.23	24.59	0.09	0.20
9	8	50.54	21.27	50.48	21.24	0.12	0.14
10	8	45.16	18.58	45.1	18.59	0.13	0.05
6	10	96.93	43.46	96.93	43.42	0.00	0.09
7	10	82.45	36.22	82.49	36.15	0.05	0.19
8	10	71.6	30.8	71.54	30.74	0.08	0.19
9	10	63.18	26.59	63.1	26.55	0.13	0.15
10	10	56.45	23.22	56.37	23.24	0.14	0.09

Table 2 Comparison between analytic and simulation of the maximum hoop and longitudinal stress with wall thickness and internal pressure variations

Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield point (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Fatigue Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Shear Modulus (GPa)	Maximum Temperature (°C)
785	590	190	230	360	73	400



Fig.7 Body of extractor (Pipe API 5L GR.B)

การออกแบบทางไฟฟ้า

ทำการออกแบบวงจรด้วยโปรแกรม Fitzing ตาม Fig. 8 ใช้ Thermocouple type K เป็น sensor ในการตรวจวัดอุณภูมิจากนั้นทำการส่งสัญญาณแบบ Analog ให้กับ Microcontroller (Arduino) ในการประมวลผลจากนั้น Arduino จะทำหน้าที่ส่งคำสั่งต่อไปให้ Heater และ ใช้ Relay ในการตัดต่อการทำงานเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ต้องการดัง Fig. 9

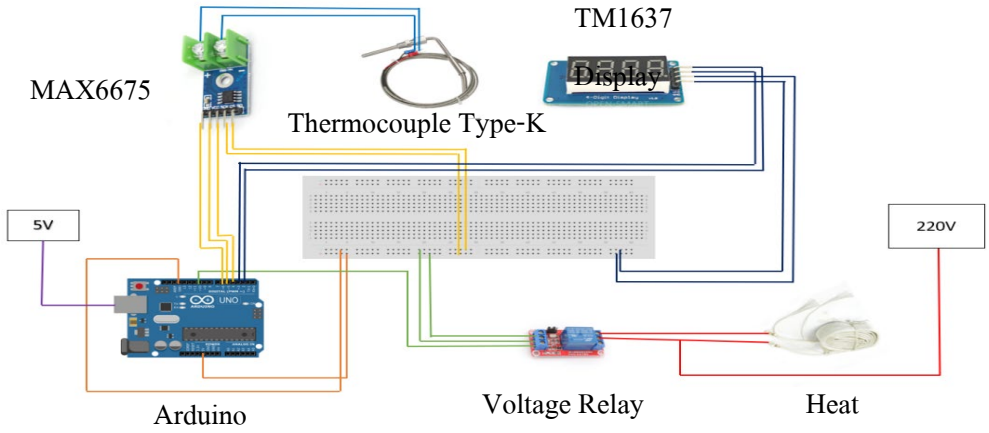


Fig.8 Control Diagram

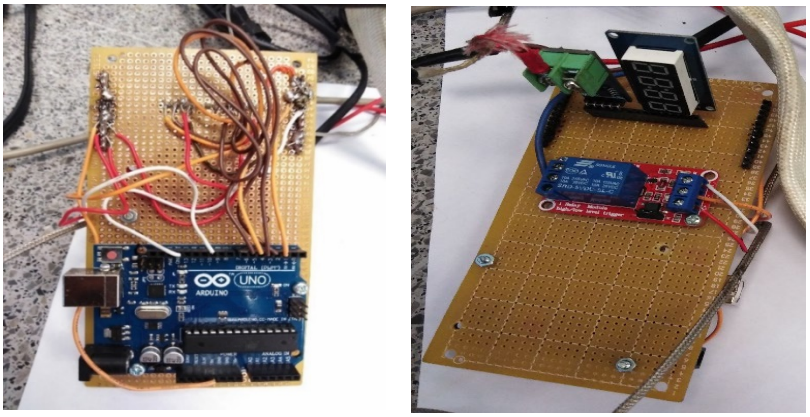


Fig. 9 Actual control unit on board

ผลการทดลอง

จากผลจัดสร้างจะได้เครื่องสกัดดัง Fig.10 และ การทดลองสกัดน้ำมันจากเมล็ดกาแฟพบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่คาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของน้ำแข็งแห้งซึ่งอยู่ภายในเครื่องสกัดจนมีอุณหภูมิและแรงดันที่สูงขึ้น หนือจุดวิกฤติ ดังกราฟใน Fig.11 และกราฟการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิ และ แรงดัน เทียบกับเวลาในกราฟที่ Fig.12 และ Fig. 13 ตามลำดับ



Fig. 10 The extractor unit

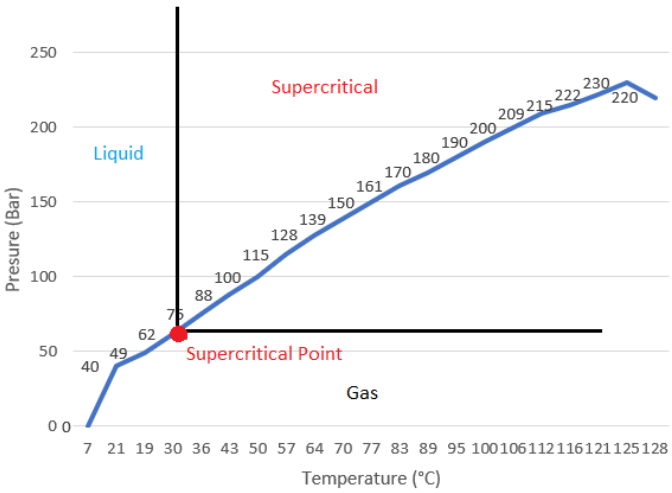


Fig. 11 Show temperature and pressure when the prototype operated

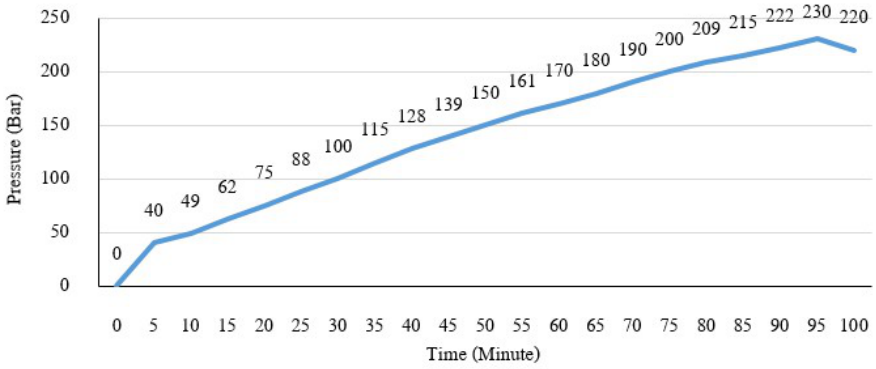


Fig. 12 Pressure rise with time

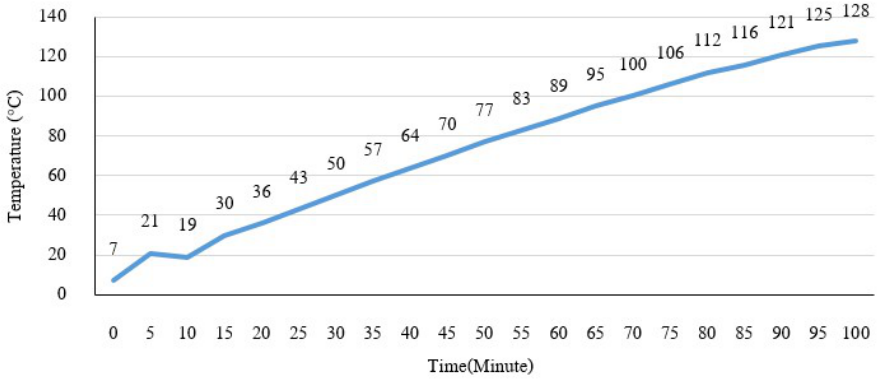


Fig. 13 Temperature rise with time

สรุป

เครื่องสกัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (ระบบวงปิด) ที่ใช้ในการทดลองสามารถสกัดน้ำมันหอมระเหยได้ แต่ในปริมาณที่ต่ำมากและไม่สามารถวัดปริมาตรได้ เนื่องจากโรงงานแต่ละแห่งมีสภาพการสกัดที่แตกต่างกันและน้ำมันที่สกัดออกมาเมื่อเปิดวาล์วเพื่อเป่าแรงดัน ดังนั้นต้องหาภาชนะมาปิดวาล์วเพื่อเก็บน้ำมันและน้ำมันบางส่วนยังคงอยู่ที่ผิววาล์วด้านใน ปัจจัยที่ทำให้ปริมาณน้ำมันต่ำเนื่องจากเครื่องของเราสามารถควบคุมอุณหภูมิได้เพียงอย่างเดียวและไม่สามารถควบคุมความดันได้เช่นในการสกัดกาแฟจุดที่เหมาะสมคือประมาณ 80° C, 300 Bar แต่ที่อุณหภูมินี้เครื่องของเราทำงานที่ 155 Bar ดังนั้น ความดันและอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างการทดลองแสดงในรูป จากการทดลองน้ำมันสกัดมีความหนืดสูงมีความเข้มข้นกลิ่นแรงและติดทนนาน

เอกสารอ้างอิง

Volatile Oil Extraction Using Supercritical Fluid ผศ.ดร.ภก. ธนภัทร ทรงศักดิ์ กลุ่มวิชาเภสัชเวท คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

Mass Spectrometry for Natural Product Discovery, Katherine B. Louie, ... Trent R. Northen, in Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, 2020

Q. Wang, L. Liu, L. Wang, Y. Guo, J. Wang in Peanuts: Processing Technology and Product Development, 2016

การทดสอบอัลกอริทึมสำหรับการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

Algorithm verification for cooling of thermoelectric cooler

กันต์พจน์ วงศ์หนองเตย, ณพล ศรีเกษมสุนทร, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์*

Kanpoj Wongnongtoey, Napol Srikasemsuntorn, Taweedej Sirithanapipat*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการทดลองการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์(Thermoelectric Cooler) หรือแผ่นเพลเทียร์ (Peltier) โดยนำไปใช้สำหรับทำความร้อนและความเย็นให้ได้ตรงตามระดับอุณหภูมิ(Temperature Profile) ของกระบวนการปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส(Polymerase chain reaction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ผลจากการศึกษาด้วยวิธีการจำลองพบว่าเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์สามารถทำความร้อนได้อย่างรวดเร็ว แต่การทำความเย็นนั้นใช้เวลาค่อนข้างมาก จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาอัลกอริทึม(Algorithm) ที่เหมาะสมในการทำความเย็นจากอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ไปยัง อุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ได้สร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดสอบระบบควบคุมของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นโดยใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 ในการควบคุม ซึ่ง Arduino สามารถจ่ายสัญญาณ Pulse Width Modulation หรือ PWM ด้วยความถี่ 490 Hz ในการทดลองนี้จะทำการหน่วงค่าความถี่ของ PWM ในการจ่ายกระแสไฟฟ้า, ทำการปรับหาค่ากระแสไฟฟ้า และหาช่วงคาบเวลาที่เหมาะสมในการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์สามารถทำความเย็นได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์, ปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเลส, การทำความเย็นของเพลเทียร์

Abstract

This research presenting, the experiment of the function for a Thermoelectric Cooler or a Peltier, which is a device that using for heating and cooling to meet the temperature profile of the polymerase chain reaction (PCR) which is a process with rapid temperature change. The result from simulation represents that the Thermoelectric Cooler can rapidly increase the heating rate but cooling takes a lot of time. Therefore, conducted an experiment to find out an appropriate algorithm for Thermoelectric Cooler to cooling from approximately 90 degrees Celsius to 55 degrees Celsius. This research also prototyping a system for testing the control of the cooling process of the thermoelectric cooler by using an Arduino Mega 2560 board controller that The Arduino board can supply Pulse Width Modulation or PWM signals with a frequency of 490 Hz in this experiment will delay the frequency of PWM signals of the electric current. And adjusting the appropriate electric current and appropriate time to distribute electricity for the thermoelectric cooler to provide the most efficient cooling process.

Keywords: Arduino, PCR, Peltier, Thermoelectric Coolers

คำนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งหรือเพลเทียร์(Peltier) ไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำความร้อนหรือทำความเย็นได้ และนอกจากนี้ยังมีขนาดให้เลือกมากมาย จึงทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายและเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นในงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและทดสอบการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ ให้สามารถทำอุณหภูมิได้ตามต้องการและมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยจะทดสอบให้เพลเทียร์สามารถทำความเย็นจากอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ลดลงไปที่อุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วง annealing กระบวนการของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส(Polymerase chain reaction) หรือ PCR เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการเพิ่มปริมาณสารพันธุกรรม

ในกระบวนปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ 3 ระดับได้แก่ ระดับที่หนึ่ง Denaturation มีระดับอุณหภูมิที่ 92–96 องศาเซลเซียส ระดับที่สอง Annealing มีระดับอุณหภูมิที่ 37-65 องศาเซลเซียส ระดับที่สาม Extension มีระดับอุณหภูมิที่ 72–75 องศาเซลเซียส ในการเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมินั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีลักษณะเป็น Thermal Cycle ผลจากทดสอบพบว่าการทำความเย็นนั้นใช้เวลาค่อนข้างมาก จึงได้มีการนำอุปกรณ์ที่ใช้ในการช่วยเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนมาใช้ เช่น พัดลม หรือ Heatsink เป็นต้น นอกจากนี้การใช้อัลกอริทึม(Algorithm) ที่เหมาะสมในการทำความเย็นก็สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นได้ ในการทดลองนี้จึงได้ทำการทดสอบหาอัลกอริทึม(Algorithm) ที่เหมาะในการทำความเย็นของ PCR ในช่วง Annealing

การใช้อัลกอริทึมด้วยวิธีการควบคุม PID ในการควบคุมการทำของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งให้สามรถทำความเย็นในช่วง Annealing พบว่าสามารถทำความเย็นจากอุณหภูมิ 92 องศาเซลเซียส ลดไปยัง 55 องศาเซลซียส ใช้เวลาประมาณ 55 วินาที โดยมีการติดตั้ง Heastsink และพัดลมในการช่วยระบายความเย็น (กันต์พจน์ และคณะ, 2562)

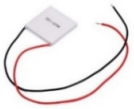
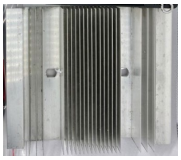
ในการทดลองนี้จึงได้นำเอาวิธีการทำความเย็นแบบ Transient Thermoelectric Pulse Cooling มาใช้ ซึ่งวิธีนี้จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงคาบเวลา (Piggotta and Allen. 2017) และนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการทำความของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ มีดังแสดงใน Table 1

Table 1 Equipment

Name	Picture
1. Peltier 12V	
2. Arduino Mega 2560	
3. Mosfet breakout board	
4. Temperature sensor PT100	
5. RTD-to-Digital Converter MAX31865	
6. Heatsink	

การเตรียมอุปกรณ์

ในการประกอบระบบสำหรับการใช้ทดสอบการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ มีวิธีการต่อดังที่ได้แสดงใน Fig. 1

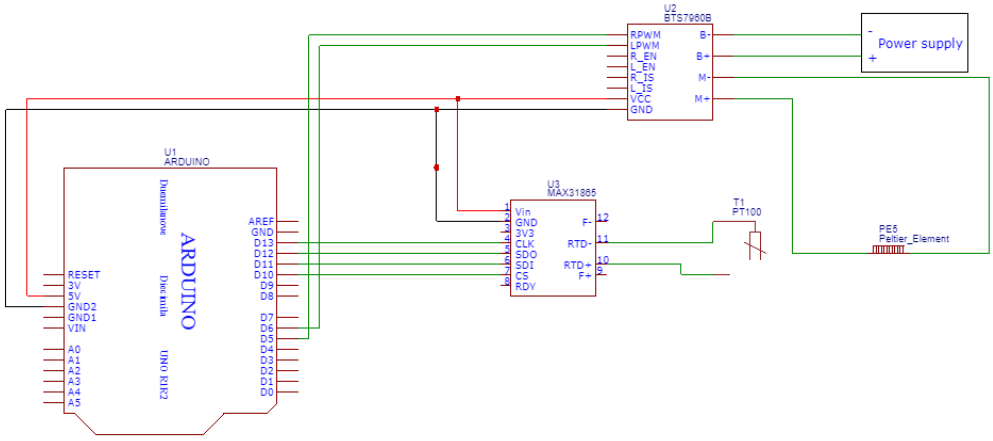


Fig. 1 Schematic diagram

และได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวัดอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ โดยทำการติดตั้งเซนเซอร์ตามรูปที่ได้แสดงใน Fig. 2

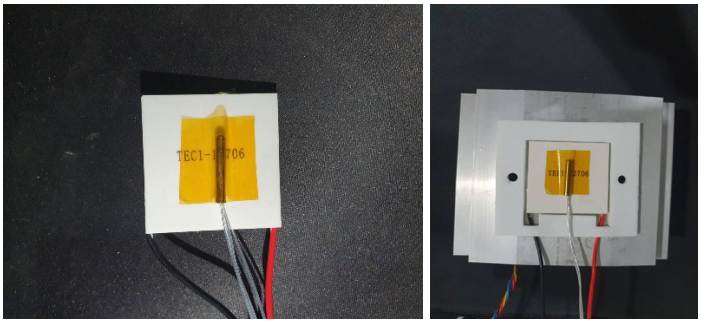


Fig. 2 Sensor installation

วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะทำการกำหนด setpoint ของอุณหภูมิช่วงที่ 3 หรือช่วง Annealing ของ PCR ตามตารางที่ Table. 2 และทำการทดสอบโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 0.5 แอมป์ เป็นช่วงคาบของเวลาที่ต่างกันที่ 0–1 วินาที หรือใช้วิธี Thermoelectric Pulse Cooling และนำมาเปรียบเทียบหาช่วงคาบเวลาที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด

Table 2 Setpoint

State	setpoint
1. Heating	90
2. Cooling	55

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการทดลองการทำความเย็นจากอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสลดลงไปที่ 55 เซลเซียส โดยไม่มีการติดตั้ง Heatsink พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เพลเทียร์ที่ 0.5 แอมป์ ในการทำความเย็นอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเพลเทียร์ใช้เวลามากกว่า 300 วินาทีในการทำความเย็น ตามรูปที่ Fig. 3

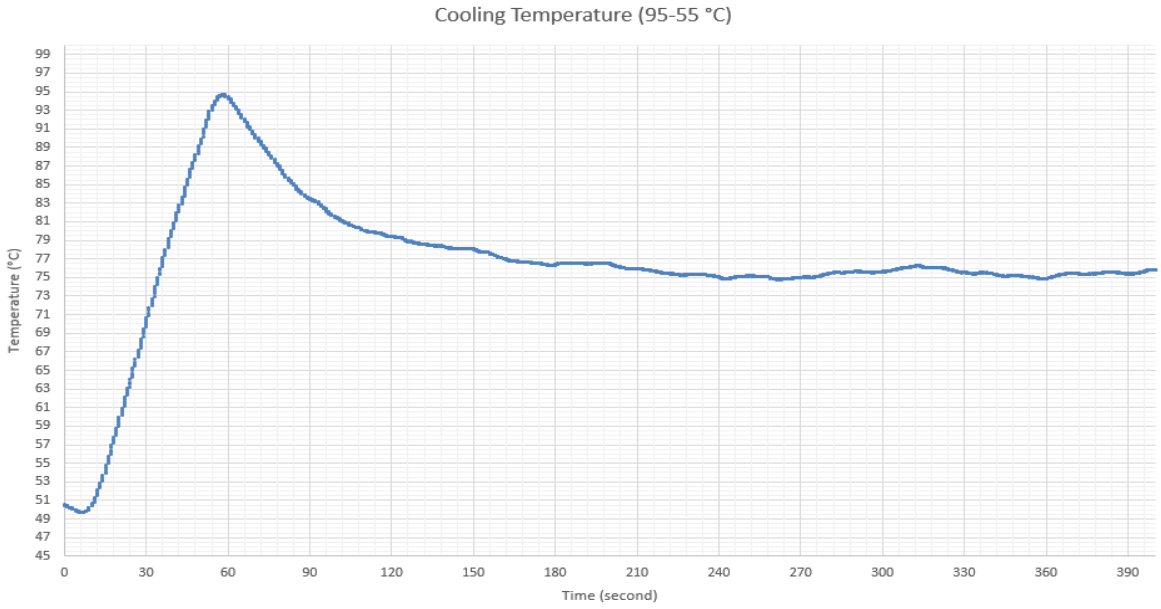


Fig. 3 Temperature profile of thermoelectric without pulse cooling

ผลของการทดลองการทำความเย็นจากอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสลดลงไปที่ 55 เซลเซียส โดยไม่มีการติดตั้ง Heatsink พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เพลเทียร์ที่ 0.5 แอมป์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วงคาบของเวลาที่คาบเท่ากับ 1 วินาที ในการทำความเย็นพบว่าเพลเทียร์ใช้เวลาประมาณ 270 วินาที ในการทำความเย็น ตามรูปที่ Fig. 4

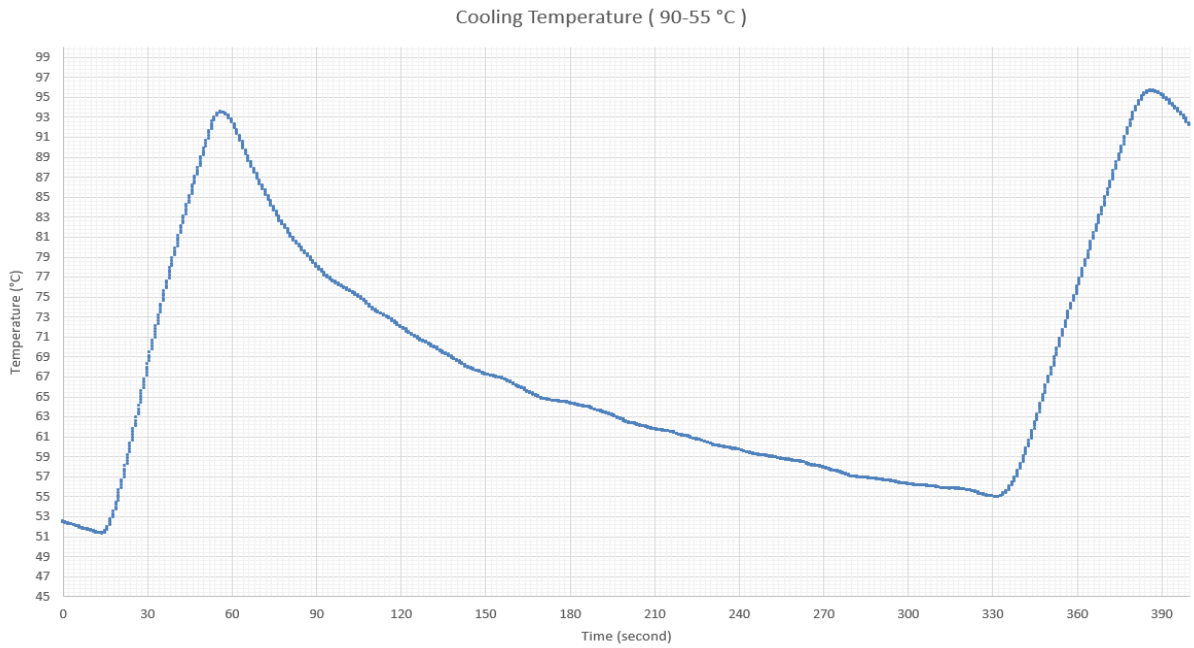


Fig. 4 Temperature profile of thermoelectric pulse cooling with 1 second per period (T)

ผลของการทดลองการทำความเย็นจากอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสลดลงไปที่ 55 เซลเซียส โดยไม่มีการติดตั้ง Heatsink พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เพลเทียร์ที่ 0.5 แอมป์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วงคาบของเวลาที่คาบเท่ากับ 0.5 วินาที ในการทำความเย็นพบว่าเพลเทียร์ใช้เวลาประมาณ 210 วินาที ในการทำความเย็น ตามรูปที่ Fig. 5

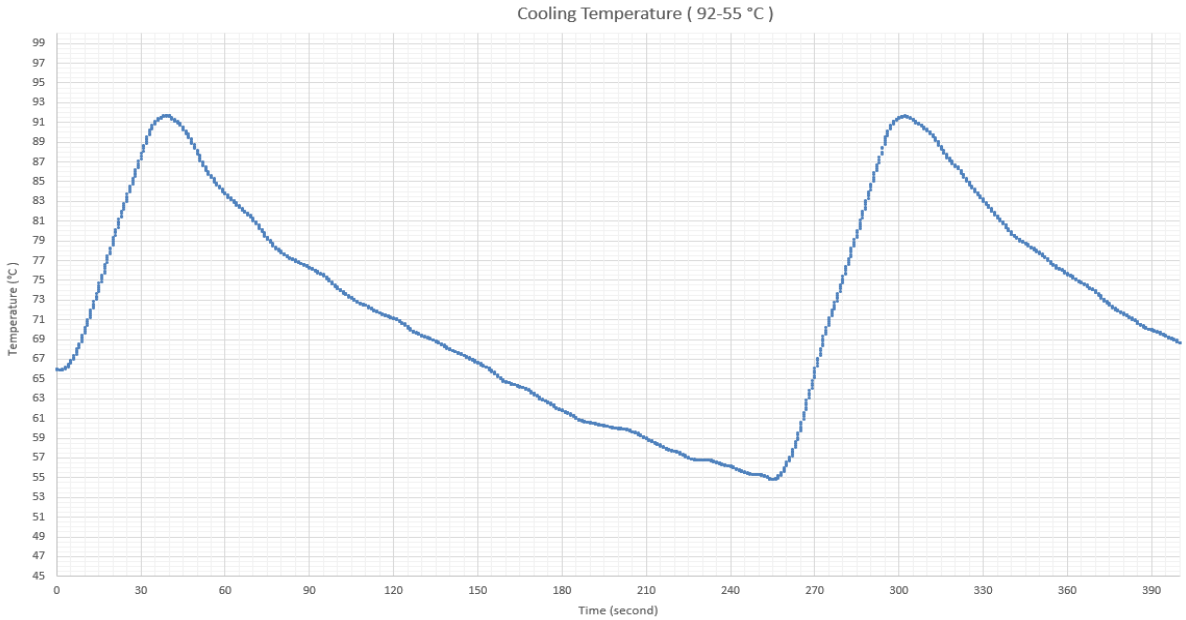


Fig. 5 Temperature profile of thermoelectric pulse cooling with 0.5 second per period (T)

ผลของการทดลองการทำความเย็นจากอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสลดลงไปที่ 55 เซลเซียส โดยมีการติดตั้ง Heatsink พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เพลเทียร์ที่ 0.5 แอมป์ ในการทำความเย็นอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเพลเทียร์ใช้เวลา 65 วินาที ในการทำความเย็น ตามรูปที่ Fig. 6

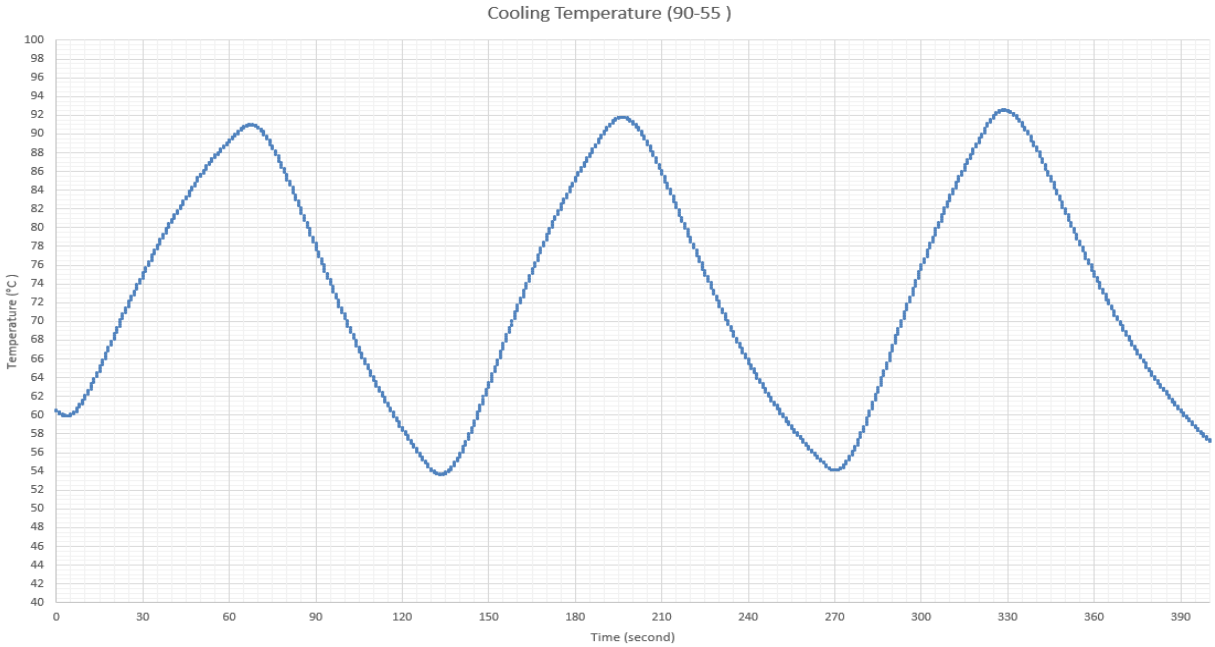


Fig. 6 Temperature profile of thermoelectric with heatsink without pulse cooling

ผลของการทดลองการทำความเย็นจากอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสลดลงไปที่ 55 เซลเซียส โดยมีการติดตั้ง heatsink พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เพลเทียร์ที่ 0.5 แอมป์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วงคาบของเวลาที่คาบเท่ากับ 0.5วินาที ในการทำความเย็นพบว่าเพลเทียร์ใช้เวลาประมาณ 45 วินาที ในการทำความเย็น ตามรูปที่ Fig. 7

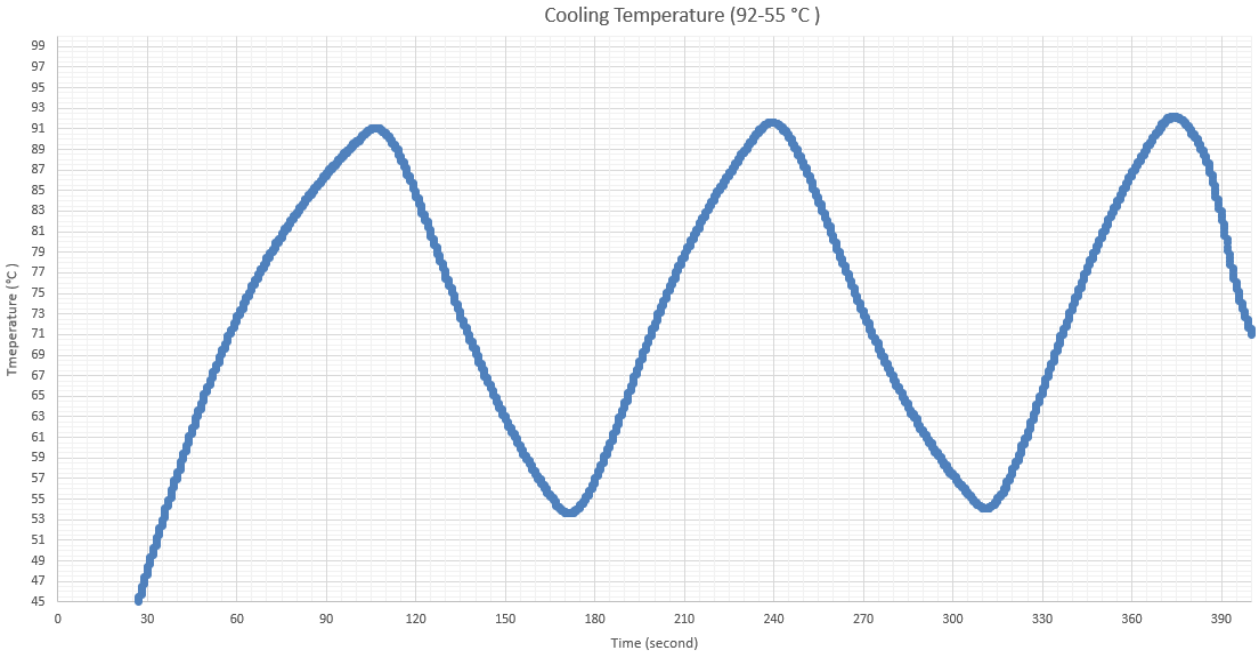


Fig. 7 Temperature profile of thermoelectric pulse cooling with heatsink and 0.5 second per period (T)

การใช้อัลกอริทึม thermoelectric pulse cooling โดยมีค่าคาบของเวลาอยู่ที่ 0.5 วินาที ใช้เวลาในการทำความเย็นได้เร็วที่สุดเมื่อ ตามที่ได้แสดงใน Fig.5 นำค่าที่ได้จากการทดลองดังกล่าว มาใช้กับระบบที่มีการติดตั้ง Heatsink ผลที่ได้ก็ยังสามารถทำความเย็นได้เร็วที่สุด ตามรูปที่ได้แสดงใน Fig. 7

สรุป

จากการทดสอบหาอัลกอริทึม(Algorithm) ที่เหมาะในการทำความเย็นของกระบวนการปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสในช่วง Annealing จากอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส ไปยัง 55 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้อัลกอรึธึมแบบ Thermoelectric Pulse Cooling สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นของของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ได้ โดยใช้เวลาในการทำความเย็นน้อยที่สุด อยู่ที่ 210 วินาที และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบายความร้อนใช้เวลา 45 วินาที ซึ่งสามารถนำอัลกอริทึม Thermoelectric Pulse Cooling ประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ PID เพื่อใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อันเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และห้องทดลอง PID Lab คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และทุนสนันสนุนบางส่วนที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กันต์พจน์ วงศ์หนองเตย, ณพล ศรีเกษมสุนทร, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. 2562. การควบคุมอุณหภูมิของเทอร์โมเล็กทริกคูลลิ่งด้วยตัวควบคุมพีไอดี. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 33. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, อุดรธานี.

K.S. Chong, Gan, K.B. 2016. Portable Polymerase Chain Reaction (PCR): Thermal Ramping Rate Performance. Evaluation IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences. Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 447–449.

Piggotta, A.J., Allen, J.S. 2017. Peltier supercooling with isosceles current pulses: Cooling an object with internal heat generation. ECS Journal of Solid State Science and Technology. 6: 250–259.

Pogfai, T., Wong-ek, K., Mongpraneet, S., Wisitsoraat, A., Tuantranont, A. 2008. Low cost and portable PCR thermoelectric cycle. International Journal of Applied Biomedical Engineering 1: 41–45.

การทดสอบประสิทธิภาพการซึมน้ำของกระเปาะเซรามิกส์เพื่อใช้ในระบบการให้น้ำแก่พืช

Effectiveness of emitter in ceramic bulb for subsurface irrigation system

ปิยะรส มาลีเจริญ, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์*

Piyarose Maleecharoen, Taweedej Sirithanapipat*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: taweedej.s@ku.th

บทคัดย่อ

การให้น้ำแก่พืชโดยทั่วไปแล้วนั้นจะเป็นการรดน้ำตรงจุดที่เป็นผิวดิน ทำให้น้ำไม่สามารถไปถึงรากที่อยู่ลึกลงไปใต้ดิน ในบทความนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบอุปกรณ์ในการให้น้ำใต้ดินแก่พืชที่จะสามารถรดได้ถึงส่วนรากที่อยู่ลึกลงไป เพื่อลดการสูญเสียน้ำ ในระบบจะมีการใช้กระเปาะเซรามิกส์ช่วยในการให้น้ำใต้ดิน โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการซึมน้ำของกระเปาะเซรามิกส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร มีความยาว 3 ขนาด ได้แก่ 75, 90 และ110 มิลลิเมตร โดยผลิตที่อุณหภูมิ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส เพิ่มประสิทธิภาพ โดยแต่ละแบบจะมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร มีการเก็บข้อมูลด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP 32 เพื่อให้สามารถวัดอัตราการซึมน้ำที่แตกต่างกันออกไป การซึมน้ำของกระเปาะซึ่งมีการผลิตที่อุณหภูมิต่ำจะดีกว่ากระเปาะที่ผลิตที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากความพรุนมากกว่า เพื่อให้เกษตรนำไปใช้งานได้ตรงตามความต้องการของพืชแต่ละชนิด

คำสำคัญ: การให้น้ำอย่างแม่นยำ, การให้น้ำใต้ผิวดิน, วัสดุที่มีรูพรุน

Abstract

Generally, Watering the plant usually apply on the surface of the soil. So, this method wastes a lot of water especially in the sunny or low humidity day, causing the water can't reach to root underground. In this research, we designed the subsurface irrigation system to supplies water for root using ceramic bulbs. We studied the water permeability efficiency of ceramic bulbs by divided ceramic bulb with 30 mm diameter into 3 size such as 75, 90, 110 centimeters. Each size has thickness about 3 millimeters. The Ceramic Bulbs were process at High and Low temperature (1050 and 950°C). Data of water permeability were collected via ESP32 microcontroller. The experiment shows that the low temperature ceramic bulb has better water permeability rates than high temperature ceramic bulbs because low temp ceramic bulb has higher porosity. So, we can use to design subsurface irrigation system for each type of plant.

Keywords: precision irrigation, subsurface irrigation, porous materials

คำนำ

การให้น้ำแก่พืชนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งความต้องการน้ำจะเป็นไปตามความต้องการของพืชในแต่ชนิดและแต่ละช่วงการเจริญเติบโต องค์ประกอบหลักที่มีผลต่อปริการใช้น้ำของพืช ได้แก่ แสงแดด อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความเร็วลม ซึ่งจะมีผลต่อการคายน้ำและการระเหย ดังนั้นจึงต้องหาวิธีที่จะชดเชยปริมาณที่สุญเสียไป โดยวิธีที่ประสบความสำเร็จในการให้น้ำมากที่สุดคือ microirrigation ที่เป็นวิธีที่สามารถทำให้ชาวสวนสามารถดูแลพืชได้อย่างแม่นยำ รวมถึงการให้สารอาหารแก่ต้นพืชได้ตรงจุด ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (Malhotra and Das, 2016) โดยการให้นำแก่พืชอย่างเหมาะสม จะต้องมีการให้น้ำอย่างล้ำลึกและไม่บ่อยมากนัก (Jauron, 1994) วิธีการให้น้ำแก่พืชอย่างมีประสิทธิภาพนั้น คุณภาพของน้ำก็เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญ วิธีที่ใช้ปริมาณน้ำไม่มากแต่ระยะเวลาในการให้น้ำนาน เรียกว่า Drip Irrigation วิธีนี้จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้ทรัพยาการน้ำได้อย่างคุ้มค่า (Stein and Welsh, 1914) ระบบการใช้น้ำแก่พืชที่ดีจะต้องตอบสนองความต้องการน้ำของพืชได้อย่างเพียงพอ มีความสะดวกแก่ผู้ใช้ และเหมาะสมกับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ รวมไปถึงในปัจจุบันได้การพัฒนาออกแบบระบบการจัดการน้ำแก่พืชผ่าน cloud เพื่อให้สามารถทำนายสถานะความสมบูรณ์โดยรวมของพืชได้อีกด้วย โดยจะมีการส่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆไปยัง Cloud และใช้ Machine learning ในการสร้างเงื่อนไขเพื่อตรวจสอบสภาวะของพืชในขณะนั้น ๆ (Reghukumara and Vijayakumarb, 2019)

ดังนั้นบทความนี้จึงได้มีการพัฒนาระบบให้น้ำแก่พืชใต้ผิวดิน โดยใช้กระเปาะเซรามิกส์เป็นตัวซึมน้ำออกตามอัตราที่กำหนดไว้ เพื่อเป็นการลดความสิ้นเปลืองน้ำ และเป็นการรดน้ำได้อย่างตรงจุด (D. Reich, R. Godin, J.L. Chávez and I. Broner) ซึ่งสามารถปรับระดับตามความลึกของรากได้ ดัง Fig. 5 การให้น้ำใต้ผิวดินมีข้อดีคือ 1. การติดตั้งระบบให้น้ำ ใต้ผิวดินแบบถาวร มีการใช้แรงงานรายปีน้อยกว่าการติดตั้งระบบแบบบนพื้นผิว และยังเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของระบบ 2.ลดการเกิดโรคและช่วยลดวัชพืช 3.ช่วยลดการบดอัดของดิน 4.ให้น้ำและสารอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ 5.ผลผลิตเพิ่มมากขึ้น (Phene et al., 1987)

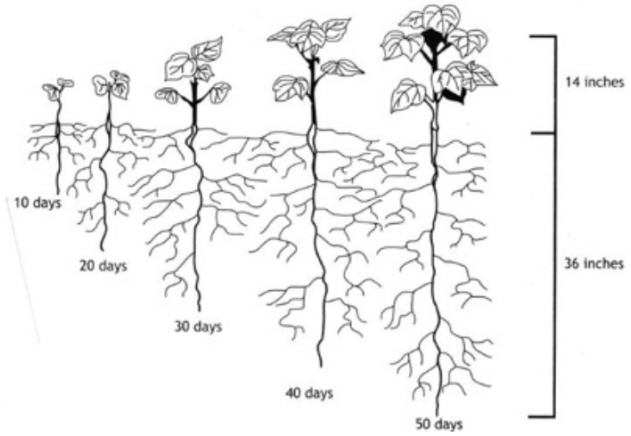


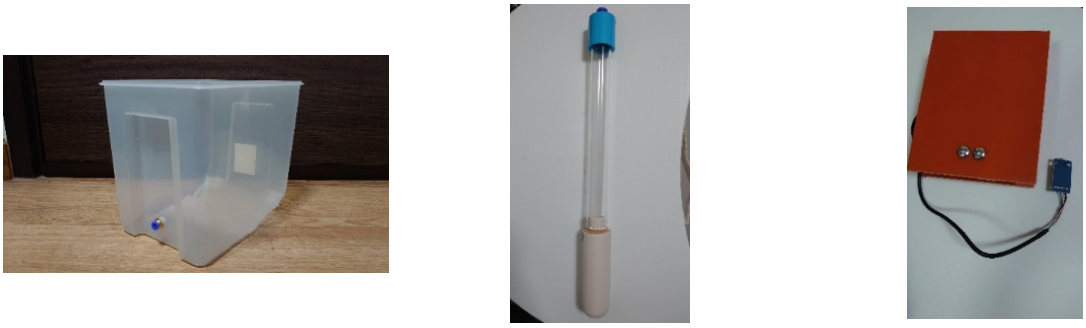
Fig. 5 Early-season root development of cotton (Oosterhuis, 1990)

อุปกรณ์และวิธีการ

ในบทความนี้ ได้มีการทำการทดลองเพื่อหาอัตราการซึมน้ำของกระเปาะเซรามิกส์ที่ถูกผลิตขึ้นที่อุณหภูมิต่างกัน เพื่อให้มีความพรุนต่างกัน (Mouiya et al., 2019) ดัง Fig. 6 โดยกระเปาะเซรามิกจะมีความยาว 75 มิลลิเมตร 90 มิลลิเมตร และ 110 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร แล้วจึงทำการทดลองเพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสม ก่อนจะนำไปประยุกต์ในการใช้งานจริงต่อไปได้ ซึ่งในการใช้งานนั้น จะสามารถเลือกขนาดและชนิดของกระเปาะเพื่อให้เหมาะสมแก่ปริมาณน้ำที่พืชต้องการ ณ ขณะนั้น



Fig. 6 Ceramic Bulb



(A) (B) (C)

Fig. 7 The Equipment in experiment. (A) water tank (B) Ceramic bulb (C) Load cell

การหาอัตราการซึมน้ำของกระเปาะเซรามิกส์ มีอุปกรณ์ดังนี้

- กระเปาะเซรามิกส์ ดัง Fig. 7 (B)
- ท่ออะคลิลิค ความยาว 20 เซนติเมตร
- กระบะสำหรับใส่ดิน
- Load cell ดัง Fig. 7 (C)
- ถังน้ำ ดัง Fig. 7 (A)
- เซนเซอร์ DHT22 สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ
- ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

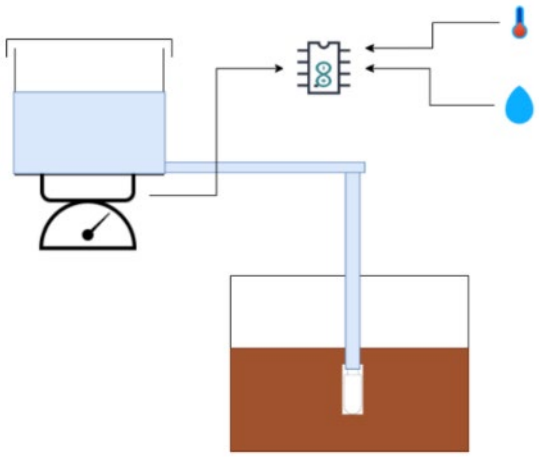


Fig. 8 Experimental setup

วิธีการทดลอง

จากการทดลองดังแสดงใน Fig. 8 จะทำการหาอัตราการซึมน้ำของกระเปาะเซรามิกส์ที่ถูกผลิตโดยการเผาที่อุณหภูมิ 950 (Low Temperature) และ 1050 (High Temperature) องศาเซลเซียส มีความยาวของกระเปาะสามขนาดคือ 75, 90,110 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร ดัง Fig. 10 รวมทั้งหมด 6 กระเปาะโดยในการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การหาอัตราการซึมน้ำในอากาศ เทียบกับอัตราการซึมน้ำใต้ดิน โดยการทดลองทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง การทดลองหาอัตราการซึมน้ำในอากาศดัง Fig. 9B จะทำโดยการนำกระเปาะเซรามิกส์จะเชื่อมต่อกับท่ออะคลิลิคซึ่งตรงปลายเป็นท่อต่อกับสายยางจากถังน้ำ จากนั้นจะมีการจับเวลาหาอัตราการซึมน้ำทุกชั่วโมง และมีการชั่งน้ำหนักของน้ำในถังน้ำที่เปลี่ยนไป โดยใช้ Load cell เชื่อมต่อกับ ESP 32 ส่วนการทดลองใต้ดิน จะมีการฝังกระเปาะลงในกระบะที่มีการเตรียม ดินสำหรับปลูกพืชดัง Fig. 9A

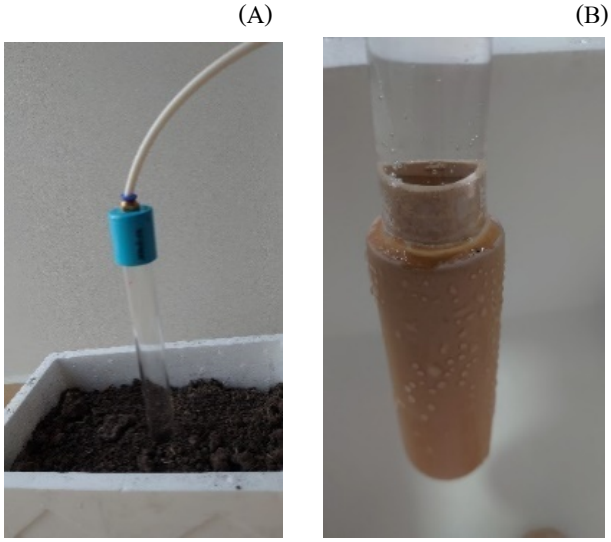


Fig. 9 (A) Ceramic Bulb in Loam soil (B) Ceramic Bulb in air

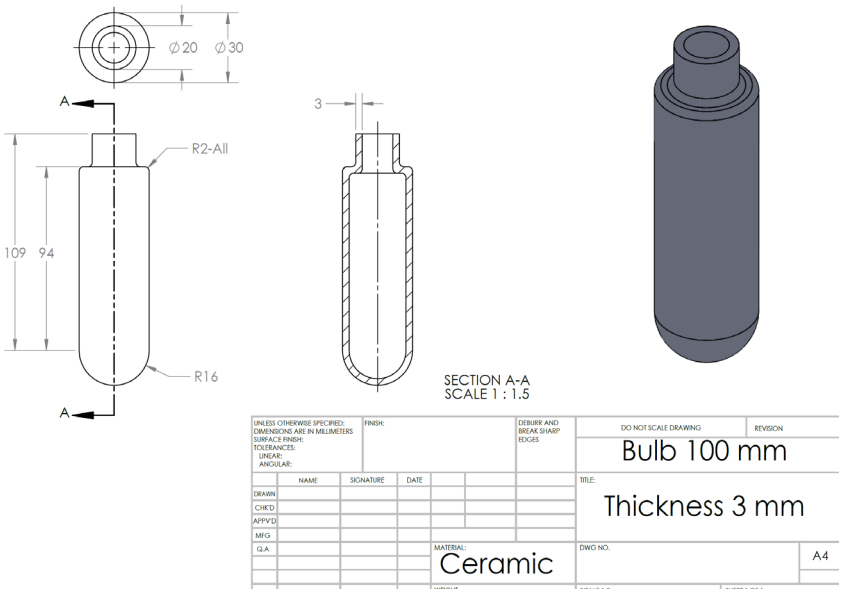


Fig. 10 Drawing of Ceramic Bulb

ผลการทดลอง

จากการทดลอง จะพบว่ากระเปาะเซรามิกส์ที่ถูกผลิตมาด้วยกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์นั้น ชิ้นงานที่ได้จะมีขนาดแตกต่างจากขนาดที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยขนาดจริงของกระเปาะแต่ละหมายเลขจะเป็นไปตาม Table 1

Table 1 Actual size of Ceramic bulb

No.	Process Temperature	Bulb Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)
1	High	106.34	33.43	3.23
2	High	91.50	33.27	3.11
3	High	75.09	33.20	3.04
4	Low	109.69	35.18	2.91
5	Low	95.48	34.98	3.56
6	Low	77.45	34.77	3.76

ในการทดลองหาอัตราการซึมน้ำในอากาศ จะพบว่าใน 24 ชั่วโมง พบว่าปริมาณการซึมน้ำของกระเปาะหมายเลข 1 จะเฉลี่ยอยู่ที่ 2.76 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กระเปาะหมายเลข 2 เฉลี่ยที่ 2.50 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กระเปาะหมายเลข 3 เฉลี่ยที่ 1.55 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ดัง Fig. 11 ส่วนกระเปาะหมายเลข 4 เฉลี่ยที่ 4.73 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กระเปาะหมายเลข 5 เฉลี่ยที่ 3.01 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ กระเปาะหมายเลข 6 เฉลี่ยที่ 2.21 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ดัง Fig. 12

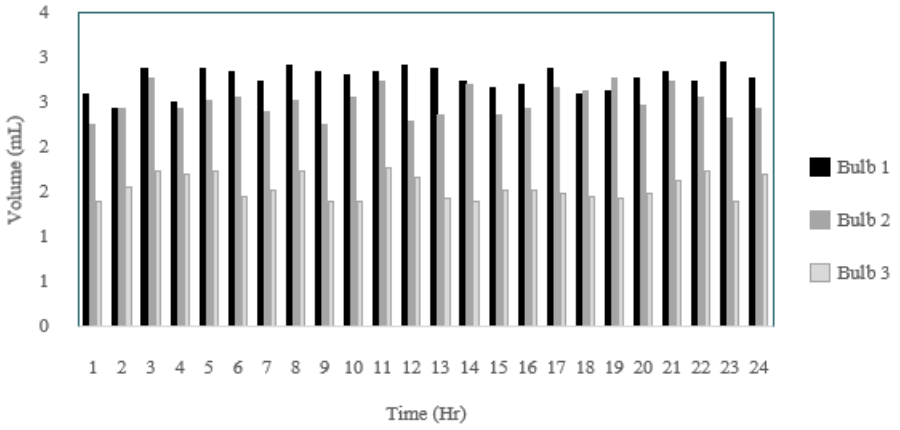


Fig. 11 *Water* permeability *rate* of High Temp Ceramic Bulb No.1-3 in Air

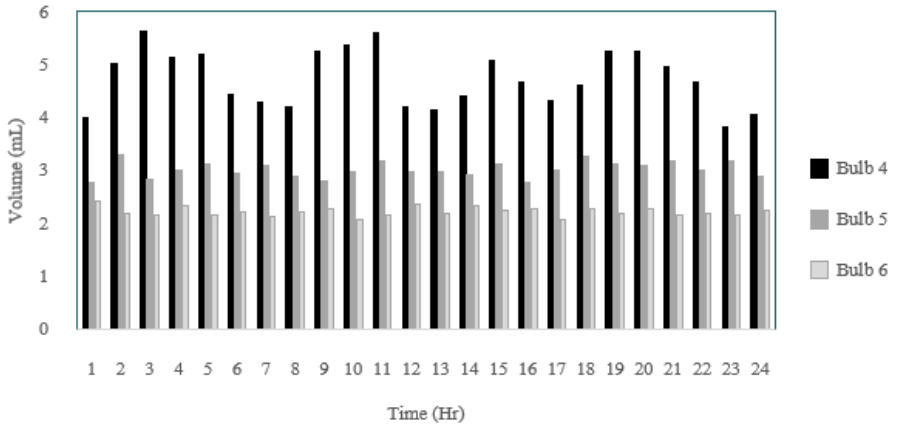


Fig. 12 *Water* permeability *rate* of Low Temperature Ceramic Bulb No.4-6 in Air

จากนั้นเมื่อนำกระเปาะหมายเลข 1–6 มาทดลองหาอัตราการซึมน้ำในดิน จะพบว่า ปริมาณการซึมน้ำของกระเปาะหมายเลข 1 จะเฉลี่ยอยู่ที่ 5.68 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กระเปาะหมายเลข 2 เฉลี่ยที่ 3.77 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กระเปาะหมายเลข 3 เฉลี่ยที่ 2.91 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ดัง Fig. 13 ส่วนกระเปาะหมายเลข 4 เฉลี่ยที่ 6.94 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กระเปาะหมายเลข 5 เฉลี่ยที่ 5.37 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ กระเปาะหมายเลข 6 เฉลี่ยที่ 4.36 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ดัง Fig. 14

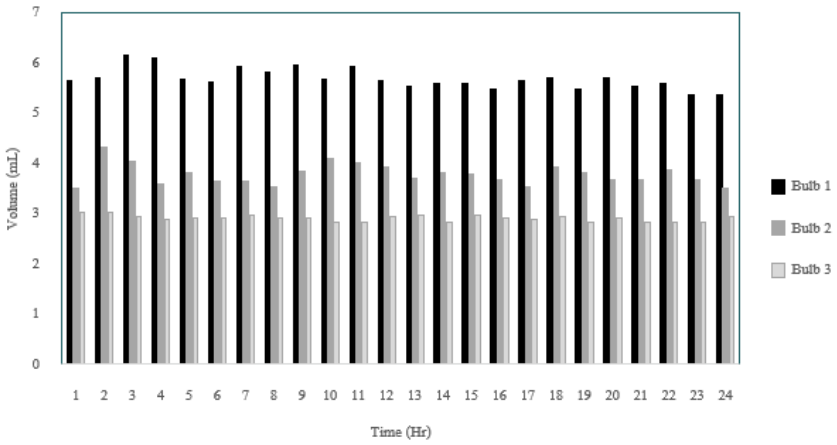


Fig. 13 *Water* permeability *rate* of High Temperature Ceramic Bulb No.1-3 in Loam Soil

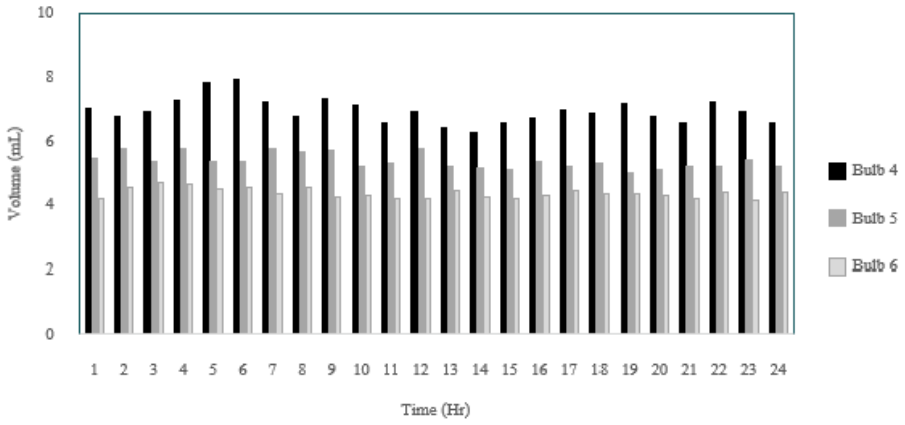


Fig. 14 *Water* permeability *rate* of Low Temperature Ceramic Bulb No.4-6 in Loam Soil

สรุป

จากการวัดขนาดกระเปาะเซรามิกส์ที่ได้ทำการออกแบบได้ คือ 75 มิลลิเมตร 90 มิลลิเมตร และ 110 มิลลิเมตรพบว่าขนาดมีความคลาดเคลื่อนจากเดิมที่ออกแบบไว้ เนื่องจากกรรมวิธีในการผลิต ทั้งนี้ความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังคงไม่เกิน 10 % เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ย 26 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพันธ์ 50–60% พบว่า อัตราการการซึมน้ำของกระเปาะเซรามิกส์ที่ถูกฝังดินจะมีมากกว่ากระเปาะเซรามิกส์ในอากาศ เนื่องจากมีดินเป็นตัวซับน้ำ สภาพแวดล้อมรอบกระเปาะจึงแห้งกว่าในอากาศ ทำให้น้ำสามารถซึมออกมาได้มากขึ้น จาก

Table 2 กระเปาะที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสจะสามารถซึมน้ำออกมาได้ดีกว่า กระเปาะที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เนื่องจากรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงเมื่อกระเปาะเซรามิกถูกเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้จะสามารถเลือกใช้กระเปาะเซรามิกส์ที่เหมาะสมแก่การให้น้ำใต้ผิวดินได้ตามความเหมาะสมของชนิดพืชต่อไป

Table 2 Comparison of Average Water Permeability Rate in Air and Loam Soil

Process Temperature	Average Water Permeability Rate (mL/ hr.)		
	Bulb No.	Air	Loam Soil
High Temperature	1	2.8	5.7
	2	2.5	3.8
	3	1.5	2.9
Low Temperature	4	4.7	6.9
	5	3.0	5.4
	6	2.2	4.4

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณ ห้องวิจัย PID ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย แก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ และทุนสนับสนุนบางส่วน จนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Das, S.K.M.a.M. 2016. Augmenting water use efficiency in horticulture. pp 45–60.

Jauron, R. 1994. Proper watering procedures.https://hortnews.extension.iastate.edu/1994/6-8-1994/hohright.html, october,18.

Mouiya, M., Bouazizi, A., Abourriche, A., El Khessaimi, Y., Benhammou, A., El hafiane, Y., Taha, Y., Oumam, M., Abouliatim, Y., Smith, A., Hannache. H. 2019. Effect of sintering temperature on the microstructure and mechanical behavior of porous ceramics made from clay and banana peel powder. Results in Materials. 4: 100028.

Oosterhuis, D.M. 1990. Growth and development of a cotton plant. Nitrogen Nutrition of Cotton: Practical Issues. 1–24.

Phene, C.J., Davis, K.R., Hutmacher, R.B., McCormick, R.L. 1987. Advantages of subsurface irrigation for processing tomatoes. In: International Society for Horticultural Science (ISHS). Leuven, Belgium, pp, 101–114.

Reghukumar, A., Vijayakumar, V. 2019. Smart plant watering system with cloud analysis and plant health prediction. Procedia Computer Science. 165: 126–135.

Reich, D., Godin, R., Chávez, J.L., Broner, I. Subsurface Drip Irrigation. https://www.waternsw.com.au/water-quality/catchment/living/wastewater/systems/subsurface-irrigation, october,18.

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
Subject: Engineering and Architecture

ภาคโปสเตอร์
Poster Presentation

การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในขวดแก้วโดยใช้แมชชีนวิชั่น

Detection of foreign objects in a glass bottle using machine vision

ชินภัทธ์ ทรงสินสุนทร*, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย

Chinnphat Songsinsunthon*, Withit Chatlatanagulchai

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างและออกแบบอัลกอลิธึมโดยใช้เทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักรและรับภาพจากกล้องเว็บแคมเพื่อคัดแยกขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียง การคัดแยกใช้เทคนิคการจัดแสงสว่างที่เหมาะสมสำหรับลดแสงรบกวนและจัดทำอัลกอลิธึมผ่านโปรแกรม NI Vision Builder 2015 โดยที่ฟังก์ชั่นของโปรแกรมสามารถตัดแสงรบกวนที่เหลืออยู่, กำหนดขอบเขตการตรวจสอบ, จำแนกขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกปลอมกับไม่มีสิ่งแปลกปลอมและแสดงข้อมูล การศึกษาพบว่าการใช้เทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักรและรับภาพจากกล้องเว็บแคม งานวิจัยนี้สามารถสร้างอัลกอลิธึมคัดแยกขวดแก้วได้ความถูกต้องมากกว่า 85%

คำสำคัญ: การมองเห็นของเครื่องจักร, กล้องเว็บแคม, อัลกอลิธึม

Abstract

This research is to build and design the algorithm for detecting foreign objects in a glass bottle using machine vision technology and inspection with image form webcam camera to sort all foreign bottles along the conveyor line. The detection used proper lighting techniques for reducing reflective light and using program NI Vision Builder 2015 to create algorithm. The program function is able to remove residual disturbing light, define the inspection scope, classify bottle with foreign objects and display. This research achieved the algorithm can classify bottle with foreign objects with accuracy more than 85%.

Keywords: algorithm, machine vision, webcam camera

คำนำ

เทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักรเป็นระบบที่ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้เพื่อตรวจสอบหาสิ่งผิดปกติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตทดแทนการใช้สายตามนุษย์ เนื่องจากสามารถตรวจสอบได้แม่นยำ (ภานุวัฒน์, 2558) รวมถึงสามารถตรวจสิ่งของที่มีการเคลื่อนรวดเร็วและปริมาณสูงโดยประสิทธิภาพยังคงเดิม นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่ามนุษย์สามารถมองเห็นได้อีกด้วย แต่การนำเทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักรไม่เหมาะกับงานที่ต้นทุนต่ำเพราะเทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักรนิยมใช้ในการผลิตที่มีเคลื่อนรวดเร็วและปริมาณสูง (Arsalan and Aziz, 2012) จึงทำให้ในท้องตลาดมีแต่อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งราคาสูงตามไปด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักรผ่านโปรแกรม NI Vision Builder 2015 ร่วมกับกล้องเว็บแคม เพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในขวดแก้วเพื่อคัดแยกและนำกลับไปรียูท ทดแทนการใช้แรงงานคนในการตรวจสอบด้วยตาเปล่าโดยเป็นงานที่ไม่ได้ต้องการประสิทธิภาพสูงและมีงานลงทุนต่ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และการติดตั้ง

อุปกรณ์สำหรับงานวิจัยนี้ได้แก่ กล้องเว็บแคม, คอมพิวเตอร์, Program NI Vision Builder 2015, ไฟส่องสว่าง, สายพานลำเลียง, ไกด์ประคองและขวดแก้วตัวอย่าง ติดตั้งกล้องเว็บแคมในตำแหน่งด้านข้างของสายพานลำเลียงและติดตั้งไฟส่องสว่างในลักษณะ Back lighting เพื่อให้กล้องเว็บแคมสามารถถ่ายภาพของวัตถุให้เห็นรูปร่างได้ชัดเจนและลดแสงสะท้อนจากสิ่งแวดล้อม (Novini, 1993) รวมถึงติดตั้ง Guide สำหรับบังคับให้ขวดเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่กล้องบันทึกภาพและเชื่อมต่อกล้องเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB Port ซึ่งหลังจากติดตั้งอุปกรณ์แล้วเสร็จแสดงตาม Fig. 1

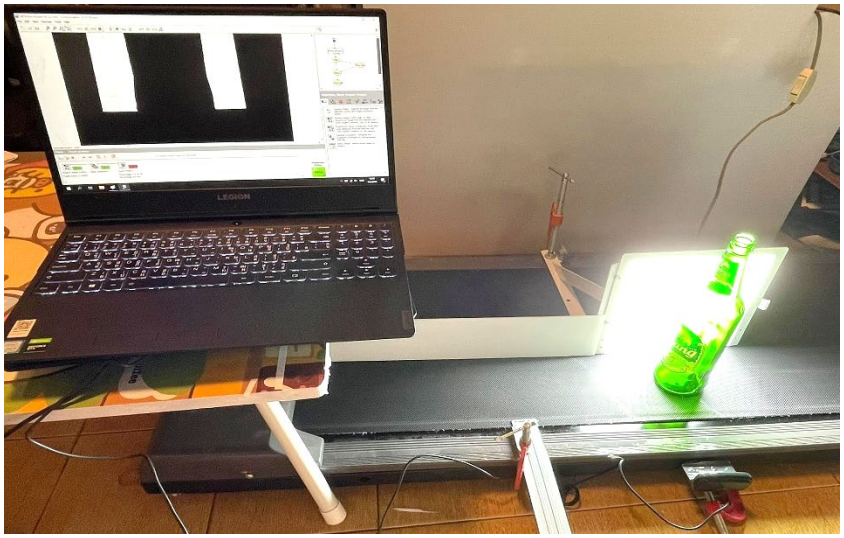


Fig. 1 The equipment setup for glass bottle inspection

การเขียนอัลกอลิมทึม

จัดทำอัลกอลิมทึมสำหรับคัดแยกขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกและไม่มีสิ่งแปลกปลอม โดยใช้โปรแกรม NI Vision Builder 2015 ประกอบด้วยขั้นตอนตาม Fig. 2 และมีหลักการทำงานดังนี้

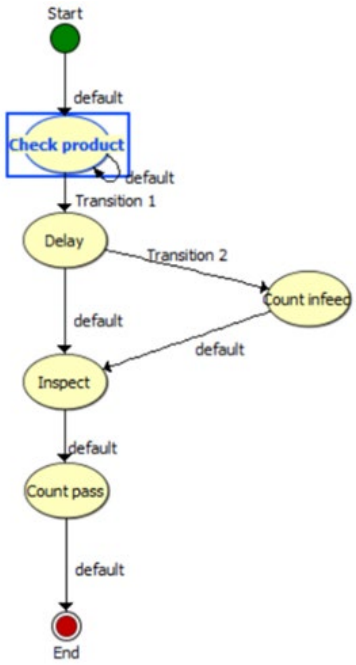


Fig. 2 Flow diagram of algorithm for detecting foreign objects in a glass bottle

1. Check product loop สำหรับตรวจสอบว่ามีขวดแก้วเข้ามารอการตรวจสอบหรือไม่โดยใช้ Module ดังนี้
   1.1 ใช้ Acquire Image Module สำหรับรับภาพจากกล้องเว็บแคม
   1.2 ใช้ Vision Assistant Module ปรับภาพเป็นภาพขาวดำและให้แสดงภาพขวดให้มีสีดำทั้งในกรณีขวดที่มีสิ่งปลอมและไม่สิ่งแปลกปลอม ในส่วนของแสงที่ส่องจากด้านหลังเปลี่ยนเป็นสีขาวทั้งหมดตามขั้นตอนด้านล่าง โดยผลที่ได้แสดงตาม Fig. 3
      1.2.1 ใช้คำสั่ง Brightness เพื่อปรับความสว่างของภาพ
      1.2.2 ใช้คำสั่ง Extract HSL - Luminance plane เพื่อเอาความสว่างของสีในภาพออก
      1.2.3 ใช้คำสั่ง Lookup Table - Equalize เพื่อปรับความคมชัดและความสว่าง โดยใช้ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เพื่อพยายามเปลี่ยนการกระจายข้อมูลที่ไม่ปกติให้เป็นแบบปกติและปรับจำนวนจุดบนภาพในแต่ละจุดให้ค่าความเข้มมีจำนวนใกล้เคียงกัน
      1.2.4 ใช้คำสั่ง Threshold - Moment เพื่อทำการรบกวนภาพและเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของภาพที่ถูกรบกวนและภาพต้นฉบับ เพื่อคำนวณใหม่ให้เป็น Binary images โดยแบ่งแยกพิกเซลให้แตกต่างกัน (Milan Sonka et al., 2013)
      1.2.5 ใช้คำสั่ง Basic Morphology - Close object เพื่อทำให้ภาพแสดงวัตถุได้ชัดเจนมากขึ้น โดยวิธีเติมเต็มหลุมเล็กๆ เพื่อทำให้ขอบเขตเรียบเนียน แต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงพื้นที่หรือรูปร่างของวัตถุ

(A) (B)



Fig. 3 Original images (A), After used Brightness, Extract HSL - Luminance plane, Lookup Table - Equalize, Threshold - Moment and Basic Morphology - Close object (B)

1.3 ใช้ Count Pixels Module นับจำนวนพิกเซล โดยกำหนดพื้นที่ตรวจสอบที่มุมด้านล่างของแสงสว่าง โดยมีเงื่อนไขหากนับจำนวนพิกเซลสีดำได้ไม่ถึง 85% ของพื้นที่ตรวจสอบระบบจะแสดงเป็น False ซึ่งหมายถึงยังไม่มีขวดลำเลียงเข้าสู่ระบบและจะยังไม่เปลี่ยนการทำงานไปยัง loop ถัดไป

2. Delay loop สำหรับหน่วงเวลาให้ขวดเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กล้องเว็บแคมบันทึกภาพเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในขวดแก้ว โดยใช้ Delay Module

3. Count infeed loop สำหรับนับจำนวนของขวดที่เข้ามาตรวจสอบ โดยใช้ Calculator setup module เพื่อนับจำนวน และ Set Variable module เพื่อบันทึกค่า

4.inspec loop สำหรับคัดแยกขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกปลอมและไม่มีสิ่งแปลกปลอมโดยใช้ Module ดังนี้

4.1 ใช้ Acquire Image Module สำรหรับรับภาพจากกล้องเว็บแคม

4.2 ใช้ Vision Assistant Module ปรับภาพเพื่อให้ รูปทรงของขวด, พื้นที่นอกขวด, สิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในขวดเป็นสีดำและภายในขวดที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมเป็นสีขาวตามขั้นตอนด้านล่าง โดยผลที่ได้แสดงตาม Fig. 4

4.2.1 ใช้คำสั่ง Brightness เพื่อปรับความสว่างของภาพ

4.2.2 ใช้คำสั่ง Extract HSL - Saturation plane เพื่อเอาความอิ่มตัวของสีในภาพออก

4.2.3 ใช้คำสั่ง Lockup Table - Square Root เพื่อเพิ่มความสว่างและคอนทราสต์ในบริเวณที่มืด (Jovitha Jerome, 2010)

4.2.4 ใช้คำสั่ง Gray Morphology - Proper Close เพื่อลบพิกเซลสีดำกลุ่มเล็กๆ ที่แยกอยู่ในพื้นที่ขาว และทำให้ขอบเขตของพื้นที่ในภาพที่สีดำดูสม่ำเสมอขึ้น (Dakun Zhang, 2009) สามารถพิจารณาโดยใช้ Equation 1

$$\text{proper-closing}(I) = \max(I, \text{EDDEED}(I)) \quad (1)$$

โดยที่ I คือ ภาพต้นฉบับ , E คือ การย่อภาพ และ D คือการขยายภาพ

(A) (B)



Fig. 4 Original images (A), after used Brightness, Extract HSL - Saturation plane, Lockup Table - Square Root, Gray Morphology - Proper Close (B)

4.3 ใช้ Count Pixels Module นับจำนวนพิกเซล โดยกำหนดพื้นที่ตรวจสอบที่ด้านล่างของขวดต่ำจากฉลากลงมาจนถึงก้นขวด โดยมีเงื่อนไขหากนับจำนวนพิกเซลสีขาวอยู่ระหว่าง 140,000 ถึง 220,000 พิกเซล โดยค่าดังกล่าวได้จากการทดสอบขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกปลอมกับไม่มีสิ่งแปลกปลอมและส่งค่าไปบันทึกที่ loop ถัดไป 5. Count pass loop สำหรับนับจำนวนของขวดแก้วที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมโดยใช้ Calculator setup module เพื่อนับจำนวน และ Set Variable module เพื่อบันทึกค่า โดยเมื่อผ่านตอนดังกล่าวจะกลับไปเริ่มต้นที่ Check product loop

วิธีการทดลอง

รวบรวมขวดแก้วที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมและมีสิ่งแปลกปลอม โดยขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกปลอมจัดทำโดยใส่วัตถุลงไปในขวด โดยเป็นวัตถุที่พบได้บ่อยและไม่สามารถล้างด้วยเครื่องล้างขวดได้แก่ หน้ากากอนามัย, ฝาจีบ, ซองขนมพลาสติกทึบ, ก้นกรองบุหรี่, กระดาษชำระ ตาม Fig. 5 ทดสอบอัลกอริทึมโดยนำขวดแก้วที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมและมีสิ่งแปลกปลอมลำเลียงบนสายพานและบันทึกการทดลอง รวมถึงคำนวณหาประสิทธิภาพของอัลกอลิธึม

(A) (B) (C) (D) (E)



Fig. 5 Cigarette butts (A), package (B), Crown cap (C), Mask (D), Paper Napkin (E)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการสร้างและออกแบบอัลกอลิธึมโดยใช้เทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักร โดยรับภาพจากกล้องเว็บแคมเพื่อคัดแยกขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกปลอมที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียง ผลการทดลองการคัดแยกขวดแก้วที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมและมีสิ่งแปลกปลอมที่พบบ่อย ซึ่งสามารถคัดแยกได้ประสิทธิภาพมากกว่า 85% โดยค่าประสิทธิภาพการคัดแยกแต่ละแบบมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่ขนาดของวัตถุแปลกปลอมที่อยู่ในขวด ผลการ

ทดลองแสดงใน Table 1 และ Fig. 6 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวัตถุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถคัดแยกได้มีประสิทธิภาพกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็ก

Table 1 Results of detecting foreign objects in glass bottle

Data		Configure		Result		accuracy (%)
		Clean bottle	bottle with foreign objects	Clean bottle	bottle with foreign objects	
Clean bottle		50	-	50	-	100
bottle with foreign objects		-	50	3	47	94
Clean bottle and bottle with foreign objects		10	40	8	42	96
bottle with foreign objects	Paper Napkin	25	25	20	30	90
	package	25	25	25	25	100
	Mask	25	25	25	25	100
	Cigarette butts	25	25	32	18	86
	Crown cap	25	25	29	21	92

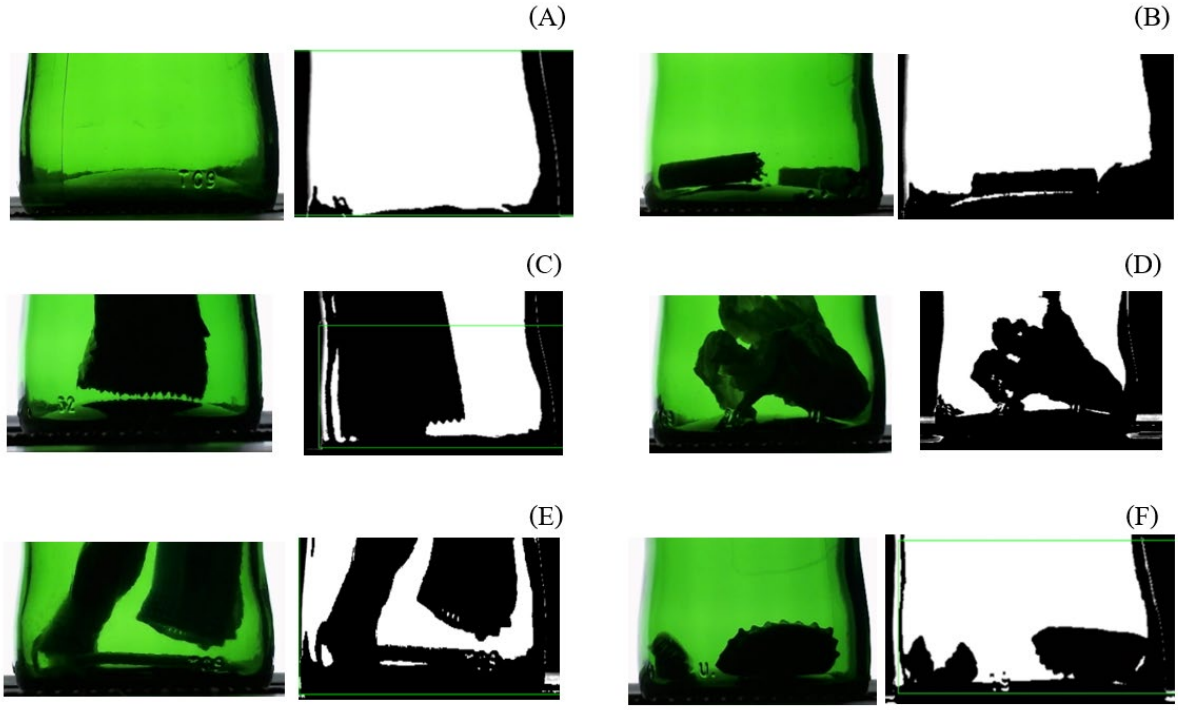


Fig. 6 Before and After used algorithm Clean bottle (A), Cigarette butts (B), package (C), Paper Napkin (D), Mask (E) and Crown cap (F)

สรุป

การใช้กล้องเว็บแคมร่วมกับเทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักรออกแบบอัลกอลิธึมผ่านโปรแกรม NI Vision Builder 2015 สามารถคัดแยกขวดแก้วที่มีสิ่งแปลกปลอมและไม่มีสิ่งแปลกปลอมได้ โดยมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 93.60% คำนวณจากค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพจากการทดลองคัดแยกขวดแก้วที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมและมีสิ่งแปลกปลอมได้แก่ หน้ากากอนามัย, ฝาจีบ, ซองขนมพลาสติกทึบ, ก้นกรองบุหรี่, กระดาษชำระ

กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอบคุณความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ เพื่อนำมาปรับใช้ให้งานสำเร็จ ขอขอบคุณภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับสถานที่ในการดำเนินการงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับการให้คำแนะนำการดำเนินการงานวิจัยและการจัดทำเอกสาร

เอกสารอ้างอิง

ภานุวัฒน์ เมฆะ. 2558. การใช้งานแมชชีนวิชั่น สำหรับการตรวจสอบแบบอัตโนมัติ. https://erp.mju.ac.th/acticle Detail.aspx?qid=445, 13 กุมภาพันธ์ 2564.

Arsalan, M., Aziz, A. 2012. Low-Cost machine vision system for dimension measurement of fast moving conveyor products. In: 2012 International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST). Lahore, Pakistan.

Jerome, J. 2010. Virtual instrumentation using lab view. In: Ghosh, A.K. (Ed.). Imaq vision. PHI Learning Private Limited. New Delhi, India, pp. 296–297.

Novini, A. 1993. Fundamentals of machine vision lighting. In: Proceedings of WESCON '93. San Francisco, USA.

Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R. 2013. Image processing, analysis, and machine vision, 4th ed. Segmentation, I. and Anderson, T.L. USA, pp. 178–186.

Zhang. D. 2009. Extended closing operation in morphology and its application in image processing. In: 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science. Kiev, Ukraine.

การติดตามและการหยิบวัตถุที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงด้วยระบบกล้องบนแขนหุ่นยนต์

Tracking and picking of moving objects on conveyor belt with eye-in-hand manipulator system

ประภัทร์ ตรีเอนกพินิจ*, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย

Prapat Trianakpinit*, Withit Chatlatanagulchai

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: prapat.t@ku.th

บทคัดย่อ

ระบบหุ่นยนต์หยิบชิ้นงานบนสายพานลำเลียงในขณะที่สิ่งของเคลื่อนที่ ปกติจะใช้การทำงานระหว่างกล้องร่วมกับเซนเซอร์อ่านระยะทางของสายพาน (Encoder) เมื่อกล้องถ่ายภาพระบุตำแหน่งแล้ว หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งโดยทำงานร่วมกับระยะทางที่ได้จากเซนเซอร์ ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้พื้นที่ในส่วนที่ติดตั้งตัวกล้องและในขณะที่ระยะทางมากขึ้นอาจทำให้ชิ้นงานเคลื่อนผิดพลาดไปจึงต้องการทำระบบที่ทำให้ระยะทางสั้นและอุปกรณ์ที่ใช้น้อยลง

โดยการทดลองจะจับภาพวัตถุเคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงด้วยกล้องที่ติดตั้งบนแขนหุ่นยนต์ เพื่อทำการค้นหาตำแหน่งเซนทรอยด์ของวัตถุและทำการคำนวณหาความเร็วของวัตถุเพื่อทำการคำนวณหาความเร็วที่ใช้สั่งหุ่นยนต์ทำการหยิบชิ้นงาน โดยทำการทดลองที่ความเร็วของสายพานลำเลียงและมุมของวัตถุที่แตกต่างกัน

จากการทดลองระบบการติดตามและการหยิบวัตถุที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงด้วยกล้องบนแขนหุ่นยนต์สามารถแก้ปัญหาในเรื่องของพื้นที่ในการทำงานและจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ลงได้ แต่อย่างไรก็ตามความถูกต้องและประสิทธิภาพของการทำงาน ยังไม่เป็นที่น่าพอใจมากนัก เนื่องจากปัญหาที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอกของหุ่นยนต์

คำสำคัญ: กล้องบนแขนหุ่นยนต์, การมองเห็นของเครื่องจักร, สายพานลำเลียง

Abstract

The robotic handling system for pick and place parts on a conveyor belt while the parts moving, usually cooperate between camera and sensor for read the distance of the belt (Encoder) by the camera take a photo for determines the position then the robot move along the position. This system requires more space for mounted the camera. The distances of conveyer are the factor of the accuracy of pick and place so need to do the shorter distances and less equipment.

The experiment mounted the camera on the robot arm, the camera will capture objects moving on a conveyor belt to find the centroid position of the object then calculate the velocity of the object to calculate the speed that will order the robot to pick the object. We test by set at the different speed of conveyor belt and use various of the object angles.

The result of the experiment the system by tracking the test, the picking part on the conveyor with camera mounted on the robot arm can solved the problem of working space and reduce the number of equipment usage. However, the accuracy and efficiency of the work still not very satisfactory due to the problems from the external environment of the robot.

Keywords: conveyor belt, Eye-in-hand, machine vision

คำนำ

ปัจจุบันนี้ในอุตสากรรมการผลิตได้มีการใช้หุ่นยนต์ที่ช่วยในการลดแรงงานมนุษย์ หุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้นจะถูกออกแบบมาให้กับการทำงานที่ซ้ำ ๆ กันได้อย่างถูกต้อง ในขอบเขตการทำงานที่ถูกควบคุม ตามโปรแกรมที่ได้ตั้งไว้

การหยิบวัตถุในอุตสหกรรมการผลิตจะใช้การทำงานระหว่างกล้องร่วมกับเซนเซอร์เพื่ออ่านระยะทางของสายพาน (Encoder) และเพื่อหาจุดศูนย์กลาง (Centroid) ที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงในการวัดระยะทางและการคำนวณตำแหน่งในการหยิบวัตถุของแขนกล(Manipulator)ซึ่งข้อดีของงานนี้คือใช้ระยะทางในการหยิบชิ้นงานบนสายพานลดลงแต่ประสิทธิภาพในการทำงานยังคงเดิมทำให้สามารถประหยัดพื้นที่ในการทำงานของหุ่นยนต์มากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ (Computer) กล้องวีดีโอ (Camera) สายพานลำเลียง (Conveyor) แขนกล (Manipulator) เครื่องมือ (Tool) และชิ้นงาน (Parts) ดัง Fig. 1. และแผนพังการทำงานดังแสดงตาม Fig. 2

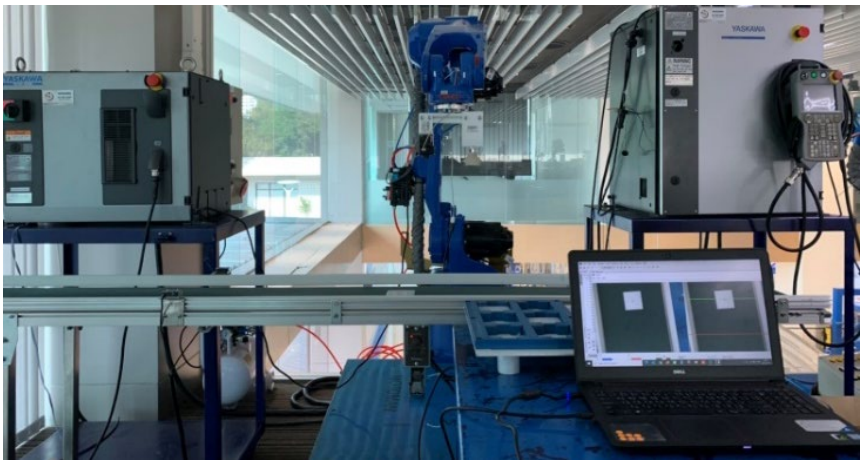


Fig. 1 Experiment equipment

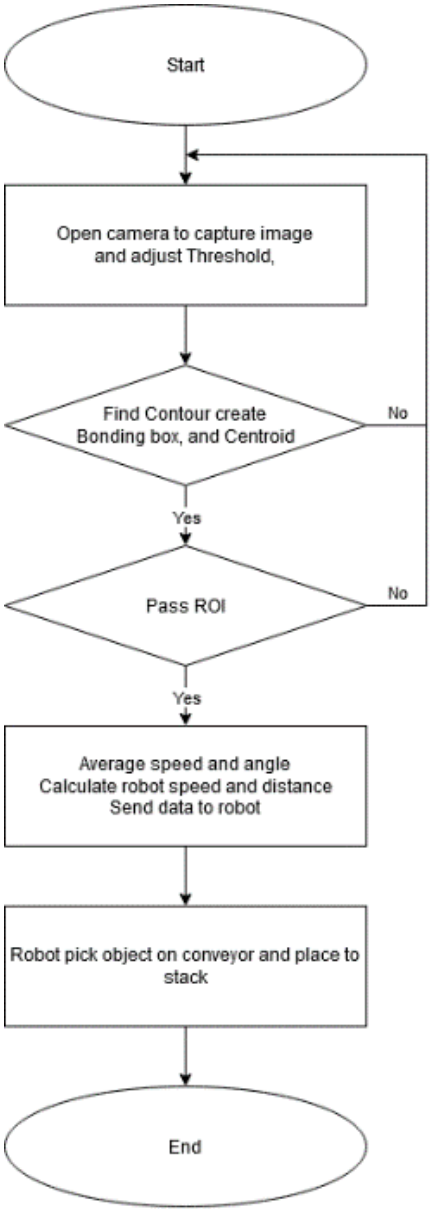


Fig. 2 Flow diagram of tracking and picking of moving objects on conveyor belt with Eye-in-Hand manipulator system

การระบุตำแหน่งของวัตถุด้วยด้วยภาพ

ในการวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการแปลงภาพให้เป็นภาพไบนารี่โดยใช้ฟังก์ชั่นของ (Opencv, 2019) OpenCV ทำการปรับค่าเทรสโฮลด์ (Threshold) เพื่อค้นหาสีของวัตถุที่ต้องการ แล้วทำการแบ่งพื้นที่โดยการหาเส้นขอบเขตของวัตถุ (Contour image) ทำการวาดสี่เหลี่ยมในการปิดล้อมวัตถุ (Bounding box) หลังจากนั้นสามารถหา (Open CV, 2015) จุดศูนย์กลางของวัตถุ (Centroid) โดยใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของความเข้มของพิกเซลของภาพ (Image moment) เพื่อใช้จุดศูนย์กลางนั้นเป็นจุดอ้างอิงในการวัดระยะทางและคำนวณหาตำแหน่งหยิบวัตถุต่อไปซึ่งได้ผลดัง Fig. 3.

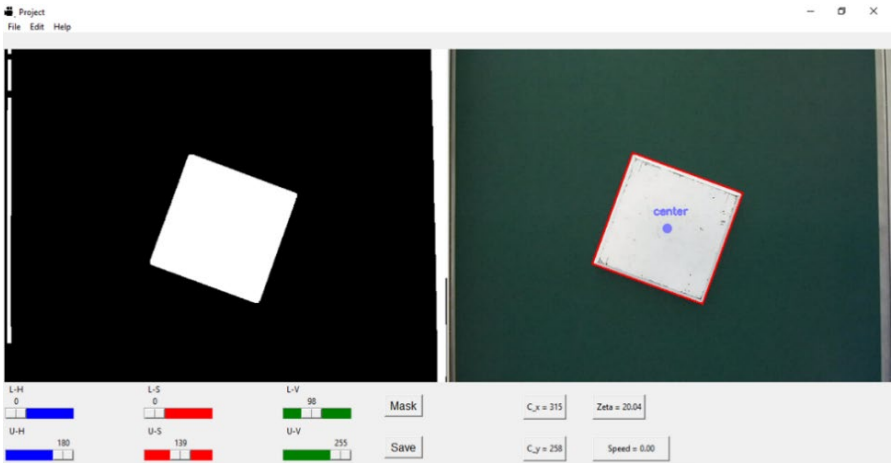


Fig. 3 Left is mask image after adjust threshold, Right is image bounding box and centroid position

การเทียบระยะทางระหว่างกล้องกับแขนกล

(Rosebrock, 2019) ใช้วิธีการถ่ายภาพหาตำแหน่งเปรียบเทียบกับระยะทางจริงกับจำนวนของพิกเซลในภาพเพื่อหาความเร็วของรถที่เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในขอบเขตที่กำหนดไว้ได้ การทดลองนี้จึงทำการบันทึกตำแหน่งแขนกลที่ถ่ายภาพในขณะนั้นไว้และทำการขยับแขนกลไปยังตำแหน่งอื่นเพื่อทำการถ่ายภาพ แล้วทำการคำนวณหาระยะพิกเซลที่เปลี่ยนไปเทียบกับระยะทางของแขนกลที่ขยับไปจะได้อัตราส่วนของระยะทางของแขนกลเทียบกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่กล้องตรวจจับได้

การคำนวณหามุมและความเร็วของวัตถุจากภาพ

(Abecassis, 2011) การหามุมเอียงของวัตถุสามารถทำได้โดยนำสี่เหลี่ยมในการปิดล้อมวัตถุ (Bounding Box) ซึ่งแต่ละมุมจะมีตำแหน่งของเส้นปิดล้อมทำให้สามารถนำมาคำนวณหามุมของชิ้นงาน โดยใช้ตำแหน่งของมุมทางด้านแกน X และแกน Y โดยคำนวณหามุมได้จาก Equation 1

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1)$$

ซึ่งได้ผลการอ่านค่ามุมของวัตถุจาก bonding box ที่ 10–40 องศา ดังแสดงตาม Fig. 4

(A) (B) (C) (D)

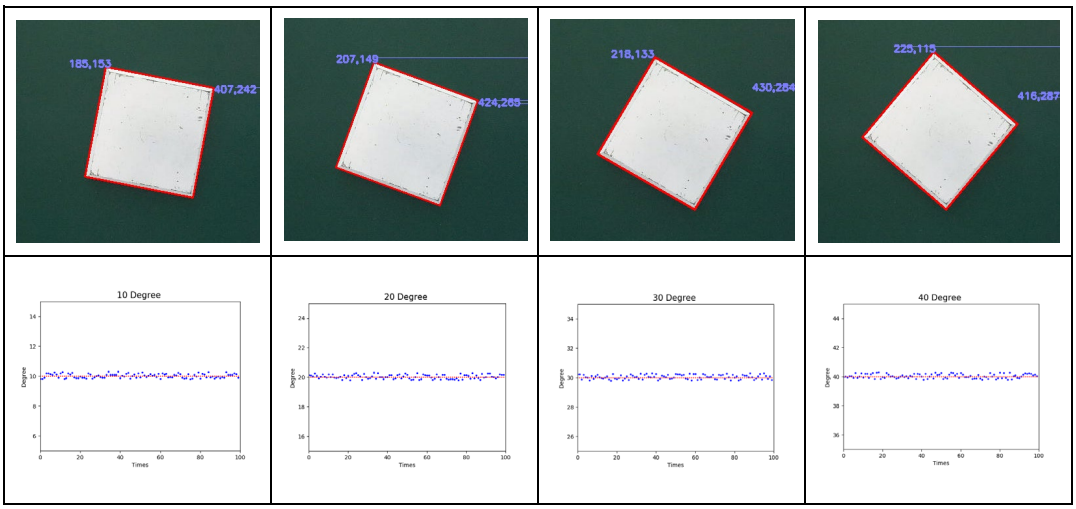


Fig. 4 Angle of object calculated from bounding box at 10-degree (A), 20-degree (B), 30-degree (C), 40-degree (D)

ทำการปรับความเร็วของสายพานลำเลียงที่ระดับคามเร็ว 10 – 40 เซ็นติเมตรต่อนาที (Temiz et al. 2012) แล้วทำการคำนวณหาความเร็วของชิ้นงาน V_c โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ บนสมมุติฐานว่าการเคลื่อนที่เกิดขึ้นเฉพาะทิศทาง x, y และไม่เกิดการเคลื่อนที่ในแกน z และแกนหมุนของชิ้นงาน ω จะสามารถเขียนสมการความเร็วของชิ้นงานออกมาได้ดัง Equation 2 นี้

$$V_c = \begin{Bmatrix} V_{cx} \\ V_{cy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \end{Bmatrix}^{-1} \tag{2}$$

โดยที่

V_c คือ ความเร็วของชิ้นงาน

S_x คือระยะทางที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X จากจุด A ไปยังจุด B

S_y คือระยะทางที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Y จากจุด A ไปยังจุด B

$t_x = t_y$ คือเวลาที่ชิ้นงานเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B

ภาพแสดงตำแหน่งต่างๆ ในการคำนวณหาความเร็วของวัตถุ ดังแสดงตาม Fig. 5

(A) (B)

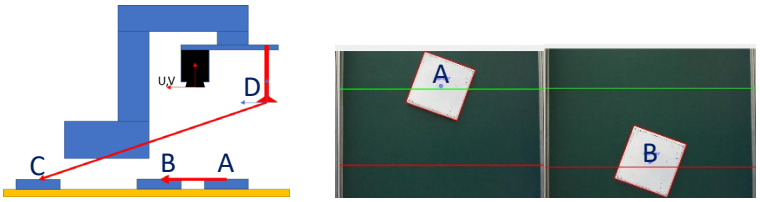


Fig. 5 Position for calculate velocity of object (A), *Region of Interest* for calculate velocity from A to B (B)

การหาความเร็วในการหยิบชิ้นงานของแขนกล V_r ที่จุดหยิบชิ้นงานในตำแหน่ง C โดยการกำหนดระยะทางจากจุด B ไปยังจุด C (S_c) เทียบกับระยะทางของแขนกลที่เคลื่อนที่จากจุด D ไปยังจุด C จะได้ดัง Equation 3

$$V_r = \begin{Bmatrix} V_{rx} \\ V_{ry} \\ V_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{DCx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{DCy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{DCz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_Z \end{Bmatrix}^{-1} \tag{3}$$

และ ความเร็วของชิ้นงานจากจุด B ไปยังจุด D ได้จาก Equation 4

$$V_{BC} = \begin{Bmatrix} V_{BCx} \\ V_{BCy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{BCx} & 0 \\ 0 & S_{BCy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \end{Bmatrix}^{-1} \tag{4}$$

เมื่อเวลา t ของทั้งสองสมการมีค่าเท่ากันในตำแหน่ง D จะได้ดัง Equation 5

$$V_r = \begin{Bmatrix} V_{rx} \\ V_{ry} \\ V_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{DCx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{DCy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{DCz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{BCx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{BCy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{BCz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} V_{BCx} \\ V_{BCy} \\ V_{BCz} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

ซึ่งได้ผลการวัดความของวัตถุจากจุดศูนย์กลางที่ความเร็ว 10–40 เซนติเมตรต่อนาที ดังแสดงตาม Fig. 6

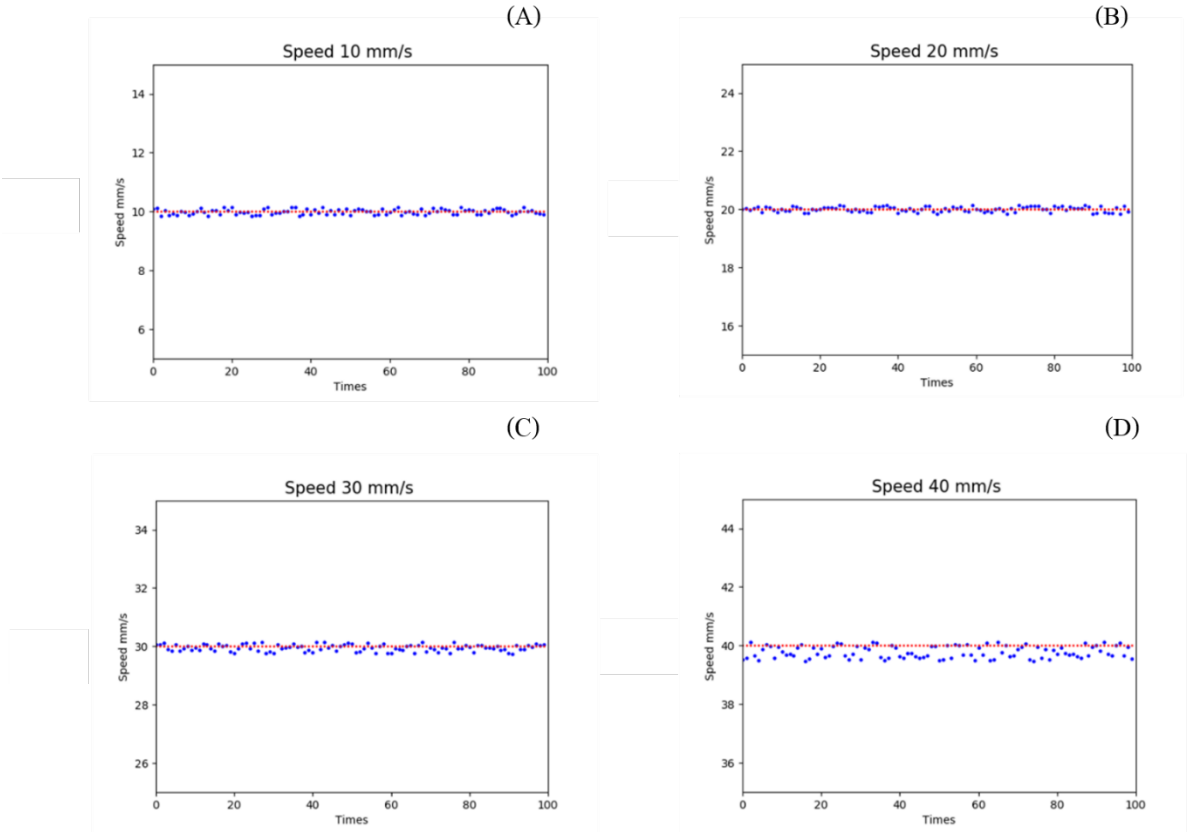


Fig. 6 Result of measuring the speed of the object at 10 cm/min(A), 20 cm/min(B), 30 cm/min(C), 40 cm/min(D).

การส่งข้อมูลไปให้แขนกล

Yaskawa (2016) แขนกลอุตสาหกรรมของ Yaskawa สามารถรับคำสั่งผ่านระบบแลนโดยสามารถส่งข้อมูลให้แขนกลโดยใช้การติดต่อสื่อสารผ่านระบบ TCP เพื่อทำการควบคุมแขนกลได้ทั้งตำแหน่งและอินพุทเอ้าพุท จึงใช้วิธีการนี้ส่งข้อมูลของความเร็วและตำแหน่งที่ทำการคำนวณไปยังแขนกลเพื่อให้แขนกลทำการหยิบชิ้นงานที่ตัวกล้องระบุตำแหน่งให้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองวัดมุมของชิ้นงานด้วยกล้องจากการนำสี่เหลี่ยมในการปิดล้อมวัตถุมาทำการคำนวณหามุมของวัตถุที่มุมเอียง 0–40 องศาพบว่ามีความผิดพลาดต่ำมากดังแสดงผลการทดลองใน Table 1

Table 1 Experiment for measuring the angle of object with a camera

Workpiece Angle(Degree)	Average	% error
0	0.0231	0.21
10	10.0349	0.35
20	20.0429	0.21
30	30.0603	0.20
40	40.0462	0.12

ผลการทดลองวัดความเร็วชิ้นงานด้วยกล้องจากการใช้จุดศูนย์กลางวัตถุมาทำการคำนวณหาความเร็ว 0–40 เซ็นติเมตรต่อนาทีเทียบกับความเร็วที่อ่านได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ พบว่าที่ความเร็ว 0–30 เซนติเมตรต่อนาทีมีความผิดพลาดต่ำมาก ดังแสดงผลการทดลองใน Table 2

Table 2 Experiment for measuring the object speed with a camera

Workpiece Speed (cm/min)	Average	% error
10	9.9955	0.05
20	20.0097	0.05
30	29.9557	0.15
40	39.7824	0.54

ผลการทดลองวัดมุมของชิ้นงานด้วยกล้องเปรียบเทียบกับความเร็วของวัตถุที่ความเร็ว 0–40 เซนติเมตรต่อนาที พบว่าที่ความเร็ว 0 – 30 เซนติเมตรต่อนาที มีความผิดพลาดต่ำมาก ดังแสดงผลการทดลองใน Table 3

Table 3 Experiment for measuring the angle of workpiece at various conveyor belt speeds (% accuracy)

Workpiece Angle (Degree)	Conveyor speed (cm/min)				Accuracy (%)
	10	20	30	40	
0	0	0	0.05	0.05	99.98
10	10	10	10	10.05	99.88
20	20	20	20.05	20.06	99.86
30	30	30.15	30.28	30.57	99.17
40	40.25	40.45	40.57	40.88	98.66

ผลการทดลองใช้แขนกลหยิบชิ้นงานที่มุม 0–40 องศาและความเร็ววัตถุที่ความเร็ว 0–40 เซ็นติเมตรต่อนาที พบว่าที่ที่มความเร็ว 0–30 เซ็นติเมตรต่อนาที มีความแม่นยำประมาณ 98.65% ดังแสดงผลการทดลองใน Table 4

Table 4 Experiment with the mechanical arm to lift the workpiece at different angles and speeds (% accuracy)

Workpiece Angle (Degree)	Conveyor speed (cm/min)				Accuracy (%)
	10	20	30	40	
0	99.00	98.90	98.90	98.80	98.90
10	98.80	98.80	98.80	98.80	98.80
20	98.70	98.60	98.60	98.50	98.60
30	98.50	98.40	98.40	97.30	98.15
40	98.50	98.50	98.30	95.10	97.60
Accuracy (%)	98.70	98.64	98.60	97.70	

สรุป

จากการทดลองการติดตามและการหยิบวัตถุที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงด้วยระบบกล้องบนแขนหุ่นยนต์จะพบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงมีผลต่อความแม่นยำในการติดตามและหยิบวัตถุของแขนกล

จะกล่าวได้ว่าเมื่อความเร็วของชิ้นงานที่มากขึ้น จะทำให้ความแม่นยำในการติดตามและหยิบวัตถุของแขนกลลดลง ดังนั้นจากการทดลองนี้จะพบว่าความเร็วของสายพานที่เหมาะสมควรจะอยู่ที่ไม่เกิน 30 cm/min ที่ความแม่นยำเฉลี่ย 98.80% เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำให้กับแขนกล และจากการทดลองการลดอุปกรณ์ในการทำงานของระบบ ทำให้ทราบว่าระบบสามารถทำงานในพื้นที่น้อยลงได้และสามารถลดเปอร์เซ็นความผิดพลาดในการทำงานของเครื่องลงได้

กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอบคุณความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ เพื่อนำมาปรับใช้ให้งานงานสำเร็จ ขอขอบคุณภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับสถานที่ในการดำเนินการงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยสำหรับการให้คำแนะนำการดำเนินการงานวิจัยและการจัดทำเอกสาร

ขอขอบคุณ พ่อแม่ และญาติพี่น้องทุกคนที่ช่วยเหลือสนับสนุนทั้งด้านกำลังใจและกำลังทรัพย์ด้วยดีตลอดมา นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลืออีกหลายท่าน ซึ่งผู้เขียนไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ได้หมด จึงขอขอบคุณทุกท่านเหล่านั้นไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

Rosebrock. A. 2019. Open CV Vehicle Detection, Tracking, and Speed Estimation. https://www.pyimagesearch.com/2019/12/02/opencv-vehicle-detection-tracking-and-speed-estimation/, 2 December 2019.

Abecassis, F. 2011. OpenCV - Bounding Box & Skew Angle. https://felix.abecassis.me/2011/10/opencv-bounding-box-skew-angle/, 1 October 2011.

Temiz, M.S., Dogan, S. 2012. Real time speed estimation from monocular video. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences 39: 427–432.

Open CV. 2015. Contour Features.https://docs.opencv.org/3.1.0/dd/d49/tutorial_py_contour_features.html, 18 December 2015.

Opencv. 2019. Basic Thresholding Operations. https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/threshold/threshold.html#threshold-binary/, 31 December 2019.

Yaskawa. 2016. User manual for new language environment MotoPlus. Yaskawa electric corporation. Japan 2016.

การตรวจจับและการรู้จำอักขระด้วยแสงของป้ายรถบรรทุกชิ้นงานด้วยการเรียนรู้เชิงลึก

Detection and optical character recognition of the workpiece cart label with deep learning

ชัยชนะ สระโสม*, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย

Chaichana Srasom*, Withit Chatlatanagulchai

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการตรวจจับและการรู้จำอักขระด้วยแสง ถูกนำมาใช้อย่างมากในทางการค้าและเชิงวิชาการของการตรวจจับป้ายทะเบียนรถ แต่ในด้านคลังสินค้ายังไม่เป็นที่นิยมเท่ากับการตรวจจับป้ายทะเบียนรถเนื่องจากลักษณะของภาพข้อมูลของคลังสินค้ายังมีความยากของการรู้จำอักขระด้วยแสง

ระบบการตรวจจับและการรู้จำด้วยแสงของป้ายบรรทุกชิ้นงานด้วยการเรียนรู้เชิง เพื่อแก้ปัญหาของการตรวจจับของป้ายรถบรรทุกชิ้นงาน ด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึกด้านของการตรวจจับวัตถุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาตำแหน่งของป้ายชิ้นงานและทำการปรับปรุงภาพที่บิดเบี้ยวด้วยวิธีของภาพเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงในของการอ่านอักขระด้วยแสงผลทดสอบการตรวจจับและการรู้จำอักขระด้วยแสงด้วยการเรียนรู้เชิงลึก สามารถใช้การอ่านป้ายและการหาตำแหน่งของรถบรรทุกชิ้นงาน แต่ก็มีข้อเสียที่จะต้องสร้างต้นแบบของป้ายสินค้าขึ้นใหม่โดยใช้การบันทึกเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: การตรวจจับวัตถุ, การปรับปรุงภาพบิดเบี้ยว, การรู้จำอักขระ, ระบบประสาทเทียม

Abstract

At moment Object detection and Optical Character Recognition was used in commercial and academic method for Automatic License Plate Recognition (ALPR) but warehouse not as popular as ALPR because photo of cart label does not have standard like license plate and problem about label ex. Picture burr, label does not balance etc.

Experimental system Detection and Optical Character Recognition of the Workpiece Cart Label with Deep Learningfor solve the problem detect label cart by method Convolution Neural Network for detect position of label cart and rectifying multiple distorted images, are fed to an Optical Character Recognition. System test result Detection and Optical Character Recognition of the Workpiece Cart Label with Deep Learning can read data from label, find position but this system should use same pattern with train data for get result high performance.

Keywords: convolution neural network, object detection, optical character recognition, rectifying image

คำนำ

ในปัจจุบันความรู้ในด้านการคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) คือศาสตร์หนึ่งที่มีการพัฒนาอย่างมากและมันเป็นศาสตร์ที่จะเปลี่ยนวิถีชีวิตของคุณไปตลอด คอมพิวเตอร์วิทัศน์ จะมีหลักการที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นของมนุษย์แต่ใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ผ่านระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ซึ่งสาขาหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันคือ การตรวจจับ (Object Detection) (Alhussein et al., 2019) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในการตรวจจับป้ายทะเบียนรถ แต่การนำมาใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมค่อนข้างน้อยในการจัดการคลังสินค้า โดยเฉพาะกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง เนื่องด้วยใช้งบประมาณในการลงทุนที่สูง ทางผู้ทดลองจึงจัดทำระบบการบันทึกการเข้าของคลังสินค้าในงบประมาณที่ต่ำโดยใช้กล้องเว็บแคมที่มีราคาถูกเพื่อลดต้นทุนในการทำระบบลง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer) กล้องวีดีโอ (Web Camera) กล้องมือถือ (Phone Camera) รถบรรทุกชิ้นงาน (Cart) ป้ายบอกชนิดของงาน (Tag) และ ป้ายทะเบียนรถบรรทุกชิ้นงาน (Label)



Fig. 1 A8 and A9 are Label on front of cart A14 and A15 are Label on Top of cart

วิธีทดลอง

การทดลองระบบตรวจจับป้ายและการรู้จำด้วยแสงของป้ายทะเบียนของรถขนบรรทุกชิ้นงานภายในคลังสินค้าโดยกระบวนการทดลองจะมีการติดป้ายทะเบียนของรถไว้ที่ด้านหน้าและด้านบนของรถ โดยจะใช้ด้านหน้าในการบันทึกเข้าส่วนด้านบนไว้สำหรับการยืนยันความถูกต้องของป้ายด้านหน้า

1.การตรวจจับป้ายทะเบียนรถบรรทุกชิ้นงาน (Object Detect Label)

การตรวจจับป้ายทะเบียนรถบรรทุกชิ้นงาน ในครั้งนี้ เลือกที่ใช้วิธีตรวจจับวัตถุ (Object Detection) เนื่องด้วยวิธีการนี้(Arthur Ouaknine, Review of Deep Learning Algorithms for Object Detection,) สามารถบอกตำแหน่งของวัตถุที่ถูกตรวจจับและยังสามารถตรวจจับวัตถุที่มีหลายชิ้นในภาพเดียวได้ ซึ่งจะผู้ทดลองสามารถใช้ตำแหน่งในการปรับปรุงภาพเพื่อใช้ในการอ่านตัวหนังสือบนภาพได้

1.1 การบอกตำแหน่งของชิ้นงาน (Annotation)

การบอกตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการ ตรวจจับวัตถุ (Object Detection) เพื่อใช้ในการฝึกสอน (Train model) ทางผู้วิจัยได้ทำการเลือก(DARRENL, DEC-18)โปรแกรม labelling ที่ถูกเขียนด้วยภาษาไพทอน (Python Programming Language) โดยโปรแกรมเป็น Free software: MIT license (Alexey Bochkovskiy, Chien-Yao Wang, Hong-Yuan Mark Liao,2020)การบอกตำแหน่งของวัตถุในการตรวจจับต้องเป็นตามรูปแบบของ YOLO Format ซึ่งอยู่ในรูป <Object-Class> <x_center> <y_center> <width> <height>

1.2 การเพิ่มจำนวนข้อมูลภาพหรือการเพิ่มจำนวนรูป

1.2.1 การเพิ่มหรือลดความสว่างรูปภาพโดยการสุ่ม (Random brightness)

การเพิ่มหรือลดความสว่างของรูปภาพ คือการเพิ่มหรือลดค่าความอิ่มตัว (Saturation) ของสีในระบบสี HSV (Hue Saturation Value) โดยเริ่มจากการแปลงสีของรูปในระบบสี RGB (Red Green Blue) เป็นระบบสี HSV หลังจากนั้นทำการสุ่มตัวเลขที่อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 1 เพื่อนำเอาไปเป็นตัวคูณของความอิ่มตัวของสี (Saturation)

1.2.2 การเพิ่มกรอบให้รูปภาพ

การเพิ่มกรอบให้รูปภาพเป็นการเพิ่มสิ่งแวดล้อมภายนอกในรูปมากขึ้นเพื่อทำให้คอมพิวเตอร์มองว่าเป็นรูปภาพที่ต่างจากเดิมโดยเป็นการใช้เครื่องมือของ OPENCV (OpenCV Dev team ,2019, Adding borders to your images)ในการทำกรอบ โดยกรอบที่นำมาใช้ประกอบด้วย

cv2.BORDER_REPLICATE cv2.BORDER_REFLECT cv2.BORDER_REFLECT_101

cv2.BORDER_WRAP cv2.BORDER_CONSTANT

1.3 การสอน (Train model)

การสอนโมเดลการตรวจจับวัตถุ (Train model Object detection) ผู้ทำการทดลองได้เลือก Model Yolov4 เพื่อทำการตรวจจับวัตถุประสิทธิภาพของ Graphics Processing Units (GPU is RTX 2070 Supper) ของอุปกรณ์สามารถทำการตรวจจับวัตถุได้ในช่วงเวลาการทำงานจริง(Real Time) (30 FPS) และ มีค่า AP และ AP50 ที่สูงกว่า Model โดยมีการเทียบตาม Fig. 2

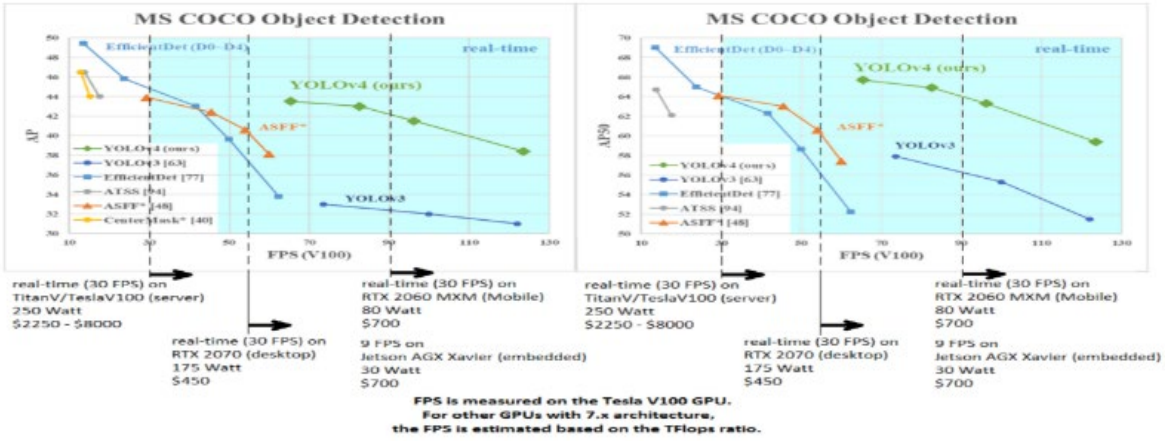


Fig. 2 Comparison of the proposed YOLOv4 and other state-of-the-art object detectors. YOLOv4 runs twice faster than EfficientDet with comparable performance. Improves YOLOv3's AP and FPS by 10% and 12%, respectively (Alexey Bochkovskiy, Chien-Yao Wang, Hong-Yuan Mark Liao, 2020)

2.1 การตัดรูปในส่วนที่ต้องการ

โดยตัวแปรส่วนหนึ่งที่เกี่ยวกับตำแหน่งของวัตถุที่เราตรวจจับได้คือ ตำแหน่งในแนวแกนนอน ตำแหน่งในแนวแกนตั้ง ความกว้างของกรอบสี่หลี่ยม ความสูงของกรอบสี่หลี่ยม

$$X_{center} = \text{int}\left(X_{centre_{yolo}} \times Width_{picture} \right)$$

$$Y_{center} = \text{int}(Y_{center_yolo} \times Hight_{picture})$$

$$W = \text{int}(w_{yolo} \times Width_{picture}) \qquad H = \text{int}(H_{yolo} \times Hight_{picture})$$

$$x = X_{center} - \frac{W}{2} \quad Y = Y_{center} - \frac{H}{2}$$

หลังจากนั้นตัดวัตถุที่เราสนใจออกมาจากรูปหลักตามสมการนี้

$$Image_{crop} = Image_{main}[X: X + w, Y: Y + H]$$

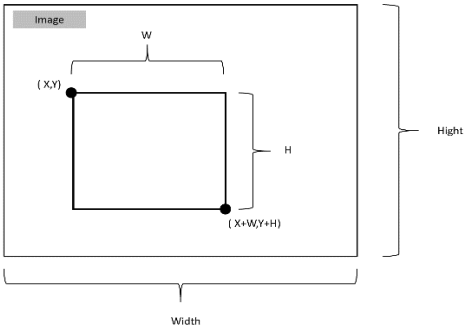


Fig. 3 Method for crop picture after got position for yolo model

3. การแก้ไขการบิดเบี้ยวและความเหมือนของรูปภาพ (Rectification and Homograph of Image)

3.1 หากรอบสี่เหลี่ยมรอบรูป

การหาจุดมุมบนกรอบสี่เหลี่ยมเพื่อจะทำการแก้ความบิดเบี้ยวของตัวป้ายทะเบียนรถบรรทุกชิ้นงาน ด้วยวิธีการแปลงรูปอยู่ในมาตรฐานสีแบบ HSV ซึ่งง่ายต่อการดึงจุดเด่นของสี หลังจากนั้นทำการกำหนดช่วงของค่าในแต่ละค่าของสี HSV เพื่อตัดสีที่อยู่นอกเหนือออก โดยการทดลองนี้ ใช้ช่วง สีสันหรือเฉดสี(Hue) อยู่ที่ 148-174 ค่าความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) อยู่ที่ช่วง 26–255 และ ค่าความสว่าง (Value) อยู่ที่ 92–255 หลังจากนั้น(Satya Mallick)ใช้เทคนิคการประมาณรูปร่าง (Contour Approximation) เพื่อหาจุดบนรูปบนเส้นรอบรูป โดยใช้เครื่องมือใน OpenCV ที่อ้างอิงมาจากขั้นตอนวิธี Douglas-Peucker เพื่อหาเส้นรอบรูปและใช้ cv2.approxPolyDP เพื่อนำจุดบนขอบสี่เหลี่ยมออก

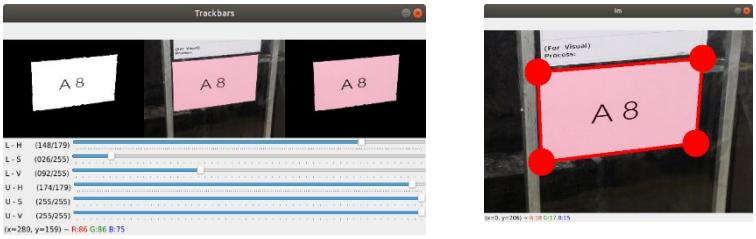


Fig. 4 Find Point of rectangle by OpenCV

3.2 ความเหมือนของรูปภาพ (Homography of Image)

(Satya Mallick) เป็นการใช้จุดทั้งสี่ที่ได้จากการทำการประมาณรูปร่าง (Contour) เพื่อทำขั้นตอนความเหมือนของรูปภาพ (Homography Image) เพื่อลดความบิดเบี้ยวของรูปภาพ (Rectification) โดยเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ 3×3ซึ่งจะเขียนในรูปของสมการของจุด A ได้ดังสมการนี้

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ 1 \end{bmatrix} = H_{3\times3} \begin{bmatrix} x'_A \\ y'_A \\ 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่การทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องมือใน OpenCV เพื่อช่วยในการคำนวณความเหมือนของรูปภาพ (Homography) คือ cv2.findHomography เพื่อแปลงภาพตาม Figs. 8 และ 9

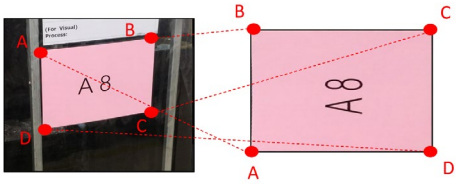


Fig. 5 Top View Homography

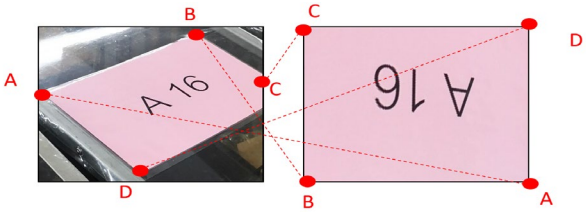


Fig. 6 Front View Homography

4. เพิ่มความหนาของเส้นตัวอักษร (Increase Thickness Character) หรือ การขยายตัว (Dilation)

การเริ่มจากการแปลงจากภาพสีไปเป็นภาพขาวดำ (Gray Scale) เพื่อลดตัวรบกวน (Noise) หลังจากนั้นใช้เคอร์เนล (Kernel) ที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) 3×3 ที่มีสมาชิกในเมทริกซ์ (Matrix) เป็น 0 ทั้งหมดเพื่อทำการลดสีขาวลงโดยใช้เครื่องมือใน (OpenCV Dev team ,2019, Morphological Transformations) OpenCV คือ cv2.erode ช่วยในการคำนวณจากภาพขาวดำที่ถูกเพิ่มความคมชัด (Contrast) ของภาพ กระบวนการทั้งหมดจะทำให้เส้นของตัวอักษรมีความหนามากขึ้นตาม Fig. 10

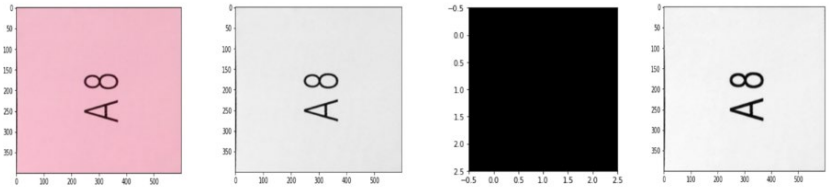


Fig. 7 Dilation Image

5. การหมุนรูป (Rotation Image)

การหามุมของรูปภาพเพื่อทำการหมุนภาพให้อยู่ลักษณะที่ตั้งตรงเพื่อง่ายต่อการอ่านตัวหนังสือเป็นป้ายทะเบียนของรถบรรทุกชิ้นงาน โดยใช้ (OpenCV Dev team ,2019, Template Matching)เครื่องมือต้นแบบการจับคู่ (Template Matching) เพื่อเปรียบเทียบตัวอักษร A ที่อยู่บนรูปภาพ โดยการเลื่อนต้นแบบตัวอักษร (Template A)

เพื่อหาตัวอักษร A ที่มีความใกล้เคียงกับต้นแบบตัวอักษรในภาพที่มีขนาดใหญ่แล้วทำการหมุนตามค่าที่กำหนด ตาม Fig. 12

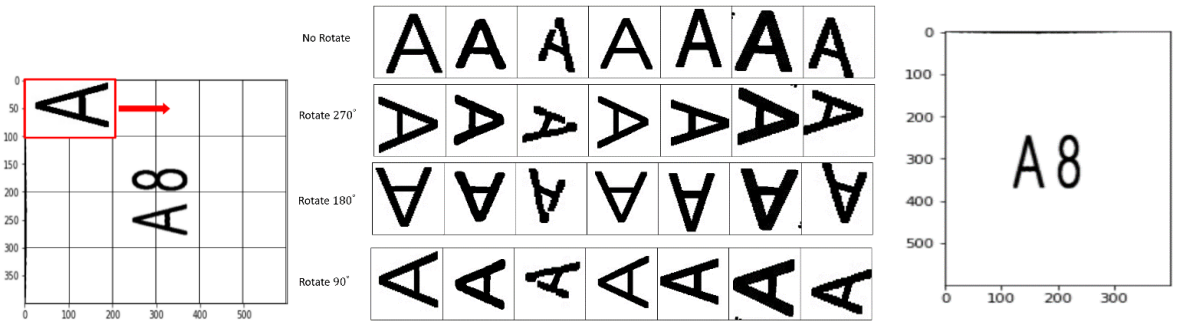


Fig. 8 Template for Rotation

6. การตรวจจับตัวอักษรบนป้ายรถบรรทุกชิ้นงาน (Detect Character of Label)

หลังจากได้รูปที่มีการลดการรบกวนจากสิ่งรบกวนต่างๆ แล้วทำการเอารูปมาดำเนินการตรวจจับวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ (Object Detection) อีกครั้งเพื่อทำการตรวจจับตัวอักษรที่อยู่ใน Fig. 13

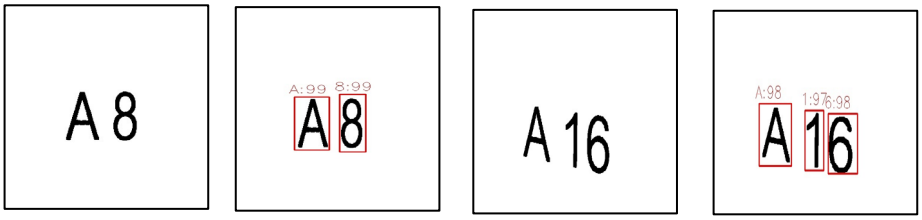


Fig. 9 It shows result detect Character from YOLOV4 A8 from front view and A16 from top view

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการหาเครื่องมือที่มีต้นทุนต่ำเพื่อใช้บันทึก การเข้าออกของรถบรรทุกชิ้นงาน ในระบบคลังสินค้าโดยมองจากด้านหน้า (Front View) และหาตำแหน่งของรถบรรทุกชิ้นงาน จากจากมุมมองด้านบน (Top View) โดยทดลองครั้งนี้ได้ทดสอบผลการทดลองโดยการนำรูปที่ถูกถ่ายด้วยเว็บแคม (Web Camera) มาทำการทดสอบโดยมีจำนวนรูปทั้งหมด 1042 รูป โดยผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 1 ซึ่งในค่าในแต่ ค่าเฉลี่ยการทำนาย (Average Precision) และตัวอักษรให้ค่ามากกว่า 95 % และได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Area Under Curve :AUC) อยู่ที่ 96.69 % ค่าผลเฉลยร้อยละของพื้นที่ทับซ้อน (Average Intersection Over Union) = 83.52 %

Table 1 Result of each character, are A and 0-9, AP is Average precision TP is Ture Position FP is False Position

Character	A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
AP	96.74%	97.34%	97.05%	96.23%	94.33%	98.68%	97.55%	97.08%	95.52%	96.02%	97.10%
TP	1018	106	686	255	115	150	159	133	171	168	134
FP	24	0	0`	0	0	1	1	0	1	1	0

สรุป

การใช้กล้องเว็บแคมใช้ร่วมกับประสาทเทียมและเทคนิคทางคอมพิวเตอร์วิชั่นสามารถช่วยให้อ่านตัวอักษรบนรถบรรทุกชิ้นงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอ้างจากผลการทดลองที่ให้ค่า Average precision มากกว่า 90% และค่าพื้นที่ใต้กราฟ ที่ได้มากถึง 96.69 % โดยอ้างอิงจากบทความของ Brownlee (2020) Satangmongkol (2019) และ Bee (2018) ที่กล่าวเกี่ยวกับค่า เฉลี่ยการทำนาย (Average Precision) และ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ

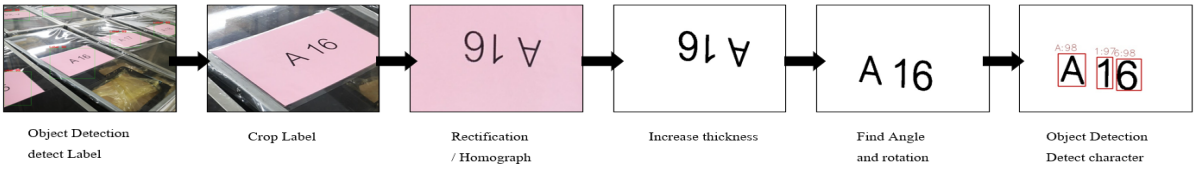


Fig. 10 show method for detection on top view

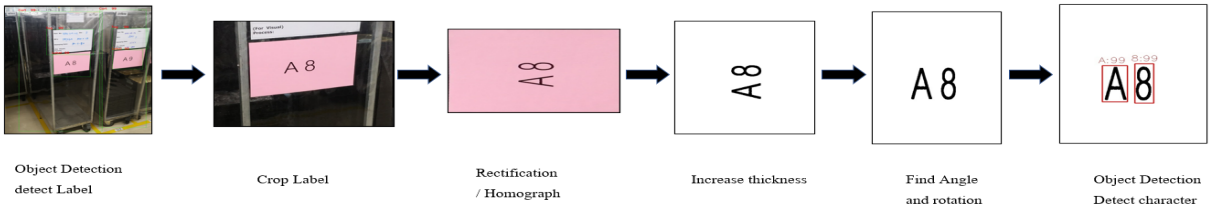


Fig. 3 shows method for detection on front view

(Area Under Curve : AUC)ว่าถ้า เฉลี่ยการทำนาย ใกล้เคียง 1% หรือ 100% เป็นโมเดลที่มีการทำนายที่แม่นยำและมีค่าพื้นที่ใต้กราฟ มากกว่า 90 % เป็น โมเดลที่ทำงานดีมาก

กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ที่ให้การแนะนำและช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนทำให้บทความฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., Mark Liao, H.-Y. 2020, YOLOv4: Speed and Accuracy of Object Detection

Ouaknine, A. 2018. Review of deep learning algorithms for object detection, https://medium.com/zylapp/review-of-deep-learning-algorithms-for-object-detection, 5 February 2018

DARRENL, https://github.com/tzutalin/labelImg, December 2018

Brownlee, J. 2020. Classification Accuracy is not enough: More performance measures you can use, https://machinelearningmastery.com/classification-accuracy-is-not-enough-more-performance-measures-you-can-use, 30 June 2020.

Satangmongkol, K. อธิบาย 10 Metrics พื้นฐานสำหรับวัดผลโมเดล Machine Learning, https://datarockie.com/2019/03/30/top-ten-machine-learning-metrics/, 30 March 2019

Alhussein, M. Aurangzeb, K., Haider, S.I. 2019. Vehicle License Plate Detection and Perspective Rectification, Department of Computer Engineering, College of Computer and Information Sciences, King Saud University

OpenCV Dev team. 2019. Adding borders to your images, https://docs.opencv.org/3.4/dc/da3/tutorial_copyMakeBorder.html

OpenCV Dev team, 2019, Morphological Transformations, https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io /en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_morphological_ops/py_morphological_ops.html

OpenCV Dev team, 2019, Template Matching https://docs.opencv.org/master/d4/dc6/tutorial_py_template_matching.html

OpenCV Dev team, 2019, Contour Features, https://docs.opencv.org/master/dd/d49/tutorial_py_contour_features.html

Mallick, S., Homography Examples using OpenCV (Python / C ++), https://learnopencv.com/homography-examples-using-opencv-python-c/, 3 January 2016.

Bee, P. What is mAP Evaluation?, Tag: average precision, https://medium.com/boobeejung/what-is-map-evaluation-8d^{7}a4adc67da, September 2018.

การประมาณค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท

Estimation of greenhouse gas emissions generated from Phraphutthabat Landfill

อรุณิญา โชคลาภ*, สัญญา สิริวิทยาปกรณ์

Aruniya Chokelap*, Sanya Sirivithayapakorn

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: aruniya.c@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประมาณค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจก (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซมีเทน (CH_4)) ที่เกิดจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท โดยคำนวณจากการเทียบสัดส่วนกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยชุมชนของงานวิจัยอ้างอิงที่มีการรายงานไว้ การคำนวณใช้ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท ตั้งแต่เริ่มดำเนินการถึงปี พ.ศ. 2565 จำนวนทั้งสิ้น 382,626.90 ตัน เพื่อคำนวณปริมาณ CO_2 และ CH_4 ที่เกิดขึ้นเป็นรายปีตั้งแต่ปีพ.ศ. 2560–2670 จากการศึกษาพบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 10,521,180.90 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คิดเป็นค่าเฉลี่ยต่อปีประมาณ 94,785.40 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 9.77 ของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากจัดการขยะมูลฝอยโดยวิธีเทกองและฝังกลบในประเทศไทย และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งอื่น ได้แก่ การผลิตข้าวนาปีจะเท่ากับการผลิตข้าวนาปีประมาณปีละ 120,000 ไร่ (192 ตารางกิโลเมตร) โดยผลการศึกษานี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดแนวทางการชดเชยหรือลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อขยะมูลฝอยชุมชน

คำสำคัญ: การประมาณค่าก๊าซเรือนกระจก, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซมีเทน, ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า, บ่อขยะมูลฝอย

Abstract

This research estimated greenhouse gas (Carbon Dioxide (CO_2) and Methane (CH_4)) emissions that is generated from Phraphutthabat landfill by quantitative comparison with the reported greenhouse gas emissions from municipal waste landfill of a reference study. The calculation was based on the total amount of solid waste of 382,626.90 ton from the beginning of the operation of Phraphutthabat Municipality landfill until 2022. The emissions of CO_2 and CH_4 were calculated annually during 2017 to 2127. It was found that the amount of greenhouse gas emission was 10,521,180.90 tonCO_2eq, which was equal to the annual average emission of 94,785.40 tonCO_2eq. Additionally, the emission of Phraphutthabat landfill is 9.77 percentage of the greenhouse gas emission amount from open dump and landfill in Thailand. To compare with other emission sources, the emission from this study is similar to crop season rice cultivation around 120,000 rai (192 km^2). The result provided fundamental information for planning appropriate measures to compensate or reduce the amount of greenhouse gases from municipal waste landfill.

Keywords: carbon dioxide, estimated greenhouse gas, landfill site, methane, tonco_2eq

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในประเทศไทยถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ ไม่ว่าจะเป็นปัญหาขยะมูลฝอยตกค้างสะสม เนื่องจากการขยายตัวของชุมชนเมือง การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรแฝงจากแรงงานต่างชาติที่เข้ามาทำงาน พฤติกรรมการบริโภคของประชาชนในการสั่งซื้อสินค้า บริการออนไลน์ ทำให้เกิดขยะพลาสติกจำนวนมาก ในปี พ.ศ. 2562 มีอัตราการเกิดขยะมูลฝอยชุมชนเฉลี่ยเท่ากับ 1.18 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2563) ส่งผลให้ปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มจำนวนมากขึ้นทุกวัน แต่การจัดการขยะมูลฝอยในประเทศไทยยังไม่เหมาะสม ทำให้เกิดปัญหามลพิษจากขยะมูลฝอยและเหตุเดือดร้อนรำคาญขึ้น เช่น กลิ่นเหม็นรบกวน หรือเป็นแหล่งพาหะของสัตว์นำโรค รวมถึงปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขยะมูลฝอยที่ไม่ได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธี ซึ่งก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นนี้เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน และเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของโลก ซึ่งก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่เกิดจากขยะมูลฝอย ได้แก่ CO_2 และ CH_4 โดย CH_4 มีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) มากกว่า CO_2 ถึง 25 เท่า (IPCC, 2007) โดยวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทยคือ วิธีการเทกอง (Open dump) และการฝังกลบ (Landfill site)

เทศบาลเมืองพระพุทธบาท เป็นองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นขนาดกลางที่ตั้งอยู่ในจังหวัดสระบุรี ซึ่งมีพื้นที่บ่อขยะมูลฝอยอยู่ในพื้นที่ของตนเอง และประสบกับปัญหาขยะตกค้างสะสมในพื้นที่บ่อขยะมูลฝอยจำนวนมาก โดยบ่อขยะมูลฝอยแห่งนี้มีการจัดการขยะมูลฝอยด้วยวิธีเทกองและการฝังกลบเชิงวิศวกรรม แต่ไม่มีการรวบรวมนำก๊าซที่เกิดจากขยะมูลฝอยไปจัดการอย่างถูกวิธี ทำให้ก๊าซเหล่านั้นลอยสู่ชั้นบรรยากาศเกิดเป็นมลพิษทางอากาศขึ้น และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนโดยรอบบ่อขยะมูลฝอยและพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยแบบฝังกลบ ทำให้เกิด CH_4 มากกว่าการเทกองถึง 10 เท่า การฝังกลบขยะมูลฝอยทำให้เกิด CH_4 ได้ราว 103–366 พันตันต่อปี (เครือข่ายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งประเทศไทย (TCCN), 2562)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ CO_2 และ CH_4 ที่เกิดจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท โดยคำนวณจากการเทียบสัดส่วนกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยชุมชนของงานวิจัยอ้างอิงที่มีการรายงานไว้ เพื่อหาแนวทางในการชดเชยหรือลดก๊าซเรือนกระจกดังกล่าวที่เกิดขึ้นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท ตั้งอยู่ที่ หมู่ 5 ตำบลพระพุทธบาท อำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี มีเนื้อที่ 166 ไร่ 0 งาน 80 ตารางวา เริ่มใช้งานมาตั้งแต่ปี 2535 (ค.ศ. 1992) มีการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีเทกอง (Open dump) และวิธีการฝังกลบเชิงวิศวกรรม (Engineered Landfill) โดยขยะมูลฝอยส่วนใหญ่มีการกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ ในพื้นที่บ่อขยะมูลฝอยแห่งนี้มีบ่อฝังกลบที่ปิดบ่อไปจำนวน 1 บ่อในปีพ.ศ.2560 (ค.ศ. 2017) ซึ่งมีปริมาณขยะมูลฝอย จำนวน 200,000 ตัน ปัจจุบันมีปริมาณขยะมูลฝอยที่เข้าสู่บ่อขยะมูลฝอยแห่งนี้ประมาณ 80 ตัน/วัน มีสมาชิกองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่รวมกลุ่มพื้นที่ในการจัดการขยะมูลฝอย (Clusters) ที่นำขยะมูลฝอยมาทิ้ง ณ ที่นี้ จำนวน 16 แห่ง ได้แก่

1. เทศบาลตำบลหนองแก 2. เทศบาลตำบลนายาว 3. เทศบาลตำบลพุกร่าง
4. เทศบาลตำบลหนองโดน 5. เทศบาลตำบลเสาไห้ 6. เทศบาลตำบลหัวปลวก
7. เทศบาลตำบลต้นตาลพระยาทด 8. เทศบาลตำบลห้วยป่าหวาย 9. องค์การบริหารส่วนตำบลเขาวง
10. องค์การบริหารส่วนตำบลธารเกษม 11. องค์การบริหารส่วนตำบลหนองโน
12. องค์การบริหารส่วนตำบลดาวเรือง 13. องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านกลับ
14. องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านยาง 15. องค์การบริหารส่วนตำบลเริงราง 16. องค์การบริหารส่วนตำบลห้วยบง

การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอย

1. การรวบรวมปริมาณขยะมูลฝอย

รวบรวมข้อมูลปริมาณขยะของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทและกลุ่ม Clusters ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2535-2562 (ค.ศ.1992–2019) จากฐานข้อมูลของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทและสำนักงานส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นจังหวัดสระบุรี ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 270,959.11 ตัน

2. การคำนวณปริมาณขยะมูลฝอยปีพ.ศ. 2563–2565 (ค.ศ. 2020–2022)

การคำนวณปริมาณขยะมูลฝอยในช่วงปี พ.ศ. 2563–2565 (ค.ศ. 2020–2022) เป็นการหาปริมาณขยะมูลฝอยในอนาคตที่จะเกิดขึ้นในบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท เป็นระยะเวลา 3 ปี เนื่องจากในปีพ.ศ. 2565 เทศบาลเมืองพระพุทธบาทจะมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการกำจัดขยะมูลฝอยโดยจะดำเนินโครงการคัดแยกขยะมูลฝอยเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) และนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปริมาณขยะมูลฝอยที่ได้จากการคำนวณนี้จะนำไปประมาณค่าการเกิดก๊าซเรือนกระจก โดยมีวิธีการคำนวณปริมาณขยะมูลฝอย ดังนี้

2.1 คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงประชากรเฉลี่ยขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในกลุ่ม Clusters ในระยะเวลา 20 ปี ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543–2562 (ค.ศ.2000–2019) ตามคู่มือมาตรฐานการวางผังเมือง (กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น, ม.ป.ป.) จากสมการ

อัตราการเปลี่ยนแปลงประชากร (r) $= \frac{1}{n}\left(\frac{P_t-P_0}{P_0}\right)\times 100$ หน่วย : % ต่อปี

โดยที่ r คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงประชากรเฉลี่ยต่อปี n คือ จำนวนปี
P คือ จำนวนประชากร t คือ ปีฐาน

อัตราการเปลี่ยนแปลงประชากรเฉลี่ย $= \frac{r}{n}$ เมื่อ n = *20*

2.2 คำนวณการคาดการณ์ประชากรปีพ.ศ. 2563-2565 (ค.ศ.2020-2022) ตามคู่มือมาตรฐานการวางผังเมือง (กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น, ม.ป.ป.) จากสมการ

การคาดการณ์ประชากร $P_{t+n} = P_t\,(1+r)^n$ หน่วย : คน

2.3 คำนวณการคาดการณ์ปริมาณขยะมูลฝอยของแต่ละองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในกลุ่ม Clusters หน่วย ตันต่อปี (ton/year) ตามคู่มือการกรอกข้อมูลการจัดการขยะมูลฝอยตามแบบ คพ. 1 2 และ3 (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) จากสมการ

ปริมาณขยะมูลฝอยปีที่ t = อัตราการเกิดขยะมูลฝอยของพื้นที่ × จำนวนประชากร × 365 วัน

โดยที่ เทศบาลเมือง อัตราการเกิดขยะมูลฝอย = 0.00115 ตัน/คน/วัน เทศบาลตำบล อัตราการเกิดขยะมูลฝอย = 0.00102 ตัน/คน/วัน องค์การบริหารส่วนตำบล อัตราการเกิดขยะมูลฝอย = 0.00091 ตัน/คน/วัน

3. การคาดการณ์ปริมาณการเกิดก๊าซเรือนกระจกของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท

การคาดการณ์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการประมาณค่าปริมาณ CO_2 และ CH_4 จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาไว้ ซึ่งมีลักษณะเมืองเป็นเมืองท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมจึงมีความคล้ายคลึงกับเทศบาลเมืองพระพุทธบาทและกลุ่ม Clusters ที่มีสถานที่ท่องเที่ยวเชิงศาสนาและวัฒนธรรมหลายแห่งที่สำคัญ และลักษณะขององค์ประกอบขยะมูลฝอยส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเป็นเศษอาหารและพลาสติก โดยมีวิธีการคาดการณ์ปริมาณการเกิดก๊าซเรือนกระจก ดังนี้

3.1 แบ่งช่วงการคำนวณกราฟของงานวิจัยเรื่อง Evaluation of Quality and Quantity of Emitted Gases from Shiraz Landfill (Talaiekhozani et al., 2016) ที่ได้ทำการศึกษาไว้

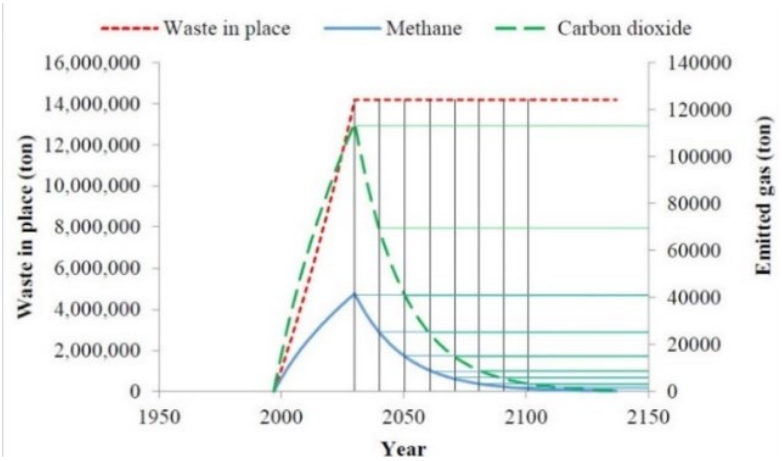


Fig. 1 Calculation area under a curve for estimate CO_2 and CH_4 from a curve of research from Evaluation of Quality and Quantity of Emitted Gases from Shiraz Landfill. (Talaiekhozani et al., 2016)

ทำการแบ่งกราฟออกไป 8 ส่วน โดยได้ช่วงปีออกเป็น 35 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540–2575 (ค.ศ. 1997–2032) ส่วนถัดไปจะแบ่งออกเป็นทุกๆ 10 ปี เริ่มจากปี พ.ศ. 2575–2645 (ค.ศ. 2033–2102) ดังแสดงตาม Fig. 1

3.2 หาพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซ CO_2 และ CH_4 ตาม Fig.1 โดยส่วนที่หนึ่ง หาพื้นที่ใต้กราฟจากสูตรการหาพื้นที่สามเหลี่ยม เท่ากับ ½ ×สูง×ฐาน ส่วนถัดไปที่เหลืออีก 7 ส่วนหาจากสูตรการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู เท่ากับ ½ ×ผลบวกของด้านคู่ขนาน×สูง และนำปริมาณขยะมูลฝอยของบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทตั้งแต่ปี พ.ศ.2535–2562 และปริมาณขยะมูลฝอยในปี พ.ศ. 2563–2565 ที่ได้จากคำนวณข้อ 2. ซึ่งมีปริมาณรวมเท่ากับ 382,626.92 ตัน มาเทียบสัดส่วนกับปริมาณขยะมูลฝอยของงานวิจัยตามข้อ 3.1 เพื่อหาค่าปริมาณก๊าซ CO_2 และ CH_4 ที่เกิดขึ้นในช่วงปีดังกล่าว

3.3 นำปริมาณ CO_2 และ CH_4 ในช่วงปี พ.ศ.2535–2560, 2561, 2562, 2563, 2564 และ 2565 ที่ได้จากการประมาณค่า 8 ส่วนมาจำแนกเป็นรายปีโดยการหารด้วยช่วงปีที่ได้กำหนดไว้ เพื่อหาปริมาณ CO_2 และ CH_4 ในปี พ.ศ. 2560–2670 (ค.ศ. 2017–2127) ในหน่วยตัน (ton) และ ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($tonCO_2eq$) โดยคูณค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจก (Global Warming Potential: GWP) โดยที่ค่า GWP ของ CO_2 = 1 หน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($tonCO_2eq$) และ CH_4 = 25 หน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($tonCO_2eq$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและประมาณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท ดังแสดงใน Fig. 2–4

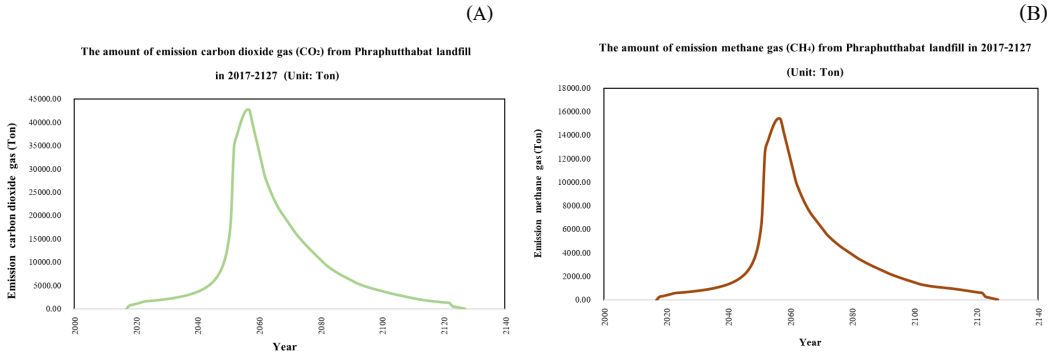


Fig. 2 The amount of emission CO_2 (A) and CH_4 (B) from Phraphutthabat landfill in 2017-2127 in unit ton

จากการประมาณค่าปริมาณการเกิด CO_2 และ CH_4 จากบ่อขยะของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทในปี พ.ศ. 2560–2670 ในหน่วยตัน (ton) มีปริมาณการเกิด CO_2 และ CH_4 คิดค่าเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 9,391.48 ตัน และ 3,415.76 ตันตามลำดับ

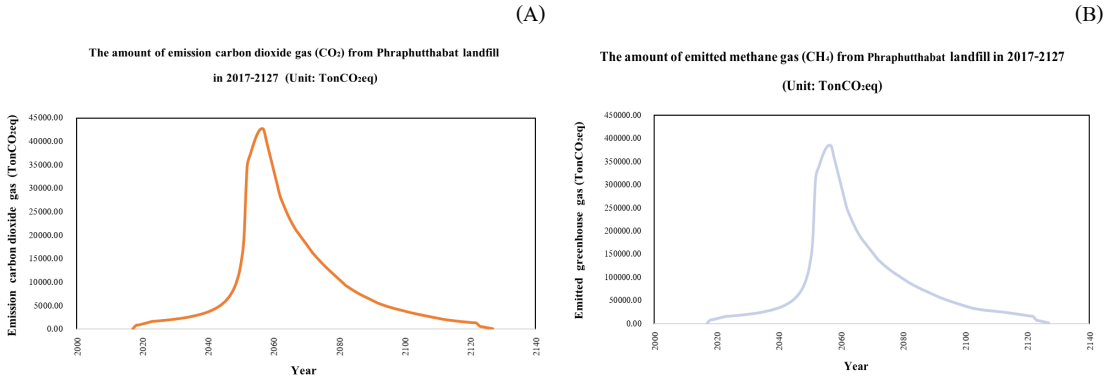


Fig. 3 The amount of emission CO_2 (A) and CH_4 (B) from Phraphutthabat landfill in 2017-2127 in unit $tonCO_2eq$

จากการประมาณค่าปริมาณการเกิด CO_2 และ CH_4 จากบ่อขยะของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทในปีพ.ศ. 2560-2670 ในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($tonCO_2eq$) มีปริมาณการเกิด CO_2 และ CH_4 คิดค่าเฉลี่ยต่อปี

เท่ากับ 9,391.48 tonCO$_2$eqและ 85,393.93 tonCO$_2$eq ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณการเกิด CH_4 ในหน่วย tonCO$_2$eq มีค่าสูงกว่าในหน่วยตัน เนื่องจากค่า GWP ของ CH_4 มีค่ามากกว่า CO_2 ถึง 25 เท่า

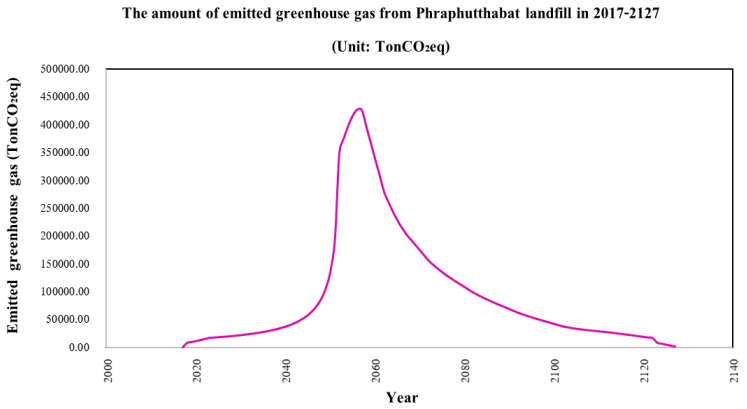


Fig. 4 The amount of emission Greenhouse gas from Phraphutthabat landfill since 2017–2127 in unit tonCO$_2$eq

ปริมาณการเกิดก๊าซเรือนกระจกจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทในปี 2560–2670 หน่วย tonCO$_2$eq ซึ่งมีค่าเฉลี่ยการเกิดก๊าซเรือนกระจกต่อปีเท่ากับ 94,785.41 tonCO$_2$eq จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดสูงสุดในปีพ.ศ. 2599 (ค.ศ. 2056) ซึ่งเท่ากับ 427,019.68 tonCO$_2$eq แล้วปริมาณก๊าซเรือนกระจกจึงเริ่มน้อยลง ดังแสดงตาม Fig. 4 เนื่องจากมีปริมาณขยะมูลฝอยที่คาดการณ์ไว้สูงสุด ขยะมูลฝอยเหล่านั้นจะเกิดกระบวนการที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซได้ เมื่อมีปริมาณขยะมูลฝอยมากทำให้สารอินทรีย์ในระบบมีปริมาณมากตามไปด้วย จึงมีการผลิตก๊าซจากขยะมูลฝอยเพิ่มสูงขึ้นและค่อยๆ น้อยลง เพราะปริมาณสารอินทรีย์ในระบบน้อยลง

จากผลการคาดการณ์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท คิดเป็นร้อยละ 9.77 ของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะมูลฝอยโดยวิธีเทกองและฝังกลบของประเทศไทย ซึ่งมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปีเท่ากับ 970,000 tonCO$_2$eq (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน, ม.ป.ป.) เมื่อเทียบกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทศบาลเมืองนครพนม ที่มีขนาดการปกครองและรูปแบบการจัดการขยะมูลฝอยคล้ายกับเทศบาลเมืองพระพุทธบาท โดยมีการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยวิธี default ของ IPCC พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย 1 บ่อเท่ากับ 117,138 tonCO$_2$eq (อรอนงค์ และ พรพรรณ, 2558) จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงกว่าเพียงเล็กน้อย และหากนำมาเปรียบเทียบกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งอื่น ได้แก่ การผลิตข้าวนาปี จะเท่ากับการผลิตข้าวนาปีปีละ 120,000 ไร่ หรือเท่ากับ 192 ตารางกิโลเมตร (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) โดยการศึกษาในครั้งนี้เป็นเพียงการประมาณค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่อาจเกิดจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท เพื่อดูแนวโน้มการเกิดก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว และหาแนวทางในการลด/ชดเชยปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นเหล่านั้นในอนาคต

ดังนั้น ถ้าต้องการชดเชยปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทนี้ โดยการปลูกต้นไม้เพิ่มพื้นที่สีเขียว และช่วยดูดซับคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากบ่อขยะมูลฝอย ต้องดำเนินการปลูกต้นไม้ประเภทกระถินยักษ์ ซึ่งมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนมากที่สุด (สุภา และวรวุฒิ, 2559) ประมาณปี

ละ 14,604 ไร่ หรือ 1,460,400 ต้น ซึ่งเป็นปริมาณที่มากและใช้พื้นที่ในการปลูกต้นไม้อย่างมาก วิธีการลดก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อขยะมูลฝอยแห่งนี้ที่ดีที่สุดคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิดโดยอาศัยหลัก 3Rs โดยรณรงค์ให้ประชาชนในพื้นที่คัดแยกขยะที่ย่อยสลายได้นำมาทำปุ๋ยหมักครัวเรือนอย่างง่าย จัดตั้งเครือข่ายชุมชนสร้างอาชีพ โดยให้ประธานชุมชนเป็นแกนนำ และเป็นการสร้างรายได้ในแต่ละชุมชน จากการประดิษฐ์สิ่งของจากวัสดุเหลือใช้เป็นการเพิ่มการคัดแยกขยะมูลฝอยพวกพลาสติก มีการจัดทำข้อตกลงกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในกลุ่ม Clusters ในการลดปริมาณขยะมูลฝอยในแต่ละพื้นที่ และลดอัตราค่าธรรมเนียมในการกำจัดขยะมูลฝอย และปรับเปลี่ยนวิธีการจัดการขยะมูลฝอยให้มีความเหมาะสมลดการนำไปฝังกลบหรือเทกอง จากข้อมูลของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทคาดว่าในปี พ.ศ.2565 (ค.ศ. 2022) เทศบาลเมืองพระพุทธบาทจะมีการดำเนินโครงการคัดแยกขยะมูลฝอยเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) และนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า ในส่วนการผลิตเป็น RDF เป็นวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 0.48 $tonCO_2eq$/ton solid waste ซึ่งมีการนำเข้าขยะมูลฝอยมาผลิตเป็น RDF วันละ 110 ตัน จะทำให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขยะมูลฝอยได้ปีละ 19,272 $tonCO_2eq$ และส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ RDF เป็นวิธีการที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 0.11 $tonCO_2eq$/ton solid waste โดยปริมาณ RDF ที่เข้าสู่ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าวันละ 75 ตัน จะทำให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขยะมูลฝอยได้ปีละ 3,011.25 $tonCO_2eq$ (องค์การจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2558) เมื่อรวมปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่สามารถลดได้จากวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยทั้ง 2 วิธีต่อปีจะสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้เท่ากับ 22,283.25 $tonCO_2eq$

สรุป

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจากการคาดการณ์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทในปี พ.ศ. 2560–2670 จะเกิดก๊าซเรือนกระจกปริมาณทั้งหมด 10,521,180.94 $tonCO_2eq$ ซึ่งคำนวณจากผลรวมของปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในแต่ละปี โดยในปี พ.ศ. 2599 (ค.ศ. 2056) จะเกิดปริมาณก๊าซเรือนกระจกสูงสุด เท่ากับ 427,019.68 $tonCO_2eq$ และมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาทที่เกิดขึ้นต่อปีเท่ากับ 94,785.41 $tonCO_2eq$

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร .สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่สำนักการสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม, กองช่าง เทศบาลเมืองพระพุทธบาท และเจ้าหน้าที่ของสำนักงานส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นจังหวัดสระบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยและบ่อขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองพระพุทธบาท

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2562. คู่มือการกรอกข้อมูลการจัดการขยะมูลฝอยตามแบบ คพ. 1 2 และ 3 ปี พ.ศ. 2562, https://www.pcd.go.th/garbage/%E0%B8%84%E0%B8%B9%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B

7%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%B9%E0%B8%A5%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3/, 30 ตุลาคม 2563.

กรมควบคุมมลพิษ. 2563. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2562. บริษัท สไตล์ครีเอทีฟเฮ้าส์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2563. รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ.2562. บริษัท ธนสิริปริ้นติ้ง จำกัด, กรุงเทพฯ.

กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น. ม.ป.ป. บทที่ 5 การประมวลและวิเคราะห์ข้อมูล, http://www.dla.go.th/work/e_book/eb1/stan14/p5.pdf, 22 ตุลาคม 2563.

เครือข่ายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งประเทศไทย (TCCN). 2562. ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขยะ, http://www.tccnclimate.com/, 19 ตุลาคม 2562.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. การศึกษาภาวะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวในพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช. http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/greenhousegasemissions.pdf, 21 ธันวาคม 2563.

สุภา ศิรินาม, วรวุฒิ ประสิทธิวุฒิศักดิ์. 2559. ปลูกป่าลดภาวะโลกร้อนได้จริงหรือ? วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ 2: 93–100.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). ม.ป.ป. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคการจัดการของเสียในปี พ.ศ. 2556, http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/Article/2016/GHG%20Emissions_Waste%20Sector_Final.pdf, 13 พฤศจิกายน 2563.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). ม.ป.ป. การลดก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะมูลฝอย, http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/Article/2017/Waste_GHGs.pdf, 1 พฤศจิกายน 2563.

อรอนงค์ บัวอาจ, พรพรรณ สกุลคู. 2558. การประเมินการแพร่ระบายก๊าซมีเทนโดยวิธี Default, First Order Decay และโปรแกรม LandGEM จากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบเทกองที่มีการควบคุม: กรณีศึกษาพื้นที่เทศบาลเมืองนครพนมจังหวัดนครพนม. วารสารวิจัย มข. 15: 93–104.

Talaiekhozani, A., Raeatifard, N. Jorfi, J. 2016. Evaluation of Quality and Quantity of Emitted Gases from Shiraz Landfill. In: The 6th National and 1th International Conference of Applications of Chemistry in Advanced Technologies. Isfahan, Iran.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Available Source: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf. April 19, 2020.

การปรับปรุงเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา

Improvement of Mae Ngat Somboon Chon Reservoir's and Mae Kuang Udomthara Reservoir's operation rule curve

วิสุทธิ์ ชาติวันชัย*, ณัฐ มาแจ้ง

Visut Chartwanchai*, Nat Marjang

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. Email: visut.ch.68@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมดุลน้ำของอ่างเก็บน้ำฯ เพื่อให้ทราบสภาวะการขาดแคลนน้ำโดยศึกษา 2 กลุ่มแบ่งออกเป็นกลุ่มก่อนการผันน้ำ และหลังการผันน้ำ อีกทั้งยังแบ่งเป็นกลุ่มๆละ 4 กรณี คือ ไม่กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ เกณฑ์ปฏิบัติการฯปี 2558 เกณฑ์ปฏิบัติการฯปี 2562 และ และปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการฯ ก่อนการผันน้ำการปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเมื่อเทียบกับเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปัจจุบันปี 2562 ของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา ลดการระบายผ่านอาคารน้ำล้น โดยเฉลี่ยประมาณ 0.30 และ 0.30 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ หลังการผันน้ำ อ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล สามารถเพิ่มปริมาณส่งน้ำอุปโภคบริโภคโดยเฉลี่ยประมาณ 21.40 ล้าน ลบ.ม./ปี และเพิ่มพื้นที่ชลประทานเพาะปลูกไม้ผล 7,500 ไร่ อีกทั้งการปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำช่วยลดการระบายผ่านอาคารน้ำล้น โดยเฉลี่ยประมาณ 0.40 ล้าน ลบ.ม./ปี และการผันน้ำไปที่อ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธาราทำให้เพิ่มพื้นที่ชลประทานฤดูฝน 10,116 ไร่ และฤดูแล้ง 59,088 ไร่ ช่วยลดการระบายผ่านอาคารน้ำล้น โดยเฉลี่ยประมาณ 1.50 ล้าน ลบ.ม./ปี

คำสำคัญ: เกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ, ขาดแคลนน้ำ, อ่างเก็บน้ำ

Abstract

The objective of this research is to study the current water balance of the reservoirs. In order to identify the condition of water shortage. we separate the water balance into 2 groups, which are before water diversion and after water diversion. Each group is also divided into 4 cases studies, as follows: 1) No reservoir operation rule curve, 2) 2015 reservoir operation rule curve, 3) 2019 reservoir operation rule curve and 4) improved reservoir operation rule curve. As a result, the improved reservoir operation of Mae Ngat Somboon Chon reservoir and Mae Kuang Udomthara reservoir before water diversion can reduce discharge from spillway around 0.30 and 0.30 MCM/year, respectively.After water diversion, Mae Ngat Somboon chon Reservoir can increase the domestic water usage on average of 21.40 MCM./year and increase 7,500 rai of the irrigation area. Moreover, improved reservoir Operation can reduce discharge from spillway around 0.40 MCM./year. The water diversion of Mae Kuang Udomthara Reservoir can help increase 10,116 rai of irrigation area in the rainy season and 59,088 rai in the dry season. Furthermore, the improved reservoir operation rule curve is able to reduce 1.50 MCM./year of exceeded water on average.

Keyword: reservoir operation rule curve, water deficit, reservoir

คำนำ

ในปัจจุบันมีความเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดปัญหาความต้องการน้ำอุปโภคบริโภค และความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรเพิ่มมากขึ้น การนำน้ำจากลุ่มน้ำบริเวณใกล้เคียงที่มีปริมาณมาก เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหาโดยจะผันน้ำจากลุ่มน้ำแม่แตงที่มีปริมาณน้ำมาก มายังอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลจะผันไปอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนน้ำในปัจจุบันและรองรับการเพิ่มความต้องการใช้น้ำในอนาคต อีกทั้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Rules) ถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการบริหารจัดการน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังเป็นเกณฑ์การตัดสินใจในการกักเก็บน้ำและระบายน้ำ โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมดุลน้ำของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา และนำมาวิเคราะห์หาเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำให้เหมาะสมทั้งสภาพในปัจจุบันและอนาคต จำลองสภาพและวิเคราะห์สมดุลน้ำของอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE HYDRO เพื่อให้ทราบสภาวะการขาดแคลนน้ำในพื้นที่ศึกษา และปรับปรุงโค้งปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่สร้างโดยวิธี Vacancy Minimum Storage Requirement

อุปกรณ์และวิธีการ

การประเมินปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำ

รวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำท่า และการระเหย จากหน่วยงานกรมชลประทาน/กรมอุตุนิยมวิทยา และนำข้อมูลเข้าแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ด้วย NAM Model การสอบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลองกับข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าใกล้เคียงอ่างเก็บน้ำของกรมชลประทาน (นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, 2556)

การประเมินความต้องการน้ำเพื่อการชลประทาน

รวบรวมข้อมูลชนิดพืช สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแต่ละชนิด (Crop Coefficient, Kc) รูปแบบการปลูกพืช (Croping Pattern) ประสิทธิภาพการชลประทาน และใช้วิธีสมดุลน้ำในแปลงนาในการวิเคราะห์ โดยข้อมูลน้ำฝนในการศึกษานี้ใช้วิธีของธีเอสเสน (Thiessen Method) สำหรับเลือกสถานีให้ครอบคลุมกับพื้นที่

การจำลองระบบโครงการข่ายของอ่างเก็บน้ำ

แบบจำลอง MIKE HYDRO ในการวิเคราะห์จำลองโครงข่ายระบบน้ำของอ่างเก็บน้ำเหมือนสภาพจริงในพื้นที่มากที่สุด โดยมีขั้นตอนคือกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษา รวบรวมข้อมูลต่างๆ เช่น พื้นที่รับน้ำ ความต้องการใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ เช่น ความต้องการน้ำเพื่อการชลประทาน ความต้องการน้ำอุปโภคบริโภค และความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ สำหรับการวิเคราะห์สมดุลน้ำอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา โดยการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ก่อนการผันน้ำ และหลังการผันน้ำจากลุ่มน้ำแม่แตงมายังอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลไปยังอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา โครงข่ายจำลองระบบลุ่มน้ำของพื้นที่การศึกษา แสดงดัง Fig.1 และแบ่งรายละเอียดกรณีศึกษาต่างๆ ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ก่อนการผันน้ำ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลโดยเฉลี่ยประมาณ 308.97 ล้าน ลบ.ม./ปี และปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธาราโดยเฉลี่ยประมาณ 186.85 ล้าน ลบ.ม./ปี กรณีศึกษาที่ 1 ไม่กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ กรณีศึกษาที่ 2 กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี พ.ศ. 2558 กรณีศึกษาที่ 3 กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี พ.ศ. 2562 กรณีศึกษาที่ 4 กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับปรุงใหม่

กลุ่มที่ 2 หลังการผันน้ำจากลุ่มน้ำแม่แตงมายังอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรวมปริมาณน้ำที่ผัน โดยเฉลี่ยประมาณ 517.35 ล้าน ลบ.ม./ปี และผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลไปยังอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรวมปริมาณน้ำที่ผัน โดยเฉลี่ยประมาณ 375.15 ล้าน ลบ.ม./ปี กรณีศึกษาที่ 5 ไม่กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ กรณีศึกษาที่6 กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี พ.ศ. 2558 กรณีศึกษาที่ 7 กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี พ.ศ. 2562 กรณีศึกษาที่8 กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับปรุงใหม่

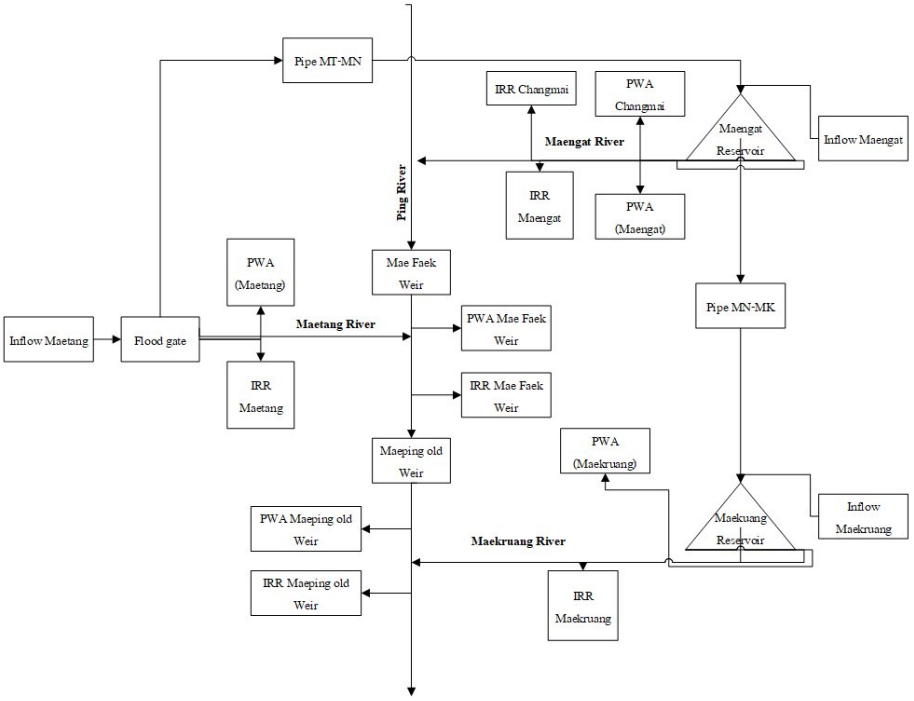


Fig. 1 Schematic diagram of Research Area

การจัดทำเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ

การสร้างเส้นระดับเก็บกักน้ำสูงสุด (Upper Rule Curve) และระดับเก็บกักน้ำต่ำสุด (Lower Rule Curve) โดยใช้วิธี Vacancy Minimum Storage Requirement Rule Curve จะคิดตามหลักการที่ว่าปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำจะเต็มอ่างพอดีเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน และปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำจะแห้งพอดีเมื่อสิ้นสุดฤดูแล้ง (โดยเกณฑ์ปฏิบัติการใหม่แตกต่างจากเกณฑ์ปฏิบัติการเดิม (ปี พ.ศ.2558 และ ปี พ.ศ. 2562) โดยในช่วงเดือนฤดูแล้งปรับลดเกณฑ์การเก็บกักน้ำต่ำสุด (Lower Rule Curve) ให้ต่ำลงเพื่อลดปริมาณการขาดแคลนน้ำชลประทานช่วงต้นฤดูแล้ง และปรับ

เพิ่มระดับเก็บกักน้ำสูงสุด (Upper Rule Curve) ในช่วงต้นฤดูฝนให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มการเก็บกักน้ำ เกณฑ์ปฏิบัติอ่างเก็บน้ำทั้ง 4 เกณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา แสดงดัง Fig. 2 และ Fig. 3 (กรมชลประทาน, 2561)

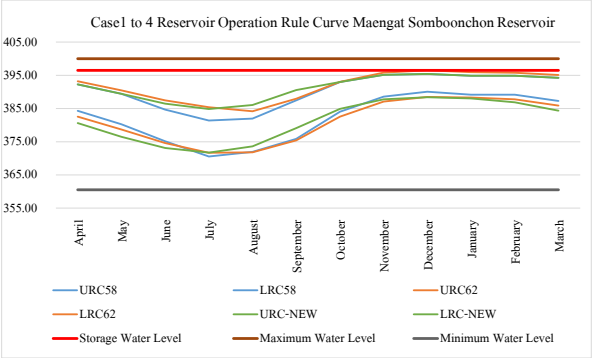


Fig. 2 Case1 to 4 Reservoir Operation Rule Curve Maengat Somboonchon Reservoir

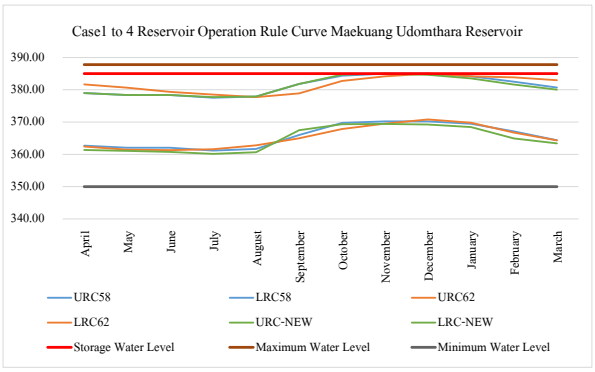


Fig. 3 Case1 to 4 Reservoir Operation Rule Curve Maekuang Udomthara Reservoir

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา ได้จัดทำแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าด้วย NAM Model การสอบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลองกับข้อมูลน้ำท่าที่บันทึกของกรมชลประทาน โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2558 ในการวิเคราะห์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient Determination, R^2) เท่ากับ 0.64 และ 0.72 ตามลำดับ ค่า Water Balance Error (%WBL) เท่ากับ 0.96% และ 1.53% ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 4 และ Fig. 5 พารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ซึ่งการตรวจสอบพารามิเตอร์ใช้ข้อมูลปี 2551 ถึง 2552 ในการวิเคราะห์โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient Determination, R^2) เท่ากับ 0.79 และ 0.56 ตามลำดับ ค่า Water Balance Error (%WBL) เท่ากับ 0.62% และ 1.12% ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 6 และ Fig. 7

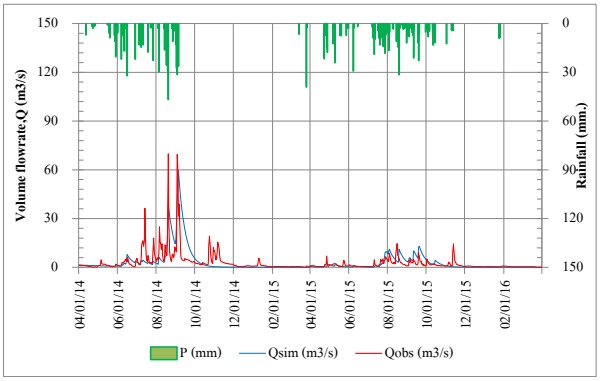


Fig. 4 Calibration Result of Rainfall runoff model for Mae Ngat Somboon Chon Reservoir

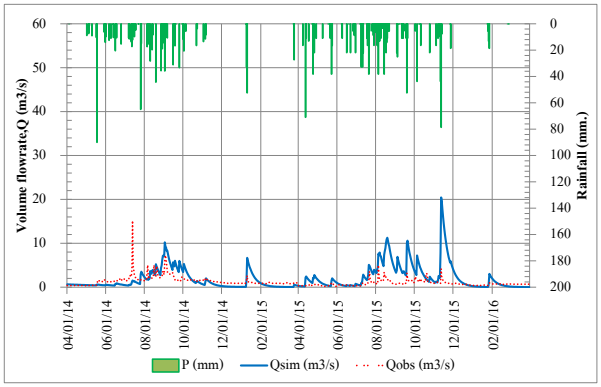


Fig. 5 Calibration Result of Rainfall runoff model for Mae Kuang Udomthara Reservoir

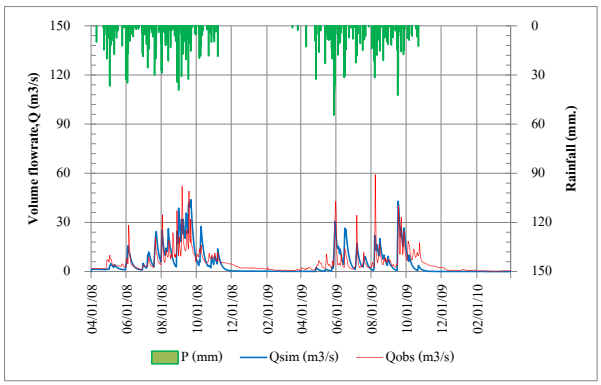


Fig. 6 Verification Result of Rainfall runoff model for Mae Ngat Somboon Chon Reservoir

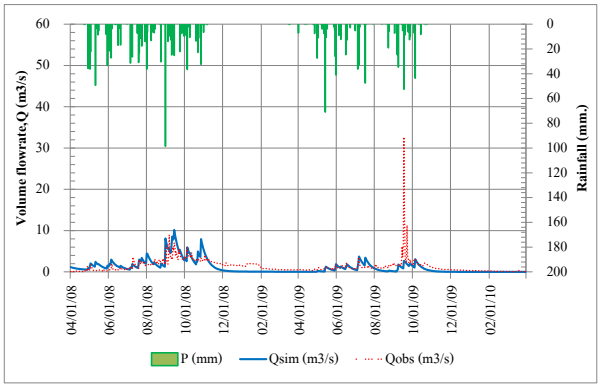


Fig. 7 Verification Result of Rainfall runoff model for Mae Kuang Udomthara Reservoir

ผลการศึกษาความต้องการน้ำเพื่อการชลประทาน โดยใช้แบบจำลองสมดุลน้ำในแปลงนา ด้วยข้อมูลน้ำฝนรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2531 – 2560) ทำการคำนวณความต้องการน้ำชลประทานของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธาราในการศึกษาครั้งนี้จะนำพืชที่เพาะปลูก ในพื้นที่มาคิดความต้องการใช้น้ำชลประทาน ประกอบด้วย ข้าวกข.นาดำ (นาปรังและนาปี) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ถั่วเหลือง ถั่วลิสง หอมแดง มะม่วง และลำไย เป็นต้น โดยมีรูปแบบการเพาะปลูกพืช (Cropping Pattern) และขนาดพื้นที่เพาะปลูก ของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลและอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา ดังแสดง Fig. 8 Fig. 9 และ Table 1 ตามลำดับ โดยผลการคำนวณความต้องการใช้น้ำชลประทาน ซึ่งเป็นการนำปริมาณการใช้น้ำของพืชมาหักลบด้วยปริมาณฝนใช้การและบวกด้วยปริมาณน้ำรั่วซึมแล้วจึงหารด้วยประสิทธิภาพการชลประทาน โดยค่าประสิทธิภาพการชลประทานอ่างเก็บน้ำ แม่งัดสมบูรณ์ชลและอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา ในช่วงฤดูฝน 55% ฤดูแล้ง 65% จะเห็นได้ว่า ความต้องการใช้น้ำชลประทานของ ข้าวนาปรังมากกว่าข้าวนาปี เนื่องจากในฤดูแล้งจะไม่มีฝนใช้การ ดังแสดง Table 2

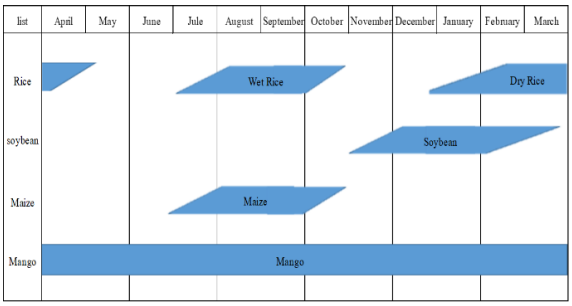


Fig. 8 Cropping Pattern of Mae Ngat Somboon chon Reservoir

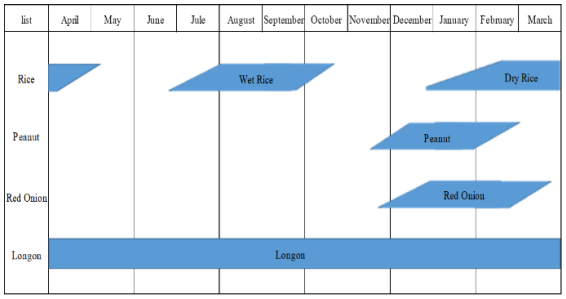


Fig. 9 Cropping Pattern of Mae kuang Udomthara Reservoir

Table 1 Irrigation Area of Mae Ngat Soomboon Chon Reservoir and Mae Kuang Udomthara Reservoir (Rai)

Order	Plant Species	Before water diversion		After water diversion		Before water diversion		After water diversion	
		Rainy Season	Dry Season	Rainy Season	Dry Season	Rainy Season	Dry Season	Rainy Season	Dry Season
1	Rice	52,311	45,536	52,311	45,536	113,951	28,949	113,951	78,762
2	Maize	19,050	-	19,050	-	-	-	-	-
3	Soybean	-	15,040	-	15,040	-	-	-	-
4	Peanut	-	-	-	-	-	3,493	-	7,619
5	Red Onion	-	-	-	-	3,925	-	8,892	-
6	Mango	21,019	21,019	21,019	28,519	-	-	-	-
7	Longon	-	-	-	-	26,956	26,956	32,105	32,105
	Total	92,380	81,595	92,380	89,095	144,832	59,398	154,948	118,486

Table 2 Irrigation Water Demand of Mae Ngat Somboon Chon Reservoir and Mae Kuang Udomthara Reservoir

Plant species	Mae Ngat Somboon Chon Reservoir (M^3/Rai)			Mae Kuang Udomthara Reservoir (M^3/Rai)		
	Rain Season	Dry Season	All Year	Rain Season	Dry Season	All Year
Rice	849.00	2,252.00	-	719.00	2,261.00	-
Maize	326.47	-	-	-	-	-
Soybean	-	763.00	-	-	-	-
Peanut	-	-	-	-	851.00	-
Red Onion	-	-	-	859.00	-	-
Mango	-	-	4,833.00	-	-	-
Longon	-	-	-	-	-	1,843.00
Total	1,175.47	3,015.00	4,833.00	1,578.00	3,112.00	1,843.00

ผลการศึกษาสมดุลน้ำใช้ข้อมูล 30 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531–2560 ที่มีสภาพการในปัจจุบัน โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์เป็น 2 หัวข้อหลัก คือ ก่อนมีการผันน้ำ และหลังมีการผันน้ำ โดยก่อนมีการผันน้ำแบ่งออกเป็น 4 กรณีคือ ไม่กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี พ.ศ. 2558 กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี พ.ศ. 2562 และกำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับปรุงใหม่ โดยอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา จะมีข้อมูลปริมาณน้ำไหลลงเข้าอ่างเก็บน้ำ โดยเฉลี่ยประมาณ 308.97 ล้าน ลบ.ม./ปี และ 186.85 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค โดยเฉลี่ยประมาณ 17.35 ล้าน ลบ.ม./ปี และ 18.25 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ และความต้องการน้ำเพื่อการชลประทาน โดยเฉลี่ยประมาณ 156.70 ล้าน ลบ.ม. ประกอบด้วยพื้นที่การเพาะปลูกในฤดูฝน 92,380 ไร่ ฤดูแล้ง 81,595 ไร่ และ 115.83 ล้าน ลบ.ม. ประกอบด้วยพื้นที่เพาะปลูกฤดูฝน 144,832 ไร่ ฤดูแล้ง 59,398 ไร่ ตามลำดับ โดยข้อมูลปริมาณน้ำล้นอาคารระบายน้ำล้น

(Spillway) น้ำระบายผ่าน Outlet ขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค และขาดแคลนน้ำเพื่อการชลประทานอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา แสดงดัง Table 3 และกราฟเปรียบเทียบการขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค การขาดแคลนน้ำชลประทาน และปริมาณน้ำล้นผ่านอาคารระบายน้ำล้นกรณีที่ 1 ถึง 4 ของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา แสดงดัง Fig.10 และ Fig.11 ตามลำดับ

Table 3 Comparison study results of case 1 to 4 Mae Ngat Somboon Chon and Mae Kuang Udomthara Reservoirs

Reservoir	Case	Water Spill (mcm.)		Domestic water deficit (mcm.)	Number of Shortage (year)	Irrigation water deficit (mcm.)	Number of Shortage (year)
		Spillway	Outlet				
Mae ngat Somboon chon	1	12.00	138.13	0.31	1	3.86	2
	2	2.97	166.92	0.20	5	14.04	9
	3	3.07	160.38	0.17	5	11.17	13
	4	2.78	159.78	0.17	5	10.94	6
Mae Kuang Udomthara	1	11.69	32.04	1.29	6	12.76	6
	2	10.63	38.46	2.29	8	19.80	8
	3	10.50	38.53	2.63	8	20.20	8
	4	10.21	38.35	2.19	6	19.65	6

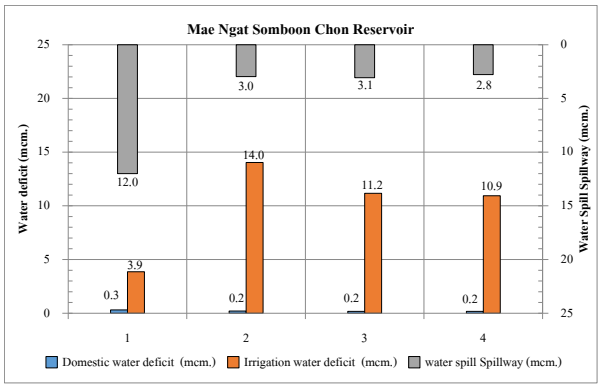


Fig. 10 Comparison Study Results Water deficit and Water spill from spillway Maengat Somboonchon Reservoir

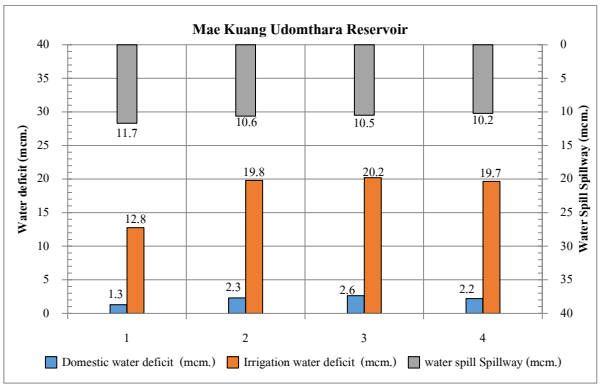


Fig. 11 Comparison Study Results Water deficit and Water spill from spillway Maekuang Udomthara Reservoir

กรณีหลังมีการผันน้ำ โดยจะผันน้ำจากประตูระบายน้ำแม่ตะมาน ลุ่มน้ำแม่แตง ไปยังอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล จะดำเนินการในฤดูฝนช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงพฤศจิกายน โดยจะสามารถส่งน้ำได้ในกรณีที่น้ำผ่านประตูมีปริมาณมากกว่า 21.00 ลบ.ม./วินาที และส่งน้ำได้สูงสุด 28.50 ลบ.ม./วินาที การผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลไปยังอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา จะดำเนินการในฤดูฝนเช่นเดียวกัน โดยจะส่งน้ำเมื่อปริมาณน้ำอยู่ในระดับสูงกว่าระดับเก็บกัก และส่งน้ำได้สูงสุด 26.00 ลบ.ม./วินาที โดยกรณีหลังมีการผันน้ำแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ ไม่กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำและมีการผันน้ำ กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี 2558 และมีการผันน้ำ กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปี 2562 และมีการผันน้ำ กำหนดเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับปรุง

ใหม่และมีการผันน้ำ โดยทั้ง 4 กรณีจะมีข้อมูลปริมาณน้ำที่ผันจากลุ่มน้ำแม่แตงไปยังอ่างเก็บน้ำแม่งัดฯ และอ่างเก็บน้ำแม่งัดฯไปยังอ่างเก็บน้ำแม่กวงฯ เฉลี่ยประมาณ 211.64 ล้าน ลบ.ม./ปี และ 182.37 ตามลำดับ รวมมีน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำโดยเฉลี่ยประมาณ 520.60 ล้าน ลบ.ม./ปี และ 369.22 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ ในกรณีอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล จะสามารถเพิ่มการส่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค โดยเฉลี่ยประมาณ 21.41 ล้าน ลบ.ม./ปี เพิ่มพื้นที่ชลประทานไม้ผล/ไม้ยืนต้นในฤดูแล้งได้อีก 7,500 ไร่ ในกรณีอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธาราเพิ่มพื้นที่ชลประทานฤดูฝนจากเดิม 144,832 ไร่ เป็น 154,948 ไร่ ฤดูแล้งจากเดิม 59,398 ไร่ เป็น 118,486 ไร่ โดยข้อมูลปริมาณน้ำล้นอาคารระบายน้ำล้น (Spillway) น้ำระบายผ่าน Outlet ขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค และขาดแคลนน้ำเพื่อการชลประทาน อ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา แสดงดัง Table 4 และกราฟเปรียบเทียบการขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค การขาดแคลนน้ำชลประทาน และปริมาณน้ำล้นผ่านอาคารระบายน้ำล้นกรณีที่ 5 ถึง 8 ของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา แสดงดัง Fig. 12 และ Fig. 13 ตามลำดับ

Table 4 Comparison study results case 5 to 8 Mae Ngat Somboon Chon and Mae Kuang Udomthara Reservoir

Reservoir	Case	Water Spill (mcm.)		Domestic water deficit (mcm.)	Number of Shortage (year)	Irrigation water deficit (mcm.)	Number of Shortage (year)
		Spillway	Outlet				
Mae ngat Somboon chon	5	11.46	113.01	1.08	3	4.71	3
	6	3.33	131.10	0.67	5	6.73	8
	7	3.45	126.66	0.61	6	6.69	10
	8	3.09	126.70	0.62	4	6.56	6
Mae Kuang Udomthara	5	79.44	80.85	0.89	5	12.60	5
	6	80.06	87.05	1.76	6	28.00	9
	7	77.41	92.75	2.02	7	28.41	10
	8	75.92	91.34	2.15	6	27.54	6

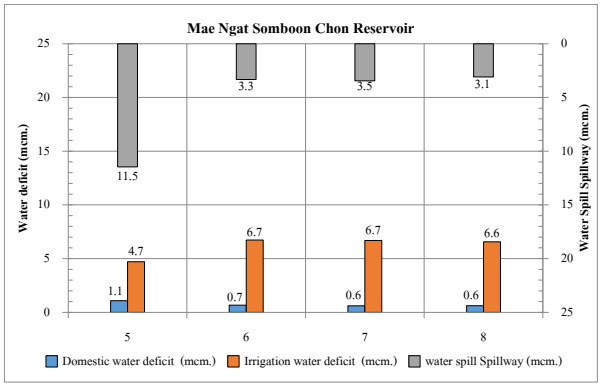


Fig. 12 Comparison Study Results Water deficit and Water spill from spillway Maengat Somboonchon Reservoir

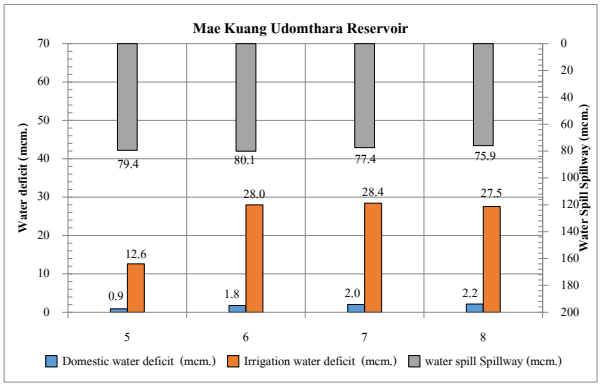


Fig. 13 Comparison Study Results Water deficit and Water spill from spillway Maekuang Udomthara Reservoir

สรุป

ผลการศึกษาสรุปได้ว่าเมื่อปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสามารถลดการระบายน้ำผ่านอาคารระบายน้ำล้น และลดการขาดแคลนน้ำชลประทาน โดยในช่วงเดือนฤดูแล้งปรับลดเกณฑ์การเก็บกักน้ำต่ำสุด (Lower Rule Curve) ให้ต่ำลงเพื่อลดปริมาณการขาดแคลนน้ำชลประทานช่วงต้นฤดูแล้ง และปรับเพิ่มระดับเก็บกักน้ำสูงสุด (Upper Rule Curve) ในช่วงต้นฤดูฝนให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มการเก็บกักน้ำ โดยก่อนมีการผันน้ำ การปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเมื่อเทียบกับเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปัจจุบันปี พ.ศ. 2562 ของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล และอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา ลดการระบายน้ำผ่านอาคารระบายน้ำล้น (spillway) โดยเฉลี่ยประมาณ 0.30 และ 0.30 ล้าน ลบ.ม./ปี และลดการขาดแคลนน้ำชลประทานโดยเฉลี่ยประมาณ 0.23 และ 0.55 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ หลังมีการผันน้ำ ปริมาณน้ำที่ผันจากลุ่มน้ำแม่แตงมาอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล ทำให้ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากเดิม 308.97 เพิ่มเป็น 520.61 ล้านลบ.ม./ปี และปริมาณน้ำที่ผันจากอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลไปยังอ่างเก็บน้ำ แม่กวงอุดมธารา ทำให้ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากเดิม 186.85 เพิ่มเป็น 369.22 ล้านลบ.ม./ปี ปัจจุบันอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลมีการส่งน้ำไปที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ หลังการผันน้ำสามารถเพิ่มปริมาณส่งน้ำอุปโภคบริโภคโดยเฉลี่ยประมาณ 21.40 ล้าน ลบ.ม./ปี และเพิ่มพื้นที่ชลประทานเพาะปลูกไม้ผล/ไม้ยืนต้น 7,500 ไร่ อีกทั้งการปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ สามารถช่วยลดการระบายผ่านอาคารน้ำล้น (Spillway) โดยเฉลี่ยประมาณ 0.40 ล้าน ลบ.ม./ปี ลดการขาดแคลนน้ำชลประทาน โดยเฉลี่ยประมาณ 0.10 ล้าน ลบ.ม./ปี และการผันน้ำไปที่อ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธาราทำให้เพิ่มพื้นที่ชลประทานฤดูฝน 10,116 ไร่ และฤดูแล้ง 59,088 ไร่ ช่วยลดการระบายผ่านอาคารน้ำล้น (Spillway) โดยเฉลี่ยประมาณ 1.50 ล้าน ลบ.ม./ปี ลดการขาดแคลนน้ำชลประทาน โดยเฉลี่ยประมาณ 1.00 ล้าน ลบ.ม./ปี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐ มาแจ้ง ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิระวัฒน์ กณะสุต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพันธ์ร่วม และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแม่แฝก-แม่งัดสมบูรณ์ชล และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแม่กวงอุดมธารา สำนักงานชลประทานที่1 และสำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา ที่ให้การสนับสนุนข้อมูล คำปรึกษา ข้อแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน. 2561. การศึกษาปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำขนาดกลาง 412 แห่ง โดยฝ่ายจัดสรรน้ำที่ 2 ส่วนบริหารจัดการน้ำ

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2556. อุทกวิทยาชั้นสูง Advance Hydrology. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร

กรมชลประทาน. 2555. รายงานสรุปโครงการเพิ่มปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่

การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งน้ำทางระบบท่อของอ่างเก็บน้ำประแสร์

The improvement of the river outlet pipeline system

เขมนันท์ แสงนวล*, จิระวัฒน์ กณะสุต

Khemanan Sangnuan*, Jirawat Kanasut

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: khemanan.sa@ku.th

บทคัดย่อ

ทุเรียนเป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดระยอง ในสภาพปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากยางพาราเป็นทุเรียนมากขึ้น ส่งผลให้การใช้น้ำในพื้นที่ชลประทานมากขึ้น ภายใต้ข้อจำกัดของระบบส่งน้ำในปัจจุบันของพื้นที่ชลประทานฝั่งขวาของเขื่อนประแสร์ จึงได้ทำการศึกษาความต้องการใช้น้ำชลประทานด้วยแบบจำลอง WUSMO พบว่า พื้นที่ชลประทานฝั่งขวาของเขื่อนประแสร์มีพื้นที่เพาะปลูกทุเรียน 36,433 ไร่ มีความต้องการใช้น้ำชลประทานรายสัปดาห์สูงสุดเกิดในช่วงสัปดาห์ที่ 1–3 ของเดือนเมษายน เท่ากับ 6.164 ลบ.ม./วินาที และได้ทำการวิเคราะห์การไหลในระบบท่อส่งน้ำด้วยแบบจำลอง EPANET 2.0 เมื่อระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติ (+35.50 ม. รทก) และระดับเก็บกักต่ำสุด (+24.00 ม. รทก) พบว่า มีค่าความสูงแรงดันอยู่ในช่วง 24.79 – 84.64 เมตร และความเร็วการไหลในท่อส่งน้ำอยู่ในช่วง 0.6–2.5 เมตร/วินาที โดยระบบท่อส่งน้ำสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากยางพาราเป็นทุเรียนที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ10 ของพื้นที่ยางพาราของพื้นที่ชลประทานฝั่งขวาเขื่อนประแสร์ ทำให้พื้นที่เพาะปลูกทุเรียนเพิ่มเป็น 42,946 ไร่ มีความต้องการน้ำชลประทานเท่ากับ 7.266 ลบ.ม./วินาที จะได้ค่าความสูงแรงดันอยู่ในช่วง 16.61– 82.96 เมตร และความเร็วการไหลในท่ออยู่ในช่วง 0.6–3.0 เมตร/วินาที

คำสำคัญ: แบบจำลองWUSMO, แบบจำลอง EPANET2.0

Abstract

Durian is an economic crop of Rayong province. At present, land use of agricultural is changing from Rubber tree to Durian. As a result, irrigation water requirement is increasing under the limitation of Prasae Dam irrigation water systems the study is aimed to analyze the irrigation water requirement by using WUSMO model. The result shown that right side irrigation area of Prasae Dam has durian planting area of 36,433 Rai and maximum weekly irrigation water requirement occurs in 1st - 3rd week in April around 6.164 m^3/s. EPANET2.0 was used to analyze the pipelines system flow at +35.50 m.MSL. (retention level) and +24.00 m.MSL. (minimum water level) and the result shown that this pipelines system pressure is 24.79–84.64 meter and the velocity is 0.6–2.5 m/s. Land use in the irrigation area has can be changed from Rubber tree to Durian but should not reach 10% of currently Rubber tree area. As a result, the total Durian area will be 42,946 Rai and irrigation water requirement will be 7.266 m^3/s with 16.61–82.96 m of pressure and velocity will be 0.6–3.0 m/s.

Keywords: WUSMO, EPANET2.0

คำนำ

เขื่อนประแสร์เป็นเขื่อนขนาดใหญ่ในจังหวัดระยอง ตั้งอยู่ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก ที่ตำบลชุมแสง อำเภอวังจันทร์ จังหวัดระยอง โดยมีวัตถุประสงค์ในการส่งน้ำช่วยเหลือพื้นที่การชลประทาน การอุปโภค-บริโภค การรักษาระบบนิเวศน์ด้านท้ายน้ำ การบรรเทาอุทกภัยในลุ่มน้ำประแสร์ และการผันน้ำเพื่ออุตสาหกรรม เนื่องจากวัตถุประสงค์ของเขื่อนประแสร์ดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงจำเป็นต้องมีการบริหารจัดการน้ำอย่างเหมาะสมจากสถานการณ์ปัจจุบันที่มีความต้องการน้ำมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากยางพาราเป็นสวนผลไม้ในพื้นที่ชลประทานฝั่งขวาของเขื่อนประแสร์ โดยการส่งน้ำด้วยระบบท่อส่งน้ำไปยังจุดจ่ายน้ำต่างๆ ลงคลองธรรมชาติ แล้วจึงให้เกษตรกรในพื้นที่สูบน้ำจากคลองไปใช้ในการเกษตรด้วยตนเอง

ด้วยเหตุนี้จึงได้จัดทำแบบจำลองเพื่อศึกษาวิเคราะห์ศักยภาพการส่งน้ำด้วยระบบท่อของเขื่อนประแสร์ในสภาพปัจจุบัน และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากยางพาราเป็นทุเรียนเต็มศักยภาพของท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์ เพื่อให้การส่งน้ำด้วยระบบท่อของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาประแสร์มีประสิทธิภาพสูงสุด

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการศึกษา

1.การรวบรวมข้อมูลและเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ข้อมูลความต้องการน้ำชลประทานของพื้นที่เพาะปลูก ข้อมูลกายภาพของระบบท่อส่งน้ำฝั่งขวาของเขื่อนประแสร์

2.การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้ในการศึกษาเป็นการตรวจสอบข้อมูลที่จัดเก็บเพื่อวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูล

2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณฝนจากสถานีในพื้นที่ด้วยวิธีโค้งทับทวี (Double Mass Curve)

2.2 ความต้องการน้ำชลประทานใช้ข้อมูลพื้นที่การเพาะปลูกในเขตพื้นที่ชลประทานฝั่งขวาของเขื่อนประแสร์ด้วยแบบจำลอง WUSMO

3.การประยุกต์แบบจำลอง EPANET2.0 แบบ Single period (Fig.1) กำหนดค่า C ในสูตรของ Hazen-Williams เป็นท่อเหล็กเหนียว (ใหม่และไม่ดาด) มีค่าเท่ากับ 140 ด้วยกรณีศึกษาดังนี้

3.1 กรณีที่ 1 การใช้น้ำในปัจจุบันของท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์

3.2 กรณีที่ 2 การใช้น้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากยางพาราเป็นทุเรียนเต็มศักยภาพของท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์

4.สรุปผลการดำเนินการ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.ลักษณะทางกายภาพของเขื่อนประแสร์สามารถสรุปดังแสดงใน Table 1

Table 1 Prasae Dam physical characteristics

Dam	Catchment area (km^2.)	Dam height (m.MSL.)	Maximum water level (m.MSL)	Retention level (m.MSL.)	Minimum water level (m.MSL.)
Prasae Dam	603	+39.00	+36.00	+35.50	+24.00

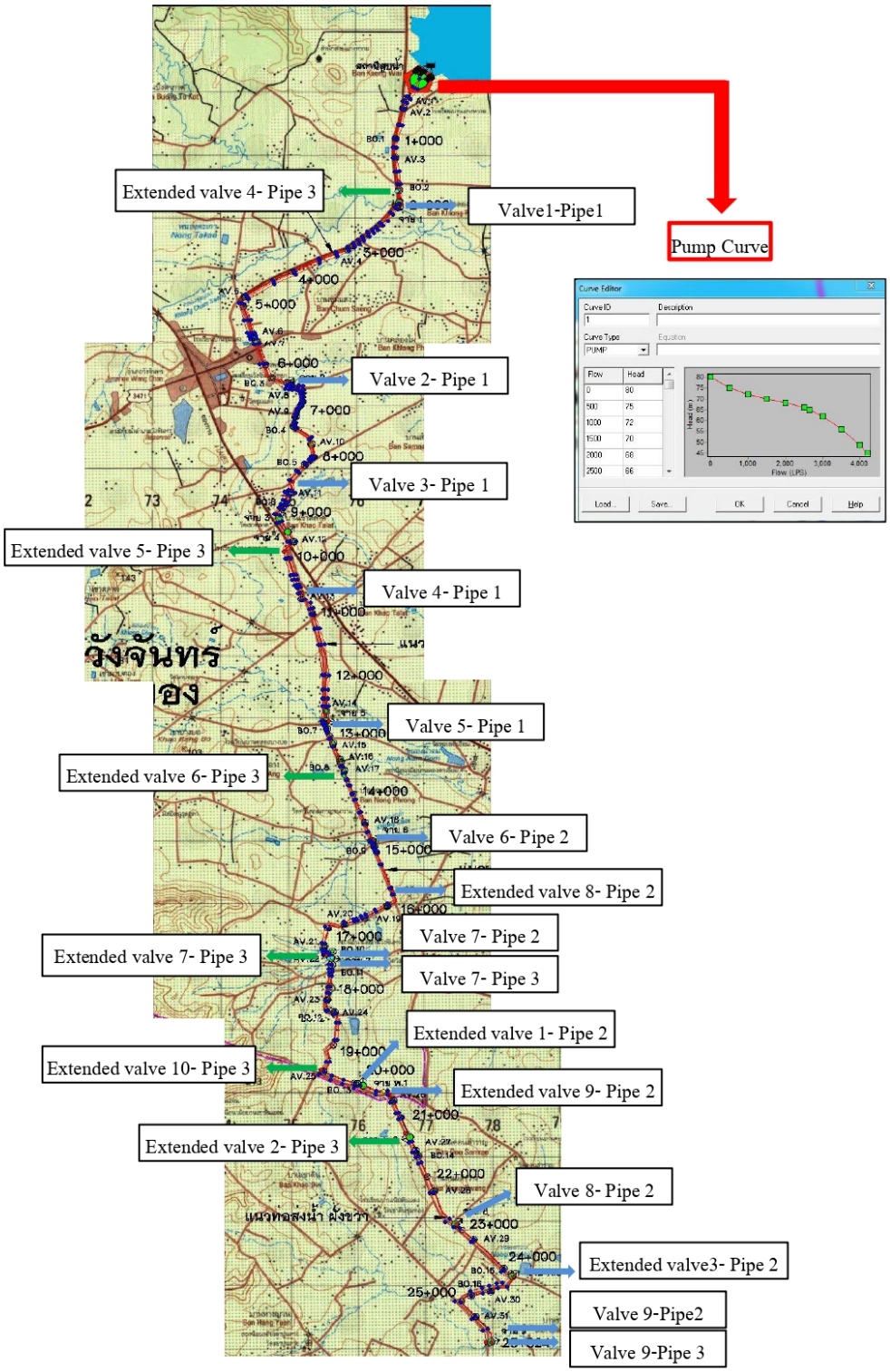


Fig.1 Pipeline system and Pump curve

ที่มา: โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาประแสร์ สำนักงานชลประทานที่ 9 กรมชลประทาน

2.ความต้องการน้ำชลประทาน

ผลการคำนวณความต้องการน้ำชลประทานของพื้นที่ศึกษาโดยใช้แบบจำลอง WUSMO ด้วยข้อมูลน้ำฝนรอบ 30 ปี (พ.ศ.2533–2562) ทำการคำนวณความต้องการน้ำชลประทานของเขื่อนประแสร์ ในการศึกษาครั้งนี้จะนำพืชที่เพาะปลูกในพื้นที่มาคิดความต้องการใช้น้ำชลประทาน คือ ทุเรียนเป็นตัวแทนไม้ผลในพื้นที่ศึกษา ดังแสดงผลการคำนวณการใช้น้ำของพืชตามทฤษฎีใน Table 2 ทุเรียนมีความต้องการใช้น้ำตามทฤษฎีสูงสุดในเดือนเมษายน เท่ากับ 135.00 มม. (216 ลบ.ม./ไร่) และความต้องการใช้น้ำตามทฤษฎีรวมทั้งปีเท่ากับ 1,106.25 มม. (1,770 ลบ.ม./ไร่) สำหรับใน Table 3 แสดงผลการคำนวณความต้องการใช้น้ำชลประทาน ซึ่งเป็นการนำปริมาณการใช้น้ำของพืชมาหักลบด้วยปริมาณฝนใช้การและบวกด้วยปริมาณน้ำรั่วซึม แล้วจึงหารด้วยประสิทธิภาพการชลประทาน จะเห็นได้ว่าความต้องการใช้น้ำชลประทานของทุเรียนมีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมเท่ากับ 243.13 มม. (389 ลบ.ม./ไร่) และความต้องการใช้น้ำชลประทานของทุเรียนรายปีเท่ากับ 1,070 มม. (1,712 ลบ.ม./ไร่) สำหรับความต้องการใช้น้ำชลประทานรายสัปดาห์ของพื้นที่ชลประทานฝั่งขวา ซึ่งมีพื้นที่ปลูกทุเรียน 36,433 ไร่ พบว่าความต้องการใช้ชลประทานรายสัปดาห์สูงสุดเกิดในช่วงสัปดาห์ที่ 1–3 ของเดือนเมษายน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.164 ลบ.ม./วินาที

Table 2 Theoretical crop water requirement

Crop	Theoretical crop water requirement												Anual
	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	
Theoretical crop water requirement (mm.)													
Durian	135.00	105.00	84.38	83.13	84.38	68.13	71.25	81.25	87.50	95.63	80.00	130.63	1,106.25
Theoretical crop water requirement (m^3./Rai)													
Durian	216.00	168.00	135.00	133.00	135.00	109.00	114.00	130.00	140.00	153.00	128.00	209.00	1,770.00

Table 3 Average Durian irrigation water requirement (1990 – 2019)

Crop	Average Durian irrigation water requirement												Anual
	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	
Irrigation water requirement (mm.)													
Durian	140.63	35.63	30.00	18.75	14.38	4.38	23.13	116.88	160.00	157.50	125.63	243.13	1,070.00
Irrigation water requirement (m^3./Rai)													
Durian	225.00	57.00	48.00	30.00	23.00	7.00	37.00	187.00	256.00	252.00	201.00	389.00	1,712.00

3.ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองในกรณีต่างๆ

3.1 กรณีที่ 1 การใช้น้ำในปัจจุบันของท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์

ผลการศึกษาความสูงแรงดันในระบบท่อส่งน้ำเมื่อระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติ (+35.50 ม.รทก.) และที่ระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด (+24.00 ม.รทก.) โดยติดตั้งเครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง อัตราสูบน้ำเครื่องละ 2,054.82 ลิตร/วินาที และความสูงแรงดันเท่ากับ 67.78 เมตร พบว่า ความสูงแรงดันน้ำที่จุดจ่ายน้ำต่างๆ มีค่าความสูงแรงดันอยู่ในช่วง 24.79 – 84.64 เมตร ในขณะที่ระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติเส้นท่อที่ 1 จะมีค่าความสูงแรงดันสูงสุดเท่ากับ 84.64 เมตร และเมื่อระดับน้ำในอ่างฯ อยู่ที่ระดับเก็บกักต่ำสุดเส้นท่อที่ 2 จะมีค่าความสูงแรงดันต่ำสุดเท่ากับ 24.79 เมตร ดังแสดงใน Fig 2.

หากพิจารณาข้อกำหนดการออกแบบระบบท่อส่งน้ำ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาที่น้อยที่สุดของระบบท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์สามารถรับค่าความสูงแรงดันน้ำได้เท่ากับ 22.86 บาร์ หรือเท่ากับ 233.07 เมตร ค่าความสูงแรงดันสูงสุดที่เกิดของระบบท่อส่งน้ำจึงอยู่ในเกณฑ์ออกแบบระบบท่อส่งน้ำและเมื่อระดับน้ำในอ่างฯลดลงถึงระดับเก็บกักต่ำสุดจะมีความสูงแรงดันเท่ากับ 24.79 เมตรซึ่งเพียงพอในการส่งน้ำเข้าพื้นที่เพาะปลูก

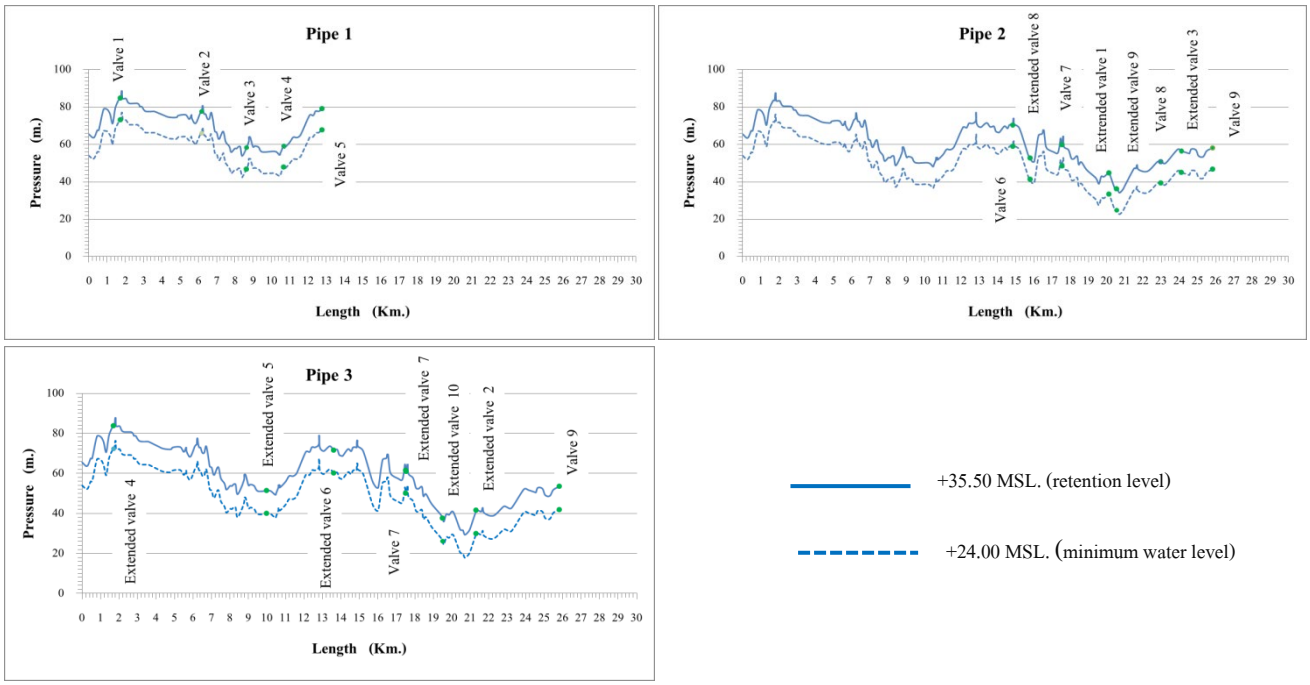


Fig. 2 Pipeline Pressure at the present situation

สำหรับผลการศึกษาความเร็วการไหลในระบบท่อส่งน้ำ พบว่าในขณะที่ระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติและลดลงถึงระดับเก็บกักต่ำสุด จะมีค่าความเร็วการไหลในเส้นท่อเท่ากันเนื่องจากความต้องการใช้น้ำและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงใน Fig 3.

1.เส้นท่อที่ 1 อัตราการไหลที่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 1,333.63–632.30 ลิตร/วินาที ขนาดท่อตั้งแต่ 900 –1,600 มิลลิเมตร ความเร็วอยู่ระหว่าง 0.6–1.0 เมตร/วินาที

2.เส้นท่อที่ 2 อัตราการไหลที่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 2,880.13–939.40 ลิตร/วินาที ขนาดท่อตั้งแต่ 900–1,600 มิลลิเมตร ความเร็วอยู่ระหว่าง 0.9–2.5 เมตร/วินาที

3.เส้นท่อที่ 3 อัตราการไหลที่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 1,950.71–939.40 ลิตร/วินาที ขนาดท่อตั้งแต่ 900–1,400 มิลลิเมตร มีความเร็วอยู่ระหว่าง 1.0–2.0 เมตร/วินาที

จะเห็นว่าความเร็วการไหลในท่อส่งน้ำมีค่ามากกว่า 0.6 เมตร/วินาที เพื่อป้องกันการตกตะกอนในท่อ และมีค่าไม่เกิน 3 เมตร/วินาที ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในเส้นท่อตามเกณฑ์การออกแบบระบบท่อส่งน้ำ

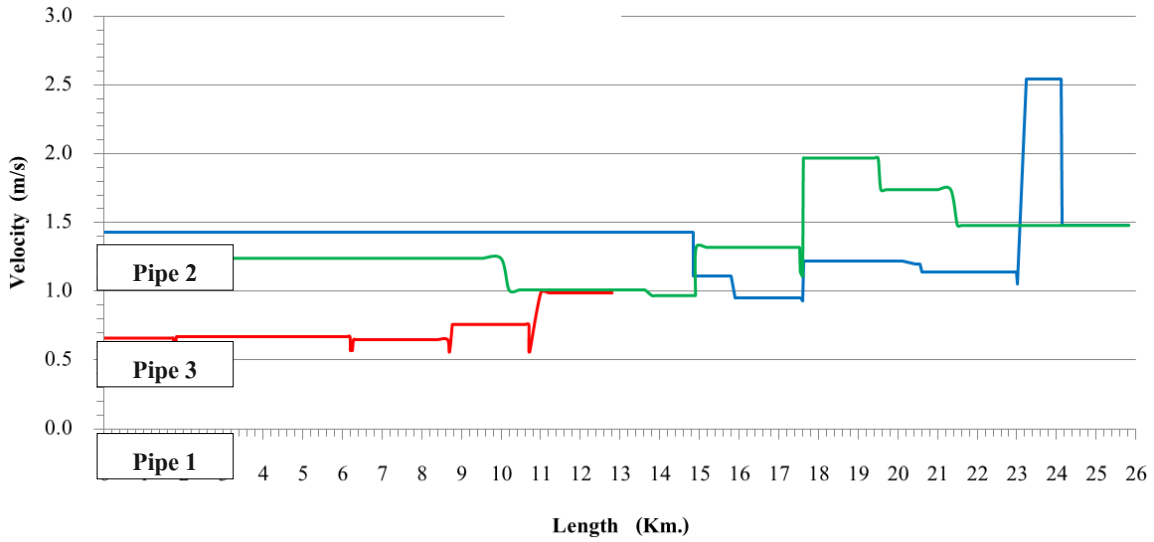


Fig. 3 Velocity in pipeline system at the present situation

3.2 กรณีที่ 2 การใช้น้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากยางพาราเป็นทุเรียนเต็มศักยภาพของท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์

สำหรับการศึกษาการใช้น้ำในอนาคตที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากยางพาราเป็นทุเรียนเต็มศักยภาพของท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์ พบว่าระบบท่อส่งน้ำสามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เพาะปลูกทุเรียนได้ ร้อยละ10 ของพื้นที่ยางพารา ทำให้พื้นที่ชลประทานฝั่งขวาเขื่อนประแสร์มีพื้นที่สำหรับเพาะปลูกทุเรียนเพิ่มขึ้นเป็น 42,946 ไร่ มีความต้องการน้ำชลประทานเท่ากับ 7,266.46 ลิตร/วินาที โดยติดตั้งเครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง อัตราสูบน้ำเครื่องละ 2,422.15 ลิตร/วินาที และความสูงแรงดันเท่ากับ 66.31 เมตร

ผลการศึกษาค่าความสูงแรงดันในระบบท่อส่งน้ำเมื่อระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติ(+35.50 ม.รทก.) และที่ระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด(+24.00 ม.รทก.) พบว่าค่าความสูงแรงดันน้ำที่จุดจ่ายน้ำต่างๆ มีค่าความสูงแรงดันอยู่ในช่วง 16.61– 82.96 เมตร ในขณะที่ระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติเส้นท่อที่ 1 จะมีค่าความสูงแรงดันสูงสุดเท่ากับ 82.96 เมตร และในขณะที่ระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักต่ำสุดจะทำให้เส้นท่อที่ 2 ที่มีค่าความสูงแรงดันต่ำสุดเท่ากับ 16.61 เมตรซึ่งจะมีความสูงแรงดันเพียงพอในการส่งน้ำเข้าพื้นที่เพาะปลูกเช่นกัน ดังแสดงใน Fig 4.

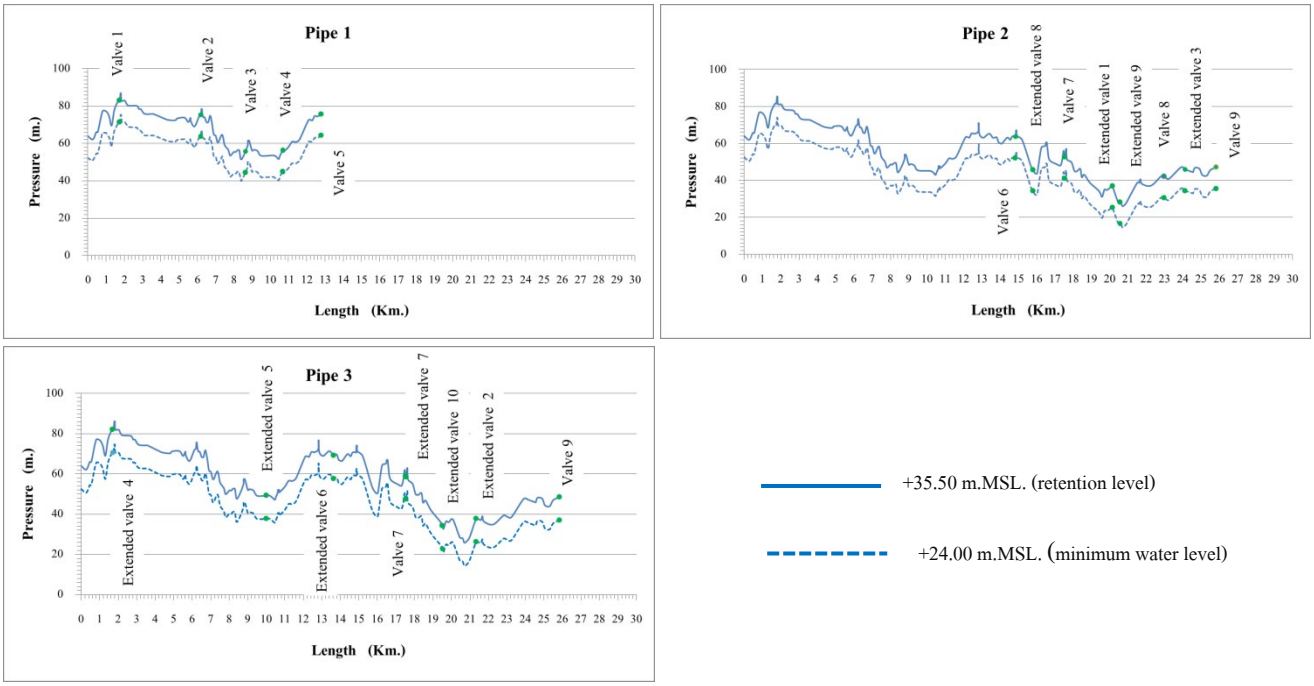


Fig. 4 Pipeline Pressure at the future situation

สำหรับผลการศึกษาความเร็วการไหลในระบบท่อส่งน้ำ พบว่าเมื่อระดับน้ำในอ่างฯอยู่ที่ระดับเก็บกักปกติ (+35.50 ม.รทก.) และระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด (+24.50 ม.รทก.) จะมีค่าความเร็วการไหลของท่อส่งน้ำเท่ากัน รายละเอียดดังนี้

1.เส้นท่อที่ 1 อัตราการไหลที่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 1,726.68–729.76 ลิตร/วินาที ขนาดท่อตั้งแต่ 900–1,600 มิลลิเมตร ความเร็วการไหลอยู่ระหว่าง 0.6–1.2 เมตร/วินาที

2.เส้นท่อที่ 2 อัตราการไหลที่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 3,507.69–1,016.55 ลิตร/วินาที ขนาดท่อตั้งแต่ 900–1,600 มิลลิเมตร ความเร็วการไหลอยู่ระหว่าง 1.1–3.0 เมตร/วินาที

3.เส้นท่อที่3 อัตราการไหลที่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 2,032.09 –1,016.55 ลิตร/วินาที ขนาดท่อตั้งแต่ 900–1,400 มิลลิเมตร มีความเร็วการไหลอยู่ระหว่าง 1.0–2.1 เมตร/วินาที

ทั้งนี้ความเร็วการไหลในท่อส่งน้ำพบว่ามีความเร็วต่ำสุดและความเร็วสูงสุดอยู่ในเกณฑ์การออกแบบท่อส่งน้ำเช่นกันดังแสดงใน Fig 5.

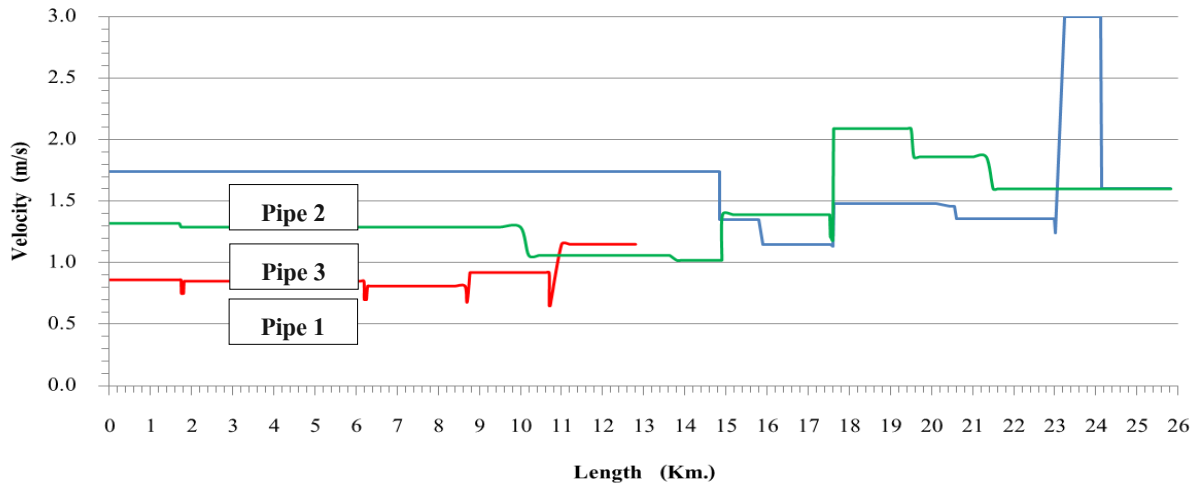


Fig. 5 Future velocity in pipeline

สรุป

ในสภาพปัจจุบันพื้นที่ชลประทานฝั่งขวาของเขื่อนประแสร์มีพื้นที่เพาะปลูกทุเรียน 36,433 ไร่ มีความต้องการใช้น้ำชลประทานค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมเท่ากับ 243.13 มม. (389 ลบ.ม./ไร่) และความต้องการใช้น้ำชลประทานรายปีเท่ากับ 1,070.00 มม. (1,712 ลบ.ม./ไร่) สำหรับความต้องการใช้น้ำชลประทานรายสัปดาห์สูงสุดเกิดในช่วงสัปดาห์ที่1–3 ของเดือนเมษายน มีค่าเท่ากับ 6.164 ลบ.ม./วินาที ในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง EPANET2.0 ในการส่งน้ำของระบบท่อส่งน้ำในสภาพปัจจุบัน พบว่าความสูงแรงดันอยู่ในช่วง 24.79 – 84.64 เมตร และความเร็วการไหลในท่อส่งน้ำอยู่ในช่วง 0.6–2.5 เมตร/วินาที โดยการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากยางพาราเป็นทุเรียนที่เต็มศักยภาพท่อส่งน้ำฝั่งขวาเขื่อนประแสร์เท่ากับร้อยละ10 ของพื้นที่ยางพารา ทำให้พื้นที่เพาะปลูกทุเรียนเพิ่มเป็น 42,946 ไร่ ความต้องการน้ำชลประทานเท่ากับ 7.266 ลบ.ม./วินาที จะมีค่าความสูงความดันอยู่ในช่วง 16.61– 82.96 เมตรและความเร็วการไหลในท่ออยู่ในช่วง 0.6-3.0 เมตร/วินาที

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาเรื่อง "การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งน้ำทางระบบท่อของอ่างเก็บน้ำประแสร์" ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.จิระวัฒน์ กณะสุต อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผศ.ดร.ณัฐ มาแจ้ง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.วรรณดี ไทยสยาม หัวหน้าภาควิชาฯ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอดจนการศึกษานี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

ฉลอง เกิดพิทักษ์. 2538. การจัดการลุ่มน้ำในประเทศไทย.ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ดุลโชติ ชลศึกษ์. 2560. การออกแบบระบบท่อทางวิศวกรรม. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ITT Grinnell Industrial Piping, Inc. 1981. Piping Design and Enginerring, 6th ed. USA.

การตรวจจับและนับจำนวนวัตถุบนสายพานลำเลียงโดยใช้ประสาทเทียม

Object detection and counting system on the conveyor using deep learning

รุ่งโรจน์ กรุงเกษม[a]*, จันทนา จันทราพรชัย[b]

Rungrot Krungkasem[a]*, Chantana Chantrapornchai[b]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบแมชชีนวิชันที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการตรวจจับวัตถุ และคัดแยก มีระบบนับจำนวนวัตถุตามประเภทบนสายพานลำเลียงที่วิ่งด้วยความเร็วต่างๆ กัน โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโรงงานจริง ทำการติดตั้งกล้องไว้ที่สายพานลำเลียง เมื่อวัตถุเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งจะทำการส่งภาพไปที่หน่วยประมวลผลและระบบจะทำการตรวจแยกประเภทและนับวัตถุ งานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกที่สามารถเรียนรู้ และสกัดคุณสมบัติของชุดข้อมูลสอนที่ข้อมูลเข้าเป็นรูปภาพ

จากผลการทดลองพบว่า ระบบแมชชีนวิชันที่ใช้ประสาทเทียม สามารถตรวจจับ คัดแยก และนับจำนวนวัตถุบนสายพานลำเลียงได้อย่างแม่นยำ ที่ความเร็วของสายพานลำเลียงต่างๆ กัน การใช้กล้องจับภาพทำให้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งเซนเซอร์เพื่อตรวจจับวัตถุเพิ่มเติม และยังสามารถนำตัวแบบไปขยายผลต่อเพื่อจับวัตถุชนิดอื่นๆ ในอนาคต

คำสำคัญ: การตรวจจับวัตถุ, การเรียนรู้เชิงลึก, เครือข่ายประสาทเทียม, แมชชีนวิชัน, สายพานลำเลียง

Abstract

This research develops the machine vision system using artificial neural networks. The system also classifies and counts the number of objects for each type on the moving conveyor. The system will be applied to the real factory by installing the proper camera on the conveyor. When the object arrives at the camera position, the image is taken and sent to process. The machine vision system will detect, classify, and count objects. The technique used in this research is deep learning where its model can be learnt and features are extracted from training data. The input training data is images. The results demonstrate the accuracy of detection using IoU and MAP on various convey moving different speed. Using camera to capture images removes the need to install the detection sensor and allows the machine vision system to be extended easily to detect different kinds of objects.

Keywords: artificial neural network, belt conveyor, deep learning, machine vision, object detection

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตเป็นอย่างมาก โดยได้มีการนำเครื่องจักรและระบบอัตโนมัติเข้ามาแทนแรงงานคน ซึ่งในภาคการผลิตที่สำคัญได้แก่ ยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ อาหารและเครื่องดื่ม ล้วนแล้วแต่มีการใช้งานระบบอัตโนมัติทั้งสิ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ซึ่งในการกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องจักรและระบบอัตโนมัตินั้น จะมีกระบวนการที่สำคัญคือ กระบวนการตรวจสอบและนับจำนวนสินค้าที่ทำการผลิต ซึ่งในปัจจุบันได้ใช้แรงงานมนุษย์ หรือระบบเซนเซอร์ในการตรวจจับสินค้าบนคอนเวเยอร์ ซึ่งพบว่ามีค่าใช้จ่ายที่สูงและอาจเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากรูปแบบการผลิตสินค้าในปัจจุบันที่ใช้การผลิตแบบยืดหยุ่น สามารถที่จะทำการผลิตสินค้าได้หลากหลายชนิดโดยใช้เครื่องจักรเดียวกัน ซึ่งจะเป็นปัญหาอย่างมากสำหรับการตรวจสอบและนับจำนวนสินค้า โดยใช้วิธีการดังกล่าว

ในบทความวิจัยนี้ ได้นำเสนอ การออกแบบสร้างระบบตรวจสอบและนับจำนวนสินค้าบนคอนเวเยอร์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเซนเซอร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ประกอบไปด้วย 1. คอมพิวเตอร์ (Computer) 2. กล้องเว็บแคม (Webcam Camera) 3. สายพานลำเลียง (Conveyor) 4. เครื่องมือ (Tool) 5. ชิ้นงาน (Parts)



Fig. 1 Equipment and installation

การเตรียมข้อมูลสำหรับฝึกสอน (Data preparation)

ในการเตรียมข้อมูลสำหรับฝึกสอนโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) นั้น เราได้เตรียมข้อมูลเป็นภาพขวดน้ำดื่มจำนวน 1,130 ภาพ โดยแบ่งเป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอน 1000 ภาพ และ ข้อมูลสำหรับการทดสอบ 130 ภาพ โดยเราจะทำการใส่ฉลาก (label) เพื่อระบุประเภท (class) และตำแหน่งของวัตถุที่ใช้ในการฝึกสอน

Table 1 Split images for train and test

	Type	Images
Training	bottle picture	1,000
Testing	bottle picture	130

เพื่อป้องกัน การเรียนรู้เกิน (over fit) ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับแต่ง เพิ่มข้อมูลให้ภาพโดยการใส่ สิ่งรบกวน (noise) และปรับแสงสว่าง เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพที่หลากหลาย ทำให้โมเดลที่สอนมีความแม่นยำมากขึ้น

(A) (B)



Fig. 2 Add noise in picture (A), add light in picture (B)

การปรับแต่งโมเดล (Model tuning)

เพื่อลดระยะเวลาในการฝึกสอนโมเดล เราจะใช้เทคนิค การถ่ายโอนการเรียนรู้ (transfer learning) (Nwdunlap,2019) โดยจะทำการถ่ายโอน จาก YOLOv3 weight (Redmon, 2013) จากนั้นเราจะทำการปรับแต่ง และตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลที่เรารวบรวมมา

Table 2 Parameter for fine tuning

Parameter	Value
Input resolution	416 × 416
channels	3
Batch size	64
Learning rate	0.001
Number of filters in the last layer of each yolo layers	18
Number of output classes	1

การตรวจจับและนับจำนวน (Detection and counting)

หลังจากที่เราทำการฝึกสอนโมเดลแล้ว ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำโมเดลที่ทำการฝึกสอนแล้วมาใช้งาน โดยการทำงานของโปรแกรมเป็นดังภาพ Fig. 3

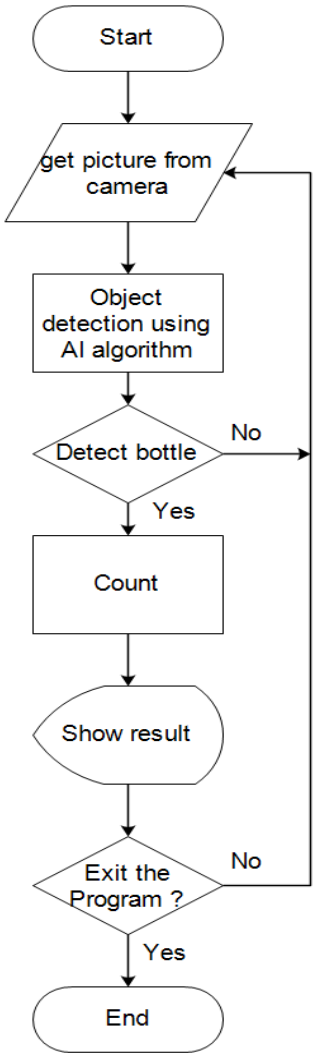


Fig. 3 Flowchart diagram

ในการตรวจจับขวดน้ำดื่มที่ไหลมาตามคอนเวเยอร์นั้น เราจะใช้อัลกอริทึม yolo ในการตรวจจับ ซึ่ง yolo มีโครงสร้างโมเดลตาม Fig. 4

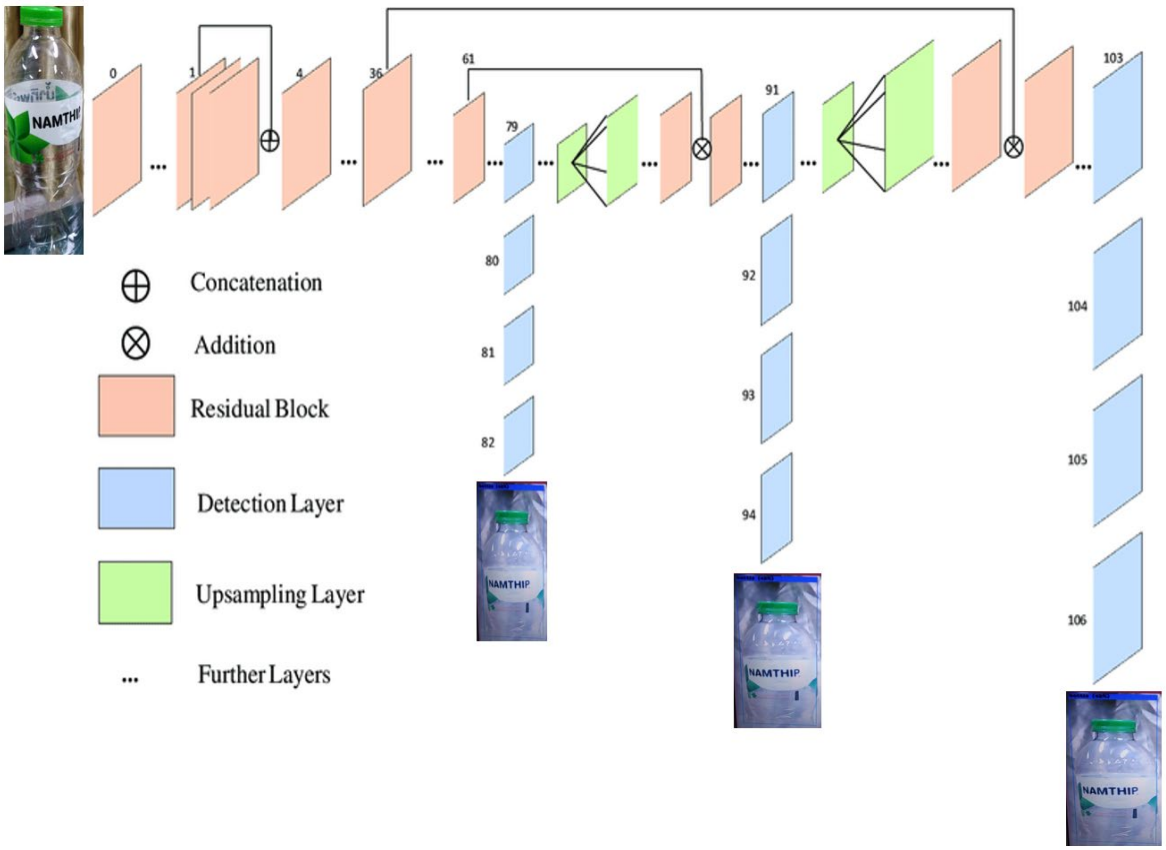


Fig. 4 Yolov3 architecture (Redmon, 2013)

อัลกอริทึม yolo (Redmon, 2013) เป็นการเรียนรู้เชิงลึกซึ่งใช้วิธีการที่เรียกว่า Fast single shot detection ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถตรวจจับวัตถุได้จากการส่งผ่านรูปภาพเข้าไปในระบบเพียงครั้งเดียว โดยใช้หลักการโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ซึ่ง yolo ที่เราใช้นั้นเป็นรุ่น 3 มีจำนวนชั้นทั้งสิ้น 106 ชั้น ซึ่งในแต่ละชั้นจะมีการทำงานที่แตกต่างกัน ประกอบไปด้วย ชั้นคอนโวลูชัน ชั้นของการเพิ่มอัตราสุ่ม ชั้นของการทำนายผล ซึ่งโครงสร้างจะเป็นดังภาพ Fig. 4

อัลกอริทึม yolo จะจำแนกวัตถุ (classification) ซึ่งก็คือขวดน้ำดื่ม และจะดำเนินการหาตำแหน่งของวัตถุ (localization) โดยใช้กรอบ (bounding box) ล้อมขวดน้ำเอาไว้ โดยจะทำไปพร้อมๆกัน ซึ่งในกระบวนการทำงานจะไม่ได้ทำทั้งภาพ แต่จะแบ่งภาพออกเป็นส่วนๆ ส่งผลให้ได้ความเร็วในการประมวลผลที่มากขึ้น

ขั้นตอนการทำงานของ yolo จะแบ่งรูปภาพออกเป็นส่วนๆ จากนั้นทำการเลื่อนการคำนวณไปทีละจุดตามที่แบ่งไว้ (sliding windows) พร้อมกับคำนวนหาว่าวัตถุจะมีอยู่จริงหรือไม่ โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นของวัตถุที่ปรากฏบนพื้นที่นั้นๆ ด้วยกระบวนการ intersection over union (IoU) ในการทำนายกรอบล้อมวัตถุจะได้ข้อมูลเป็นชุดข้อมูลประเภทอาร์เรย์ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลการมีอยู่จริงของวัตถุ ตำแหน่งและขนาดของกรอบล้อมวัตถุ และชนิดของวัตถุ ซึ่งจากหลักการที่ได้กล่าวมานี้ เราจะนำมาใช้ในการตรวจจับและแยกชนิดของขวดน้ำดื่มบนสายพานคอนเวเยอร์

การนับจำนวนขวดน้ำ เราจะตีกรอบสี่เหลี่ยมเพื่อเป็นเส้นอ้างอิง (reference line) ในการส่งสัญญาณให้โปรแกรมเก็บค่าและนับจำนวนขวดน้ำที่ผ่านกรอบสี่เหลี่ยมนี้ โดยเมื่อขวดน้ำดื่มไหลผ่านเข้ามาในกรอบสี่เหลี่ยม

yolo จะทำการตรวจจับและทำนายผล (prediction) ถ้าค่าที่ทำนายสูงเกินค่าความมั่นใจ (confidence) ที่เราตั้งค่าเอาไว้ที่มากกว่า 70% โปรแกรมจะแสดงฉลากชื่อ (label name) เมื่อขวดน้ำเคลื่อนที่ผ่านเส้นด้านซ้ายของกรอบสี่เหลี่ยม โปรแกรมจะทำการนับและบันทึกค่าเข้าสู่ระบบ เป็นดัง Fig. 5

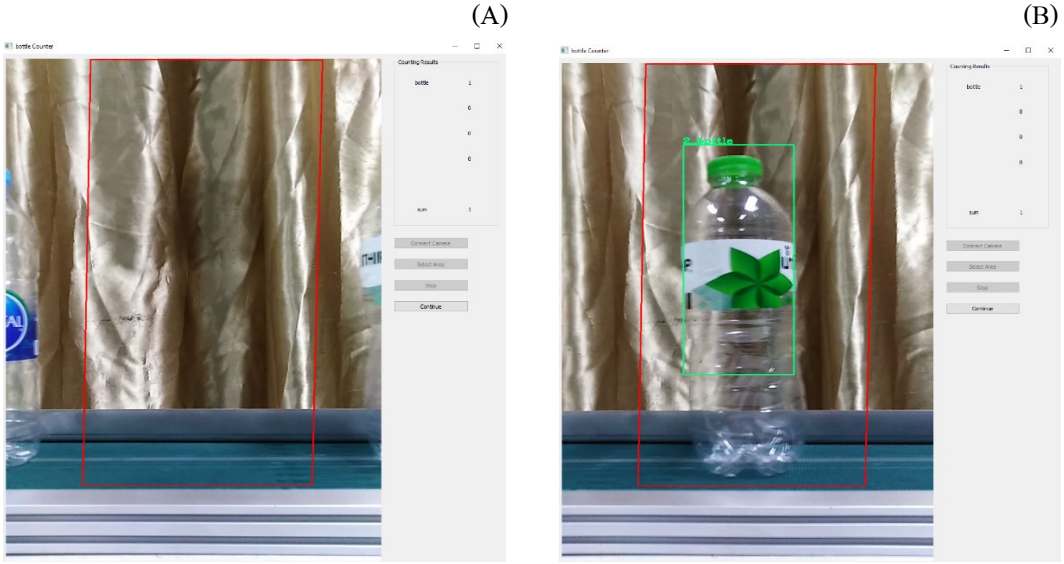


Fig. 5 Line reference on conveyor (A), prediction and counting bottle (B)

ในการนับจำนวนขวดน้ำนั้นเราได้ใช้ อัลกอริทึม simple online and realtime tracking (sort) (Bewley, 2016) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักในการตรวจจับวัตถุในแต่ละเฟรมและเชื่อมโยงความสัมพันธ์สำหรับการติดตามแบบเรียลไทม์ โดยได้ประยุกต์ใช้วิธีการของ Kalman filter และ Hungarian สำหรับการติดตามตำแหน่ง

ลักษณะเด่นของ sort คือ ใช้ข้อมูลการตรวจจับ เฟรมก่อนหน้าและปัจจุบันเท่านั้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการติดตามวัตถุได้แบบเรียลไทล์ ซึ่งจากจุดเด่นตรงนี้เราจึงเลือกใช้ในการตรวจนับขวดน้ำที่เลื่อนเข้ามาในกรอบสี่เหลี่ยมที่เราได้ทำการตีกรอบเอาไว้ เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณให้โปรแกรมทำการนับจำนวน และป้องกันการนับซ้ำ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการหาค่าความแม่นยำของระบบตรวจจับและนับจำนวนวัตถุบนคอนเวเยอร์ โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม โดยวัตถุที่เราทำการตรวจจับจะเป็นขวดน้ำดื่ม ซึ่งเราจะทำการทดสอบหาค่าความแม่นยำที่ความเร็วของคอนเวเยอร์ที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 1 เมตร/นาที และ 3 เมตร/นาที โดยทำการทดสอบอย่างละ 20 ครั้งแล้วบันทึกผล

Table 3 Detection results and count at speed 1 m/min

Time trial	Classification	Counting
	0 (False) ,1 (True)	0 (False) ,1 (True)
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	1	1
20	1	1
Sum	20	20
Accuracy (%)	100%	100%

Table 4 Detection results and count at speed 3 m/min

Time trial	Classification	Counting
	0 (False) ,1 (True)	0 (False) ,1 (True)
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	0	0
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	1	1
20	1	1
Sum	19	19
Accuracy (%)	95%	95%

สรุป

จากผลการทดลองพบว่าที่ความเร็วคอนเวเยอร์ 1 เมตรต่อนาที มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกวัตถุและความแม่นยำในการตรวจนับเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วคอนเวเยอร์ 3 เมตรต่อนาที มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกและความแม่นยำในการตรวจนับเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากข้อมูลการทดลอง พบว่าให้ค่าความแม่นยำที่สูงมาก เมื่อเทียบกับฮาร์ดแวร์ที่ใช้ ซึ่งจะช่วยลดการพึ่งพาอุปกรณ์จำพวกเซนเซอร์ลงได้ การที่จะทำให้ระบบตรวจจับมีความแม่นยำนั้น ข้อมูลที่นำมาใช้สอน ถือได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะสภาพแวดล้อมในการนำไปใช้งานจริงนั้นแตกต่างจากในห้องแลปทดลอง โดยเฉพาะปัญหาเรื่องแสง ผู้วิจัยขอเสนอแนะเทคนิคการใส่แสงและค่าความแปรปรวนให้ภาพ เพื่อให้โมเดลได้เรียนรู้จากข้อมูลที่หลากหลาย ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นต่อการนำไปใช้ในสถานที่มีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จันทนา จันทราพรชัย ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณนรากร ราชพลสิทธิ์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Nwdunlap. 2019. Introduction to neural networks with Brain.js, https://dev.to/nwdunlap17/introduction-to-neural-networks-with-brain-js-4i80, 10 February 2021.

Redmon. 2013. You only look once: Unified real-time object detection, https://github.com/AlexeyAB/darknet, 10 February 2021.

Bewley, A. 2016. Simple online and realtime tracking, https://arxiv.org/abs/1602.00763, 26 March 2021.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
Subject: Agro-Industry

ภาคบรรยาย
Oral Presentation

ผลของการรมโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยสด (*Dimocarpus longan* Lour.)

Effect of ozone-vertical forced air fumigation on postharvest quality of fresh longan (*Dimocarpus longan* Lour.)

สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ[a], จตุรภัทร วาฤทธิ์[a]*, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ[a], ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร[a], ศรัลยภัคร์ ชำนาญ[a], พิสุทธิ์ กลิ่นขจร[b], จักรพงษ์ พิมพ์พิมล[c]

Suthathip Wongphansuea[a], Jaturapatr Varith[a]*, Somkiat Jaturonglumlert[a], Chanawat Nitatwichit[a], Saranyapak Chamnan[a], Pisuthi Klinkajorn[b], Jakraphong Phimpimol[c]

[a]หลักสูตรวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[b]หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[c]หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[a]Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiangmai 50290, Thailand.

[b]Agricultural Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiangmai 50290, Thailand.

[c]Postharvest Technology Program, Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiangmai 50290, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: varithj@gmaejo.mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งต่อคุณภาพของลำไยสด โดยทำการรมลำไยสดครั้งละ 9 กก. ด้วยแก๊สโอโซนความเข้มข้น 2000, 4000, 6000 ppm เป็นเวลา 20 นาที ไหลผ่านตะกร้าในแนวตั้งด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.5 m/s หลังจากนั้นลำไยจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1°C ผลการศึกษาพบว่าการรมแก๊สโอโซนทุกตัวอย่าง สามารถชะลอการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกลำไยได้ การสูญเสียน้ำหนักและความแน่นเนื้อตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาลำไยเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่าดัชนีสี L* และ b* ของลำไยที่รมแก๊สโอโซนมีค่าสูงกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซน การรมแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งที่ความเข้มข้น 2000 ppm เป็นเวลา 20 นาที สามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้จาก 12 เป็น 27 วัน

คำสำคัญ: การยืดอายุการเก็บรักษา, แก๊สโอโซน, ระบบบังคับอากาศแนวตั้ง, ลำไยสด

Abstract

The objective of this work was to study the effects of ozone-vertical forced air fumigation on quality of fresh longan. Gaseous ozone with concentrations of 2000, 4000, 6000 ppm for 20 min was applied on a 9 kg-batch of longan with flow velocity of 0.5 m/s and then stored at 4±1°C. Results indicated that the sample of all ozone fumigation was able to retard the disease incidence and pericarp browning of longan. The weight loss and firmness of longan during shelf storage slightly changed but not significantly different ($p > 0.05$). The L* and b* of ozonated longans were higher than that of the non-ozone. The ozone-vertical forced air fumigation at 2000 ppm for 20 min was able to extend the shelf life of longan from 12 up to 27 days

Keywords: fresh longan, gaseous ozone, shelf-life extension, vertical forced-air fumigation

คำนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีสำคัญมากมีปริมาณการส่งออกต่อปีสูงถึง 70,000 ตัน ตลาดหลักของการส่งออกลำไยสด ได้แก่ จีน เวียดนาม ฮ่องกง มาเลเซีย และสิงค์โปร์ ซึ่งการส่งออกลำไยสดนั้นจะต้องคำนึงถึงคุณภาพของลำไยที่ส่งออก โดยทั่วไปแล้วการควบคุมคุณภาพของลำไยสด จะมีการควบคุมการเสื่อมสภาพหลังการเก็บเกี่ยวควบคุมคุณภาพของลำไยสด คือการรมด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่เมื่อไม่นานมานี้ประเทศผู้นำเข้าอย่างเช่น สาธารณรัฐประชาชนจีนได้ทำการกำหนดระดับการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไว้ 50 ppm มาเลเซียและแคนาดาได้ปรับกฎระเบียบเกี่ยวกับการนำเข้าลำไยโดยการลดระดับการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลือเพียง 10 ppm เพราะซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างส่งผลเสียอย่างมากต่อร่างกายของผู้บริโภค สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ (2559) จากการศึกษาวิธีการรมลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องรมลำไยด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้งนั้น มีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในกระบวนการรมผลลำไยสด เพราะสามารถลดระดับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้เหลือเพียง 4,000 ppm โดยยังคงป้องกันการเกิดโรคและการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยได้ไม่ต่ำกว่า 20 วัน ระหว่างเก็บรักษาและช่วยให้ผลลำไยมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเนื้อลำไยไม่เกิน 8 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์สูงสุดที่ประเทศแคนาดาได้กำหนดไว้ที่ 10 ppm และ สาธารณรัฐประชาชนจีนกำหนดไว้ที่ 50 ppm อีกทั้งยังไม่พบการตกค้างในเนื้อลำไยหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วัน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2558)

โอโซน คือสารชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากออกซิเจนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศ แก๊สโอโซนมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงแต่สามารถใช้ได้ปลอดภัยกับอาหาร (Generally Recognized As Safe) แก๊สโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลของไขมัน เยื่อเมมเบรนที่มีสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตทำให้ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอ่อนแอและแตกสลาย (สุรินทราพร และคณะ, 2559) จึงมีการนำโอนโซนมาใช้ประโยชน์ เช่นการนำไปใช้กำจัดเชื้อจุลินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อราต่าง ๆ การฆ่าเชื้อโรค และกำจัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ติดมากับผักและผลไม้ โอโซนผ่านการรับรองจากกระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (USDA) ด้วยข้อกำหนดมาตรฐานที่เรียกว่า “โดยทั่วไปถือว่าปลอดภัย” (GRAS) จนกระทั่งเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2544 สำนักงานคณะกรรมอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. FDA) ได้ยอมรับโอโซนทั้งในสถานะแก๊ส และของเหลวอย่างเป็นทางการ ดังนั้นจึงเห็นถึงการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้กับระบบดังกล่าวเนื่องจากการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอนาคตอาจเป็นสิ่งต้องห้ามหรือยกเลิกเนื่องจากมีการคำนึงถึงความปลอดภัยทางอาหาร (Food Safety) มากขึ้น ดังนั้นโอโซนจึงเป็นอีกทางเลือกของเทคโนโลยีในอนาคตในการรักษาคุณภาพลำไยหลังการเก็บเกี่ยว

ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในด้านการนำแก๊สโอโซนมาประยุกต์ใช้กับระบบการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศ โดยจะศึกษาระบบการรมลำไยด้วยแก๊สโอโซนด้วยระบบบังคับอากาศแนวตั้ง ศึกษาความเข้มข้นของปริมาณโอโซนและเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในขนาดห้องทดลองเพื่อนำไปปรับประยุกต์ใช้ในขนาดอุตสาหกรรม โดยหวังว่าระบบการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนร่วมกับระบบบังคับอากาศแนวตั้งจะช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาลำไยสด และมีประโยชน์ต่อการใช้แก๊สโอโซนในการรมลำไยสดเพื่อรักษาคุณภาพของลำไยทดแทนการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในขนาดอุตสาหกรรมเพื่อตลาดการส่งออกลำไยสดในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

ลำไยสด (เกรด AA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 mm.) จากเกษตรกรในจังหวัดเชียงใหม่ โดยจะบรรจุใส่ตะกร้าและมีขนส่งโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการขนส่ง ลำและไยจะต้องผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วไม่เกิน 3 วัน จากนั้นจะลำไยสดนำมาตัดแต่งคัดแยกผลที่ติดโรคหรือมีเชื้อราออกทิ้ง จำนวน 9 kg

ระบบการรมแก๊สโอโซน

แก๊สโอโซนถูกสร้างขึ้นที่อัตราการผลิตโอโซน 5.5 g /hr. ผ่านเครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้เครื่อง Corona discharger ที่มีอัตราการไหลเข้าของแก๊สออกซิเจน 7.5 L/min (Sintuya et al., 2018). และระบบจะเชื่อมต่อกับห้องรมแก๊สที่มีขนาด 100 m^3 ภายในตู้รมจะมีระบบการหมุนเวียนอากาศแบบแนวตั้งโดยจะใช้การหมุนเวียนที่ความเร็วลม 0.5 m/s ดังแสดงใน Fig. 1

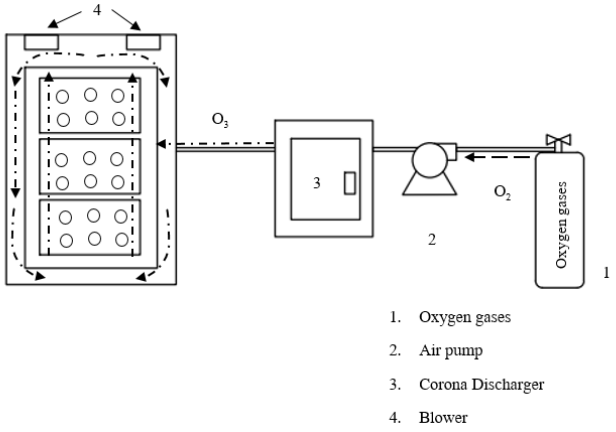


Fig. 1 Ozone-vertical forced air fumigation system

การรมด้วยแก๊สโอโซน

โดยการรมลำไยสดด้วยแก๊สโอโซนจะทำการจัดเรียงลำไยลงในตะกร้าขนาดตะกร้าละ 3 กิโลกรัมจำนวน 3 ตะกร้าและหลังจากนั้นนำมาจัดวางเรียงเป็นแบบแนวตั้งภายในตู้รม ตู้รมโอโซนจะเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊สโอโซนเมื่อทำการจัดเรียงลำไยเสร็จแล้วจะทำการปิดตู้และเริ่มเปิดแก๊สโอโซน โดยตัวอย่างลำไยสดจะถูกรมด้วยแก๊สโอโซนที่มีความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm เป็นเวลา 20 นาทีหลังจากนั้นจะทำการดูดแก๊สโอโซนออกจากตู้และนำลำไยออกมาระบายความร้อน และตัวอย่างลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยโอโซนจะถูกแยกออกเป็นตัวควบคุม หลังจากการรมด้วยแก๊สโอโซนตัวอย่างลำไยสดทั้งหมดจะบรรจุในถุงพลาสติก High Density Polyethylene (Chamnan et al., 2019) และเก็บรักษาในตู้ทำความเย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 1° C และจะทำการวัดคุณภาพของลำไยสดในทุก ๆ 3 วัน ตลอดอายุการเก็บรักษา

การตรวจสอบอุบัติการณ์ของโรค

การกำหนดอัตราการเกิดโรคโดยจะทำการวัดพื้นที่ของเชื้อราบนผิวผลลำไยตัวอย่างละ 10 ลูกจำนวน 3 ซ้ำ และจะให้คะแนนเป็น 6 ระดับคือ ระดับ 0 = ไม่มีการเกิดโรคระดับ 1 = 1-20% ระดับ 2 = 21-40% ระดับ

3 = 41-60% ระดับ 4 = 61-80% และระดับ 5 = 81-100% และหากค่าที่ประเมินมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.20 จะถือว่าไม่เป็นที่ยอมรับสำหรับตลาด

การเกิดสีน้ำตาลที่เปลือก

การเกิดผิวสีน้ำตาลบนเปลือกลำไยสด จะการวัดพื้นที่สีน้ำตาลที่ปรากฏบนเปลือกลำไยจากการเสื่อมสภาพของลำไยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาตัวอย่างละ 10 ลูกจำนวน 3 ซ้ำ โดยจะให้คะแนนเป็น 5 ระดับ คือ ระดับ 1 = 0 -20% ระดับ 2 = 21-40% ระดับ 3 = 41 - 60%, ระดับ 4 = 61- 80% และ ระดับ 5 = 81- 100%

การสูญเสียน้ำหนัก

ตัวอย่างลำไยจะมีค่าน้ำหนักเริ่มต้นที่ 300 g สำหรับการวัดการสูญเสียน้ำหนักจะใช้เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่งที่มีความแม่นยำ ± 0.1 กรัม (รุ่น SF-400A, Micro Precision, China) หลังจากชั่งน้ำหนักลำไยจะถูกเก็บรักษาที่ตู้เก็บอุณหภูมิ 4 ± 1° C ลำไยที่ผ่านการรมชุดเดียวกันจะถูกชั่งน้ำหนักซ้ำ ๆ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาจำนวน 3 ซ้ำ และนำค่ามาวัดการสูญเสียน้ำหนัก ตาม Equation 1

$$\text{Weight loss}\,(\%) = \frac{(\text{Initial weight} - \text{final weight})}{\text{Initial weight}} \times 100 \qquad (1)$$

การวิเคราะห์คุณภาพสี

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีลำไย 10 ลูกจากตัวอย่างจะถูกเลือกแบบสุ่มโดยที่แต่ละผลจะถูกทดสอบของเปลือกนอกของลำไยโดยใช้เครื่องวัดสีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus การ วิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วย 37 ระบบ CIE โดยการวิเคราะห์วัดสีในเทอมของค่าความสว่าง (L*) และค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (b*) จำนวน 3 ซ้ำ

การวัดความแน่นเนื้อ

การวิเคราะห์ความแน่นเนื้อ ผลลำไย 10 ลูกจากตัวอย่างจะถูกเลือกแบบสุ่มโดยที่แต่ละผลจะถูกทดสอบแบบแทงทะลุด้านแก้มผลจำนวน 3 ซ้ำโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer with ± 0.1 g Accuracy (model TA.XT-PLUS, Stable Micro Systems, UK) การทดสอบความแน่นเนื้อจะใช้หัววัดแบบ Cylinder Plunger SMS-P/2 probe (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm) ด้วยอัตราแรงกด 20%strain ความเร็ว Pre-test, Test, และ Post-test เท่ากับ 3 mm/s 3 mm/s และ 10 mm/s ตามลำดับความแน่นเนื้อหาได้จากค่าแรงสูงสุดที่หัวกดทะลุผ่านเปลือกและเนื้อลำไย

การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการออกแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) และผลการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ Duncan's Multiple Range Tests. (DMRT) กำหนดค่าความเชื่อมั่นไว้ที่ 95% และความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของโอโซนต่ออุบัติการณ์ของโรคในผลลำไย

พารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับอายุการเก็บรักษาลำไยสด เพราะการอุบัติการณ์ของโรคสามารถกำหนดระยะเวลารักษาคุณภาพของลำไยได้เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แสดงดัง Fig. 2. ให้เห็นว่าอุบัติการณ์ของโรคในตัวอย่างควบคุมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 12 วัน และตัวอย่างลำไยที่ได้รับการรมด้วยโอโซน มีการอุบัติการณ์ของโรคน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบำบัดเมื่อเก็บไว้ที่ 4 ± 1° C สิ่งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gabler et al. (2010) ที่พบว่าการมด้วยโอโซนช่วยลดการเกิดอุบัติการณ์ของโรคได้ถึง 65% ในองุ่น และนักวิจัยอื่นก็ได้รายงานด้วยว่าการรมโอโซนช่วยลดจำนวนจุลินทรีย์ในผลไม้ลงได้ เช่น ผลไม้กีวี Minas et al. (2010) แอปเปิ้ล ฟูจิ Sheng (2018) เนื่องจาก โอโซนเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ Victorin (1992) ในการศึกษาผลลำไยเมื่อเปรียบเทียบกับโอโซนที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนและที่ไม่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซน ส่งผลให้ลำไยที่ผ่านการรมโอโซนแล้วมีการเกิดอุบัติการณ์ของโรคน้อยกว่า

ผลของโอโซนต่อการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก

การเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก แสดงด้วยดัชนีการเกิดสีน้ำตาล แสดงดัง Fig. 2 การรมโอโซนผลลำไยสดจะช่วยลดดัชนีการเกิดสีน้ำตาลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนจะเห็นได้ว่าลำไยที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนที่ 2,000 4,000 และ 6,000 ppm มีการเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1°C ในวันที่ 0 ผลลำไยสดที่รมด้วยแก๊สโอโซนที่ความเข้ม 6,000 ppm แสดงให้เห็นว่ามีสีน้ำตาลในบนเปลือกน้อยกว่าผลลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นได้ว่ามีการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นการรมโอโซนที่ความเข้มข้นสูงทำให้ลำไยมีการสูญเสียคุณภาพจึงทำให้มีการเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 12 วันสอดคล้องกันกับ Whangchai et al. (2006) ลำไยสดที่ได้รับโอโซนร่วมกับกรดออกซาลิกจะมีการเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมแก๊สโอโซน

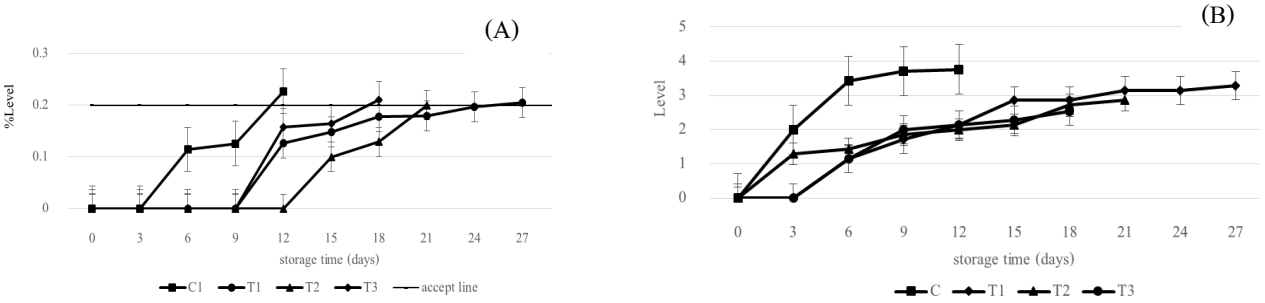


Fig. 2 Effect of ozone on Disease incidence (A), Pericarp browning (B) of longan fruit during storage at 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

ผลของโอโซนต่อการสูญเสียน้ำหนัก

การรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจน ต่อการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ถูกรมด้วยแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm เป็นเวลา

20 นาที ในช่วง 18 วันในการเก็บรักษาผลลำไยที่ได้รับโอโซนจะมีน้ำหนักลดลงมากกว่าผลไม้ที่ไม่ได้รับการรมด้วยโอโซน ตัวอย่างผลไม้ที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน 6,000 ppm มีน้ำหนักลดลงสูงสุด 1.42% ใน 18 วัน แสดงดัง Fig. 3 ผลการทดลองเหล่านี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Chamnan (2019) ที่ว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนในสภาวะความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อยไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของผลลำไยสด และ Whangchai et al. (2006) ลำไยสดที่ได้รับโอโซนจะไม่มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

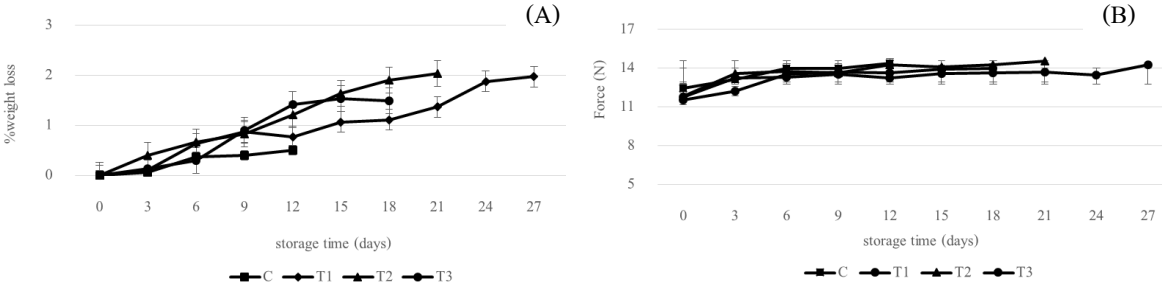


Fig. 3 Effect of ozone on Weight loss (A), Firmness (B) of longan fruit during storage at 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)

ผลของโอโซนต่อความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อสามารถกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับความแข็งแรงของผนังเซลล์ของผลลำไยซึ่งอาจมีผลต่อการรมด้วยแก๊สโอโซน พบว่าการรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ได้ส่งผลต่อความแน่นเนื้อลำไยสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1°C ความแน่นเนื้อของลำไยอยู่ในช่วง 11.56 ถึง 14.55 N แสดงดัง Fig. 4 ผลลำไยสดมีเปลี่ยนความแน่นเนื้อเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการทดของสอดคล้องกับ Martín et al. (2018) รายงานว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในค่าความแน่นเนื้อระหว่างส้มที่ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนและการรมด้วยแก๊สโอโซนไม่ส่งผลต่อคุณภาพความแน่นเนื้อของผลส้ม เช่นเดียวกับ ผลไม้กีวี Minas et al. (2010) แอปเปิ้ลฟูจิ Sheng (2018) ที่สรุปว่าผลของการรมโอโซนไม่ได้ส่งผลอย่างต่อความแน่นของผลไม้

ผลของโอโซนต่อสี

สีเป็นปัจจัยหนึ่งในการตัดสินคุณลักษณะทางกายภาพสำหรับการซื้อขายผลลำไยสดพบว่าทันทีหลังจากการรมโอโซน (วันที่ 0) ผลลำไยที่ควบคุมมีค่า L* และ b* เพิ่มขึ้นจาก 50.37 และ 32.54 เพิ่มขึ้นเป็น 58.47 และ 36.11 สาเหตุที่ค่า L* ของลำไยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากผลจากฤทธิ์การฟอกขาวของโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง Forney (2003) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1°C ลำไยที่รมแก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm มีค่า L* และ b* สูงกว่าลำไยควบคุม และมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานกว่าลำไยคบคุมที่มีสีน้ำตาลเข้มโดยจะเห็นได้ว่าลำไยที่ผ่านการรมที่ความเข้ม 6,000 ppm จะมีค่า L* สูงที่สุดแต่มีค่า b* ต่ำสุด ผลเนื่องจากเกิดจากเนื่องจากผลจากฤทธิ์การฟอกขาวของโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง แสดงดัง Fig. 4 ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chamnan (2019) ซึ่งรมแก๊สโอโซนกับลำไยภายใต้สภาวะความดันสูงกว่าบรรยากาศและเก็บในบรรจุภัณฑ์มี L* และ b* (สีเหลืองน้ำตาลอ่อน) สูงกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนและอายุการเก็บรักษานานกว่าลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมแก๊สโอโซนเช่นเดียวกัน และผลของสีการฟอกขาวของ

โอโซนเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากฤทธิ์ของโอโซนส่งผลให้เปลือกของลำไยสว่างขึ้น ดังแสดง Fig. 5 เมื่อเปรียบเทียบกับลำไยที่ไม่ได้ผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซน

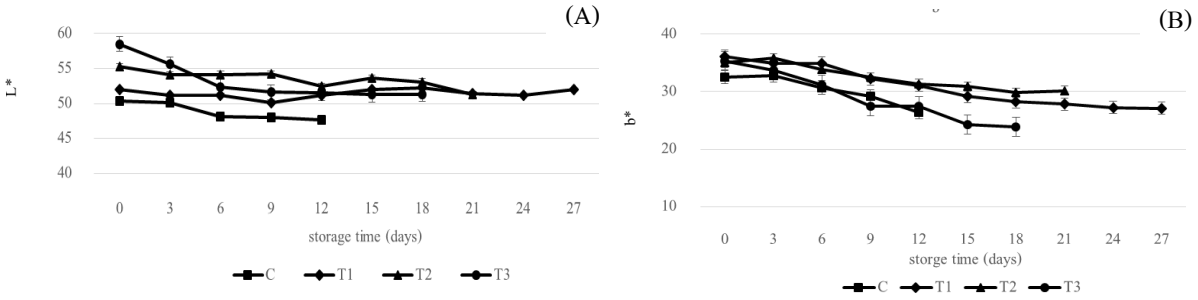


Fig. 4 Effect of gaseous ozone and on color L* value (A), b* value (B) of longan fruit during storage at 4±1°C (C = Non, T1 = 2,000, T2 = 4,000, T3 = 6,000 ppm)



A B C D

Fig. 5 Effect of gaseous ozone and on color (A = Non, B = 2,000, C = 4,000, D = 6,000 ppm)

ผลของการรมแก๊สโอโซนต่ออายุการเก็บรักษาลำไย

แก๊สโอโซนสามารถยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสดได้และผลของการรมโอโซนที่ความเข้มต่างกันส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและคุณภาพของลำไย จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 4,000 และ 6,000 ppm ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาของลำไยต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากการรมโอโซนที่ความเข้มข้น 2,000 ppm เป็นเวลา 20 นาทีหรือเทียบเท่าที่โดสความเข้มข้น CT (Concentration x Time) เท่ากับ 40,000 ppm.min สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ยาวนานที่สุดถึง 27 วัน เพราะคุณสมบัติของโอโซนมีฤทธิ์ทำลายเนื้อเยื่อผนังเซลล์ที่มีน้ำ โอโซนไปทำลายเนื้อเยื่อบริเวณเปลือกของลำไย ทำให้มีการเกิดเชื้อราได้ยากมากกว่าลำไยที่รมด้วยความเข้มข้นสูงกว่าที่จะส่งผลต่อเนื้อเยื่อเปลือกของลำไย ทำให้การรมลำไยที่ความเข้มข้น 2,000 ยืดอายุได้สูงสุดเพราะไม่ส่งผลทำลายคุณภาพด้านเปลือกนอกของลำไยสด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chamnan (2019) ซึ่งรมแก๊สโอโซนกับลำไยภายใต้สภาวะความดันสูงกว่าบรรยากาศ ที่โดสความเข้มข้น CT คือ 40,000 ppm.min สามารถยืดอายุของลำไยสดได้นานที่สุด

สรุป

แก๊สโอโซนสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและไม่ส่งผลต่อคุณภาพความสดของลำไยสด เช่น การเกิดอุบัติการณ์ของโรค การเกิดสีน้ำตาล และสีเปลือกของผลลำไยสด โดยผลลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมโอโซนมีอุบัติการณ์ของโรคอย่างเร็ว และเกิดสีน้ำตาลบนเปลือกมากกว่าลำไยที่ผ่านการรมแก๊สโอโซน ลำไยที่ผ่านการรมแก๊สโอโซนไม่มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ มี L * และ b * น้อยกว่าเมื่อการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 วัน ลำไย

ที่ผ่านการรมด้วยโอโซนที่ความเข้ม 2,000 ppm จะมีการเกิดอุบัติการณ์ของโรคช้ากว่า ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาของผลลำไยได้นานขึ้น สูงสุดถึง 27 วัน และควรจะต้องศึกษาเกี่ยวกับความเร็วลมในระบบเพิ่มเติมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2558. ห้องรมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์. https://www.mhesi.go.th/8 กุมภาพันธ์ 2563.

สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ. 2559. รายงานการส่งออกระหว่างประเทศ (ลำไย). https://www.ditp.go.th/, 8 กุมภาพันธ์ 2563.

สุรินทราพร ชั่งไชย, จตุรภัทร วาฤทธิ์, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, กาญจนา นาคประสม, ณัฏฐ์พัชร เถียรวรกานต์, พิสุทธิ์ กลิ่นขจร. 2559. การใช้แก๊สโอโซนในการกำจัดหนอนแมลงวันผลไม้ (Bactrocera latifrons) ในพริก. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร. 33: 13–23.

Chamnan, S., Varith, J., Jaturonglumlert, S., Klinkajorn, P., Phimphimol, J. 2019. The effect of packaging materials on the quality of freshness of longan fumigated with medium concentration-ozone gas. Pertanika Journal of Science and Technology 27: 159–168.

Forney, C.F. 2003. Postharvest response of horticultural products to ozone. In: Hodges, D.M. (Ed.). Postharvest oxidative stress in horticultural crops. Food Products Press. Binghamton, NY, USA. pp. 13–54.

Gabler, F.M., Smilanick, J.L., Mansour, M.F., Karaca, H. 2010. Influence of fumigation with high concentrations of ozone gas on postharvest gray mold and fungicide residues on table grapes. Postharvest Biology and Technology 55: 85–90.

Minas, I.S., Karaoglanidis, G.S., Manganaris, G.A., Vasilakakis, M. 2010. Effect of ozone application during cold storage of kiwifruit on the development of stem-end rot caused by Botrytis cinerea. Postharvest Biology and Technology 58: 203–210.

Martín, J., Olmo, M., García, J. 2018. Effect of ozone treatment on postharvest disease and quality of different citrus varieties at laboratory and at industrial facility. Postharvest Biology and Technology 137: 77–85.

Sintuya, P., Narkprasom, K., Jaturonglumlert, S., Whangchai, N., Peng-Ont, D., Varith, J. 2018. Effect of gaseous ozone fumigation on organophosphate pesticide degradation of dried chilies. Ozone Science and Engineering 6: 473–481.

Victorin, K. 1992. Review of genotoxicity of ozone. Mutation Research 277: 221–238

Whangchai, K., Saengnil, K., Uthaibutra, J. 2006. Effect of ozone in combination with some organic acids on the control of postharvest decay and pericarp browning of longan fruit. Crop Protection 25: 821–825.

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันเมล็ดปาล์ม น้ำมันมะพร้าวและผลของการใช้กลีเซอริลโมโนสเตียเรทต่อคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของน้ำมัน

Chemical and physical properties of rice bran oil stearine, palm kernel oil, coconut oil and influences of glyceryl monostearate on their viscoelastic properties

รัชชดา ลตวรรณ์[a,b], ปาริฉัตร หงสประภาส[a,b,*]

Ratchada Latawan[a,b], Parichat Hongsprabhas[a,b,*]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Center of Excellence on Agricultural Biotechnology: (AG-BIO/PERDO-CHE), Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: parichat.h@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติเชิงความร้อน และคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกแบบพลวัติที่อุณหภูมิ 25°C ของน้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันเมล็ดปาล์มและน้ำมันมะพร้าว พบว่า กรดไขมันอิ่มตัวในสัดส่วนสูงของน้ำมันเมล็ดปาล์มและน้ำมันมะพร้าวทำให้น้ำมันทั้งสองชนิดมีปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งสูงกว่าน้ำมันรำข้าวสเตียรีน อย่างไรก็ตาม น้ำมันรำข้าวสเตียรีนแสดงคุณลักษณะของแข็งที่อุณหภูมิ 25°C ที่มีความแข็งแรงกว่าน้ำมันเมล็ดปาล์มและน้ำมันมะพร้าวแสดงเป็นค่ามอดุลัสกักเก็บที่สูงกว่าค่ามอดุลัสสูญเสียเมื่อใช้ความเครียดต่ำกว่า 0.3%ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกเมื่อเพิ่มแอมพลิจูด โครงสร้างของแข็งของน้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดปาล์มประกอบด้วยโครงข่ายสามมิติเชิงกายภาพที่มีความเสถียรในสภาวะสถิตจากการประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกโดยเพิ่มความถี่เชิงมุม และพบว่าการเติมกลีเซอริลโมโนสเตียเรท (จีเอ็มเอส) 1–5% เพิ่มค่ามอดุลัสกักเก็บของน้ำมันทั้งสามชนิด จึงสามารถใช้จีเอ็มเอสในการเพิ่มความแข็งแรงของโครงข่ายของแข็งของน้ำมันที่อุณหภูมิ 25°C ได้

คำสำคัญ: กลีเซอริลโมโนสเตียเรท, น้ำมันรำข้าว, วิสโคอิลาสติก, สเตียรีน, สารลดแรงตึงผิว

Abstract

This study investigated chemical composition, thermal properties and dynamic viscoelastic properties at 25°C of rice bran oil stearine (RBS), palm kernel oil (PKO) and coconut oil (CO). The high ratio of saturated fatty acid in PKO and CO resulted in the high solid fat content (SFC) of both oils compared to RBS. Nonetheless, RBS exhibited solid behaviour at 25°C of higher strength than PKO and CO, indicated by higher storage modulus (G') compared to the loss modulus (G'') when the strain was lower than 0.3% in amplitude sweeps. The solidified RBS, CO and PKO consisted of a three-dimensional physical network that was stable at rest, indicated by angular frequency sweeps. Adding 1–5 % glyceryl monostearate (GMS) increased the G' of all oils, suggesting that GMS can be used to increase the strength of the of RBS, CO and PKO solid network at 25°C.

Keywords: glyceryl monostearate, rice bran oil, stearine, surfactant, viscoelastic

คำนำ

ไขมันเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ทำหน้าที่ให้ความนุ่ม หล่อลื่น ให้กลิ่นรสและโครงสร้างแก่ขนมอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดโครงสร้างที่คงตัวร่วมกับกลูเต็น ยับยั้งการคืนตัวของแป้งระหว่างการเก็บรักษา (antistaling) และให้ความยืดหยุ่นแก่ยีสต์โด (yeast dough) ระหว่างการหมัก ในการผลิตขนมปังจำเป็นต้องใช้ไขมันที่มีคุณสมบัติพลาสติก (plastic) ช่วยเพิ่มปริมาตร ไขมันแข็ง (fat hardstock) ที่นิยมใช้ในขนมปังคือเนยขาวเอนกประสงค์ (all-purpose shortening) ซึ่งมีปริมาณไขมันแข็ง (solid fat content, SFC) ประมาณ 22–17% ที่อุณหภูมิ 20–25°C (Stauffer, 1996) อย่างไรก็ตาม ผู้บริโภคในปัจจุบันมีความใส่ใจด้านสุขภาพ และต้องการหลีกเลี่ยงอาหารที่มีไขมันอิ่มตัวในสัดส่วนสูง

ในการผลิตน้ำมันรำข้าวบริโภค มีขั้นตอนการกำจัดไขมันที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงโดยการลดอุณหภูมิ (winterizing) และแยกไขมันแข็งออกด้วยการกรอง ดังนั้นผลพลอยได้เกิดขึ้นจากกระบวนการ คือ น้ำมันรำข้าวสเตียรีน (rice bran stearin, RBS) ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าน้ำมันรำข้าวบริโภค รัชชดา และปาริฉัตร (2562) ได้ใช้น้ำมัน RBS มาแทนที่เนยในการผลิตยีสต์โดแช่เยือกแข็งในการผลิตขนมปังหวาน พบว่า RBS สามารถรักษากิจกรรมของยีสต์ได้หลังการละลายน้ำแข็งภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 33 วัน และขนมปังที่ได้มีปริมาตรสูงกว่าการใช้ไขมันผสมระหว่างเนยและ RBS

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของ RBS เพื่อผลิตเป็นไขมันแข็งเปรียบเทียบกับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวในกลุ่มกรดลอริก (lauric acid) สูง ได้แก่ น้ำมันเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil, PKO) ซึ่งเป็นหนึ่งในน้ำมันที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเนยขาว และน้ำมันมะพร้าว (coconut oil) เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) กลีเซอริลโมโนสเตียเรท (glyceryl monostearate, GMS) ต่อคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของน้ำมัน เนื่องจากการเติม GMS ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 50–55°C (Shukla et al., 2018) ประมาณ 1–4% สามารถใช้ในการกระตุ้นให้เกิดผลึกและควบคุมภาวะรูปร่างผลึกหลายแบบ (polymorphism) ในน้ำมัน เช่น น้ำมันปาล์มสเตียรินได้ (Liu et al., 2019) ความรู้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำมาพัฒนาคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของไขมันและน้ำมันที่เหมาะสมแก่การใช้งานในผลิตภัณฑ์ขนมอบต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

น้ำมันรำข้าวสเตียรีน (RBS) จากขั้นตอนการลดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าวบริโภค ซื้อจากบริษัทน้ำมันรำข้าวสุรินทร์ จำกัด (Surin Bran Oil Co., Buri Ram, Thailand) น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น (CO, Thai Pure Coconut Co., Samut Sakhon, Thailand) และน้ำมันเมล็ดปาล์ม (PKO, Patum Vegetable Oil, Co., Bangkok, Thailand) ซื้อจากห้างสรรพสินค้าในกรุงเทพฯ และกลีเซอริลโมโนเสตียเรต (glyceryl monostearate, GMS) ได้รับอนุเคราะห์จาก NIC Interchem Co. (Bangkok, Thailand) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันโดยใช้ Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID, Agilent 7890 B, Agilent Technologies, Inc., CA, USA)) ตามวิธีของ TMC-05 (Thailand, 2003) และรายงานผลรวมของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวใน 100 กรัมน้ำมันตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ไฟโตสเตอรอล ได้แก่ บีต้าซิโตสเตอรอล แคมเพสเตอรอล และสติกมา

สเตอรอลโดยใช้ GC-FID (Agilent 6850, Agilent Technologies, Inc., CA, USA) ตามวิธีของ Laakso (2005) และรายงานผลไฟโตสเตอรอลใน 100 กรัมน้ำมันตัวอย่าง

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน

ชั่งตัวอย่างน้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดปาล์ม 15 กรัมในบีกเกอร์ หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 95°C จนผลึกของของแข็งหลอมเหลว วัดคุณสมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Pyris 1; PerkinElmer, Norwalk, CT, USA) โดยการชั่งตัวอย่างที่หลอมเหลวประมาณ 10–15 มิลลิกรัมลงใน stainless steel pan ปิดผนึก (hermetically sealed) ให้ความร้อนตัวอย่างจากอุณหภูมิ 25°C ถึง 90°C โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C /นาที คงอุณหภูมิที่ 90°C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ตัวอย่างหลอมเหลวในแบบแผนเดียวกันทุกตัวอย่าง จากนั้นลดอุณหภูมิของตัวอย่างจาก 90°C ไปที่ (-)60°C ใช้อัตราการลดอุณหภูมิ 10°C /นาที เพื่อเปลี่ยนสถานะของตัวอย่าง คงอุณหภูมิไว้ที่ -60°C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นหลอมเหลวตัวอย่างจากอุณหภูมิ -60°C จนถึง 90°C โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C /นาที รายงานอุณหภูมิ onset temperature (To, °C), end temperature of melting (Te, °C) และเอนทัลปีในการหลอมเหลว (ΔH, จูลต่อกรัม) ระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิจาก -60°C จนถึง 90°C คำนวณค่าปริมาณไขมันที่เป็นของแข็ง (solid fat content, SFC) ที่อุณหภูมิ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35°C

การวิเคราะห์คุณสมบัติวิสโคอิลาสติก

เตรียมไขมันแต่ละชนิด 10 กรัมลงในบีกเกอร์ หรือไขมันผสมกับกลีเซอริลโมโนสเตียเรท (GMS) ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3 และ 5% (w/w) หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 10 นาทีจนผลึกทั้งหมดหลอมเหลว หลังจากนั้นวัดคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกแบบพลวัตด้วยเครื่อง Modular Compact Rheometer (MCR300, Anton Paar, Stuttgart, Germany) ด้วยหัววัด PP-50 โดยตั้งระยะห่างระหว่างฐานและหัววัด 1 มิลลิเมตร ใส่ตัวอย่างปริมาณ 2.5 มิลลิลิตรลงบนฐานจากนั้นทำการกดหัววัดลงมาให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด เพิ่มอุณหภูมิจาก 20°C ถึง 90°C และคงไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิของตัวอย่างจนถึง 25°C ใช้อัตราการลดอุณหภูมิ 10°C /นาที และคงไว้ที่ 25°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้ตัวอย่างไขมันมีการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง

Amplitude sweep

ทำการทดสอบการตอบสนองของวัสดุแบบพลวัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเครียด (% strain) 0.0001 – 100 % โดยใช้ความถี่ 1 เฮิร์ตส์ที่อุณหภูมิ 25°C บันทึกการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของตัวอย่าง รายงานเป็นค่ามอดุลัสกักเก็บ (storage modulus, G') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (storage modulus, G'') ของตัวอย่างไขมัน ประมวลการตอบสนองของ G' และ G'' ที่ยังเป็นเส้นตรงขนานกันเมื่อเพิ่มความเครียด (linear viscoelastic range, LVR) เพื่อเลือกความเครียดที่เหมาะสมในการวัด Frequency sweep ต่อไป และประเมินค่า G' และ % strain ณ จุดตัดระหว่างค่า G' กับ G'' (crossover point, $G' = G''$) เพื่อประมวลโครงสร้างภายในของวัสดุในช่วง LVR

Frequency sweep

ทำการทดสอบการตอบสนองของวัสดุแบบพลวัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เชิงมุม 0.1-100 เรเดียนต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 25°C โดยกำหนดค่า % strain เป็น 0.1% จากช่วง LVR ที่ได้จาก amplitude sweep บันทึกการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของตัวอย่าง รายงานเป็นค่า G′ และ G″ ของตัวอย่างไขมัน

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการเตรียมตัวอย่าง 2 ครั้ง และวิเคราะห์ผลการศึกษาโดยใช้ ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, V. 26)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

น้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดปาล์ม ประกอบด้วยปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สรุปใน Fig. 1 น้ำมันรำข้าวสเตียรีนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำมันรำข้าวบริโภคมีกรดไขมันหลักคือ กรดโอเลอิก กรดปาลมิติก และกรดลิโนเลอิก ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากกรดไขมันหลักในน้ำมันมะพร้าวซึ่งมีกรดลอริก ไมริสติก และกรดปาลมิติกเป็นกรดไขมันหลัก และน้ำมันเมล็ดปาล์ม ซึ่งมีกรดลอริก ไมริสติก และกรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันหลัก อย่างไรก็ตาม น้ำมันบริโภคทั้งสามชนิดมีกรดสเตียริกประมาณ 2.64–3.99 % ของไขมันทั้งหมด

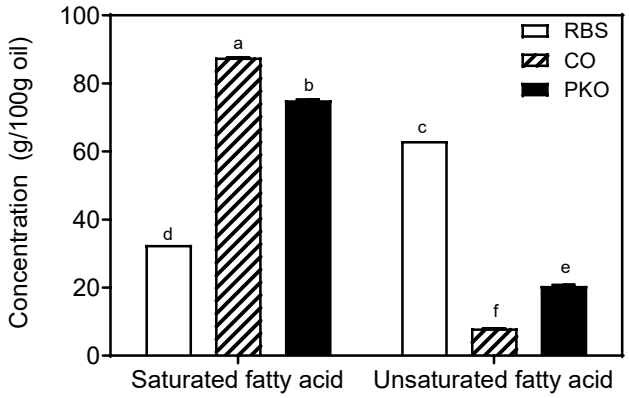


Fig.1 Concentration of total saturated fatty acids and unsaturated fatty acids in rice bran stearine (RBS), coconut oil (CO) and palm kernel oil (PKO). Values reported are mean values and standard deviations. The same letter is not significantly different at $p \geq 0.05$.

เทอร์โมแกรมของน้ำมันทั้งสามชนิดแสดงช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของน้ำมันรำข้าวสเตียรีน 2 ช่วง (Fig. 2A) ช่วงแรก คือการหลอมเหลวที่ (-)24 – 5°C เนื่องจากไตรเอซีลกลีเซอรอลในน้ำมันรำข้าวสเตียรีนมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันหลัก อุณหภูมิหลอมเหลวที่สอง คือ ช่วงอุณหภูมิ 15–38°C ซึ่งเป็นผลมาจากกรดไขมันอิ่มตัวในน้ำมันรำข้าวสเตียรีน และอาจรวมถึงแอลกอฮอลสายยาวและเอสเทอร์ของกรดไขมันสายยาวในไขรำข้าว (wax) อีกด้วย (Wijarnpreecha et al., 2018) ในขณะที่น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดปาล์ม มีกรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันหลักและมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวระหว่าง 6 – 31°C และ 6 – 33°C ตามลำดับ

ปริมาณไขมันแข็ง (solid fat content, SFC) ที่คำนวณ ณ อุณหภูมิต่างๆ แสดงใน Fig. 2B บ่งชี้ว่า น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดปาล์มมีไขมันในรูปของแข็งที่แต่ละอุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันรำข้าวสเตียรีน และโครงข่ายของผลึกไขมัน (fat crystal network) ในน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดปาล์มนี้เป็นของแข็งทั้งหมดที่ 0–10°C แต่ที่อุณหภูมิ 25°C น้ำมันรำข้าวสเตียรีนและน้ำมันมะพร้าวมีสัดส่วนของไขมันแข็งต่ำกว่า 20 % ในขณะที่น้ำมันเมล็ดปาล์มยังคงมีปริมาณไขมันแข็งสูงกว่า 20% ทำให้สามารถนำน้ำมันเมล็ดปาล์มมาใช้เป็นแหล่งไขมันแทน all-purpose shortening ในผลิตภัณฑ์ขนมอบได้ (Stauffer, 1996)

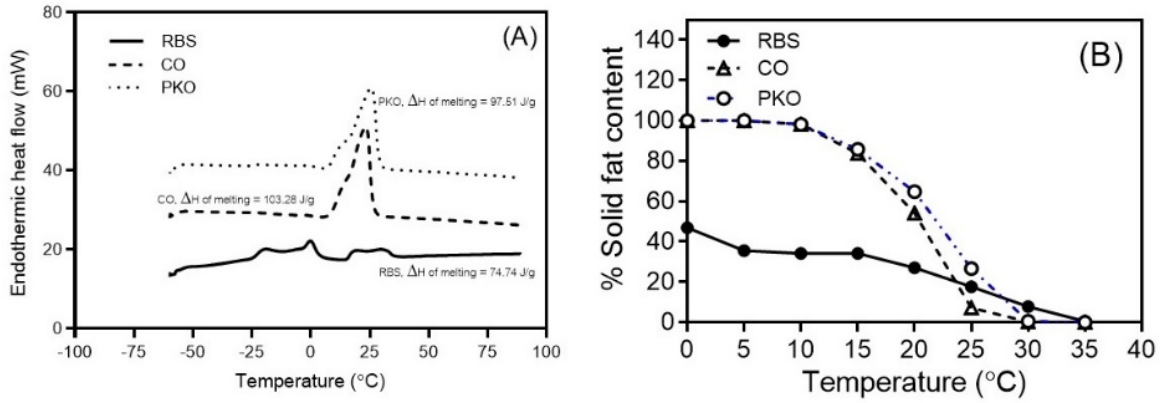


Fig. 2 Thermal properties of rice bran stearine (RBS), coconut oil (CO) and palm kernel oil (PKO) during melting from -60 ºC to 90 ºC: (A) thermogram; (B) solid fat content.

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกแบบพลวัตของน้ำมันทั้งสามชนิดที่อุณหภูมิ 25°C พบว่า น้ำมันทั้งสามมีคุณสมบัติเป็นของแข็งวิสโคอิลาสติก (viscoelastic solid) เนื่องจากค่ามอดุลัสกักเก็บ (G') มีค่าสูงกว่ามอดุลัสสูญเสีย (G'') ที่ความเครียดต่ำจนเกือบเป็นภาวะสถิต (static condition) หรือในช่วง LVR (Fig. 3) คุณสมบัติของแข็งวิสโคอิลาสติกของน้ำมันทั้งสามชนิดนี้เกิดจากโครงข่ายผลึก (fat crystal network) ที่อุ้มน้ำมันเหลวไว้ โครงข่ายผลึกของน้ำมันรำข้าวสเตียรีนมีค่า G' สูงกว่าโครงข่ายผลึกของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดปาล์ม และเมื่อพิจารณาที่ crossover point ($G' = G''$) ก่อนการเปลี่ยนจากสภาวะของแข็งวิสโคอิลาสติกเป็นของไหลวิสโคอิลาสติก (เมื่อ G'' สูงกว่า G') พบว่า โครงข่ายผลึกของน้ำมันรำข้าวสเตียรีนมีความแข็งแรงมากกว่าโครงข่ายผลึกของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดปาล์ม ความแข็งแรงของโครงข่ายผลึกของน้ำมันรำข้าวสเตียรีนแสดงเป็นค่า G' ณ crossover point นี้ สูงกว่าความแข็งแรงของของโครงข่ายผลึกของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดปาล์มเกือบ 100 เท่า แม้ว่าค่า SFC ในน้ำมันรำข้าวสเตียรีนจะต่ำกว่าของน้ำมันเมล็ดปาล์มอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Fig. 2B) จึงอาจเป็นไปได้ว่า นอกจากโครงข่ายผลึกไขมันที่เกิดจากไตรเอซีลกลีเซอรอลแล้ว อาจมีโครงข่ายอื่นเสริมความแข็งแรงของโครงข่ายผลึกของน้ำมันรำข้าวสเตียรีนที่ 25°C

เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวกลีเซอริลโมโนสเตียเรท (GMS) เพื่อกระตุ้นให้เกิดผลึกของน้ำมันระหว่างการลดอุณหภูมิและคงอุณหภูมิไว้ที่ 25°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง GMS ทำหน้าที่เป็น seeds (Liu et al., 2019) ให้แก่ไตรเอซีลกลีเซอรอลที่มีกรดสเตียริกเป็นส่วนประกอบในการเกิด nucleation ก่อนที่จะเกิดการโตของผลึกหรือ crystal growth Fig. 4 แสดงว่า การเติม GMS ทำให้น้ำมันผสม GMS มีค่า G' สูงขึ้น และน้ำมันผสมยังคงคุณสมบัติของแข็งวิสโค

อิลาสติก (G′ สูงกว่า G″) ตลอดช่วงความถี่เชิงมุม 0.1 – เรเดียนต่อวินาที (ไม่ได้แสดงค่า G″ในรายงานนี้) โดยที่ไม่ปรากฏ crossover point (G′ = G″) ในการประเมินโดย frequency sweep ซึ่งแสดงว่า โครงข่ายสามมิติของน้ำมันแต่ละชนิดมีความเสถียรในสภาวะสถิตช่วง LVR

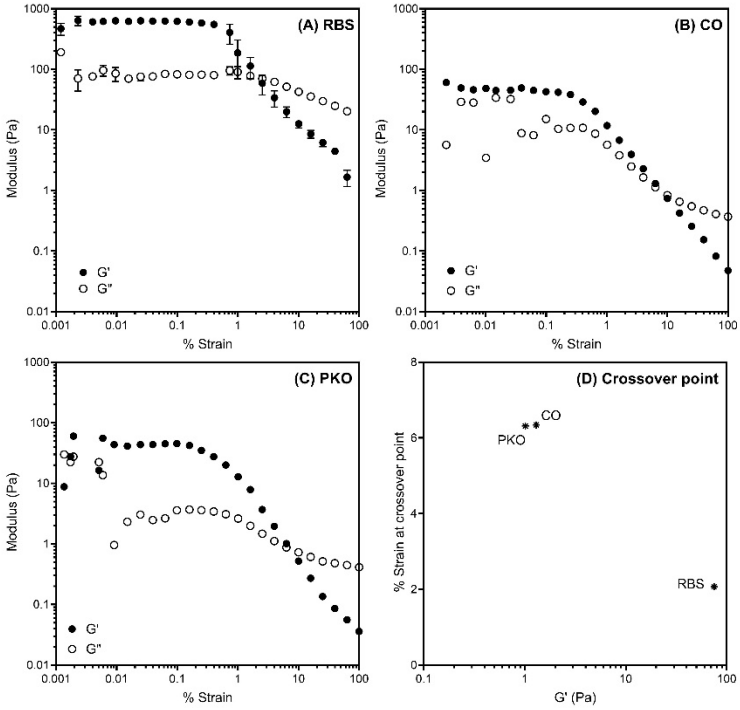


Fig. 3 Moduli of different vegetable oils: (A) rice bran stearine (RBS); (B) coconut oil (CO); (C) palm kernel oil (PKO) and (D) mapping G′ and strain at crossover point during amplitude sweeps at 25°C

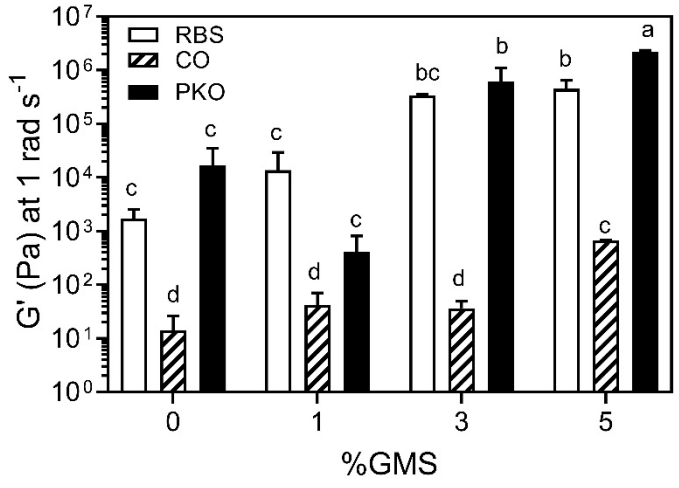


Fig. 4 Effect of GMS concentration on storage modulus (G′) of different vegetable oils: A) rice bran stearine (RBS); (B) coconut oil (CO); and (C) palm kernel oil (PKO) during angular frequency sweeps at 25°C. Values reported are mean values and standard deviations. The same letter is not significantly different at $p \geq 0.05$

โครงข่ายของแข็งของน้ำมันรำข้าวสเตียรีน น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดปาล์มเป็นของแข็งวิสโคอิลาสติก และไม่เปลี่ยนเป็นของไหลวิสโคอิลาสติกเมื่อมีความเครียดคงที่ในช่วง LVR มากระทำซ้ำแล้วซ้ำอีก การประเมินการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากของแข็งเป็นของไหลเมื่อเพิ่มความถี่เชิงมุมนี้ ใช้ในการอธิบายความสามารถในการรักษาความคงตัวของโครงข่ายของไขมันที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งจะสะท้อนระยะเวลาในการที่โครงข่ายของน้ำมันยังรักษาคุณลักษณะของของแข็งไว้ได้ หากโครงข่ายของน้ำมันไม่สามารถรักษาคุณลักษณะของแข็ง ค่า G' จะต่ำกว่าค่า G'' และโครงข่ายของแข็งของน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นของไหลวิสโคอิลาสติก

การตรวจไม่พบ crossover point ในการประเมิน frequency sweep ของตัวอย่างน้ำมันและน้ำมันผสม GMS นี้แสดงว่า โครงข่ายของน้ำมันทั้งสามชนิดยังคงคุณลักษณะของของแข็งในระยะยาวได้ อย่างไรก็ตาม ผลึกที่เกิดขึ้นจากการเติม GMS ของน้ำมันแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โครงข่ายของแข็งน้ำมันรำข้าวสเตียรีนและน้ำมันเมล็ดปาล์มมีค่า G' เพิ่มขึ้นจาก 100 พาสคัล เป็น 10^6 พาสคัลเมื่อเติม GMS 5% แต่โครงข่ายของแข็งน้ำมันมะพร้าวมีค่า G' เพิ่มขึ้นจาก 10 พาสคัล เป็น 10^3 พาสคัลเมื่อเพิ่ม GMS ซึ่งอาจเกิดจากการที่น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันสายสั้นสูงกว่าน้ำมันเมล็ดปาล์ม

การที่โครงข่ายของแข็งน้ำมันรำข้าวสเตียรีนรักษาคุณลักษณะของแข็งเมื่อเติม GMS ใกล้เคียงกับโครงข่ายของแข็งน้ำมันเมล็ดปาล์มซึ่งมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่า อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นในน้ำมันรำข้าวสเตียรีนที่ไม่ใช่ไตรเอซีลกลีเซอรอลมีบทบาทเสริมในการเกิดโครงข่ายของแข็งน้ำมันรำข้าวสเตียรีน Table 1 แสดงปริมาณไฟโตสเตอรอลของน้ำมันทั้งสามชนิด พบว่าน้ำมันรำข้าวสเตียรีนมีไฟโตสเตอรอลสูงถึง 3,991 มิลลิกรัมในน้ำมัน 100 กรัม ในขณะที่น้ำมันเมล็ดปาล์มและน้ำมันมะพร้าว มีไฟโตสเตอรอลประมาณ 25–36 มิลลิกรัมในน้ำมัน 100 กรัม

ไฟโตสเตอรอลมีบทบาทอย่างมากในการเกิดโครงสร้างสามมิติที่เป็นนาโนไฟบริล (nanofibril) ร่วมกับแกมมาออไรซานอล (Bot and Agterof, 2006) หรือเป็นสารที่ทำให้เกิดเจลฐานน้ำมัน (oleogelator) โดยไม่เกิดเป็นผลึก นอกจากนั้น การใช้ไฟโตสเตอรอลร่วมกับโมโนกลีเซอไรด์สามารถสร้างเจลฐานน้ำมัน (oleogel) ให้มีความยืดหยุ่นและความแข็งเพิ่มขึ้น (Sintang et al., 2017) ได้ มีความเป็นไปได้ว่า โครงข่ายของแข็งน้ำมันรำข้าวสเตียรีนประกอบด้วยโครงข่ายผลึกของไขมัน (fat crystal network) และโครงข่ายนาโนไฟบริลเสริม (synergistic network) เพราะน้ำมันรำข้าวให้โครงข่ายของแข็งที่มีค่า G' สูงแม้จะมีผลึกต่ำ

Table 2 Selected phytosterol in rice bran stearine (RBS) from winterizing step, coconut oil (CO) and palm kernel oil (PKO)

Type of oil	β-sitosterol (mg/100 g)	Campesterol (mg/100 g)	Stigmasterol (mg/100 g)	Total phytosterol (mg/100 g)
RBS	1508.50^{a}±6.36	341.75^{a}±9.61	2141.50^{a}±149.20	3991.50^{a}±146.37
CO	12.11^{b}±0.16	1.72^{b}±0.28	11.43^{b}±0.31	25.26^{b}±0.76
PKO	23.16^{b}±1.10	1.48^{b}±0.08	11.83^{b}±0.38	36.47^{b}±1.40

* Means ± S.D. in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

สรุป

งานวิจัยนี้แสดงความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันรำข้าวสเตียรีนที่เป็นผลพลอยได้จากการลดอุณหภูมิในการผลิตน้ำมันรำข้าวบริโภคมาใช้เป็นไขมันแข็งที่มีโครงข่ายผลึกและโครงข่ายเสริมที่ให้ความแข็งแรงสูง การเติม GMS 1 % ขึ้นไป เพิ่มความแข็งแรงของโครงข่ายของแข็งของน้ำมันทั้งสามชนิด ผลจากการศึกษานี้สามารถนำมาใช้ในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของน้ำมันบริโภคที่ต้องการคุณลักษณะของของแข็งที่เสถียรที่อุณหภูมิ 25°C และมีความแข็งแรงสูงเพื่อใช้ทดแทนไขมันอิ่มตัวในผลิตภัณฑ์ขนมอบได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (โครงการ AG-BIO/61-004-001) และสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (โครงการ CRP6005021840) ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยและคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการเข้าร่วมงานประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59

เอกสารอ้างอิง

รัชชดา ลตวรรณ์, ปาริฉัตร หงสประภาส. 2562. ผลของไขมันแข็งต่อโดขนมปังแช่แข็งที่ใช้ยีสต์ก่อนและหลังการอบ. ใน: เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 57: สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม, สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 679–686.

Bot, A., Agterof, G.M. 2006. Structuring of edible oils by mixtures of γ-oryzanol with β-sitosterol or related phytosterols. Journal of American Oil Chemists' Society 83: 513–521.

Laakso, P. 2005. Analysis of sterols from various food matrices. European Journal of Lipid Science and Technology 107: 402–410.

Liu, L., Li, L. Wan, L., Mao, L., Li, B., Zhang, X. 2019. Addition of glyceryl monostearate affects the crystallization behavior and polymorphism of palm stearin. Bioprocess Biosystems Engineering. https://doi.org/10.1007/s00449-019-02251-1

Shukla, T., Upmanyu, N., Pandey, S.P., Gosh, D. 2018. Chapter 1 - Lipid nanocarriers. In: Grumezescu, A.M. (Ed.). Lipid Nanocarriers for Drug Targeting. William Andrew Publishing. Oxford, UK, pp. 1–47

Sintang, M.D.B., Danthine, S., Brown, A., Van de Walle, D., Patel, A.R., Tavernier, I., Rimaux, T., Dewettinck, K.2017. Phytosterols-induced viscoelasticity of oleogels prepared by using monoglycerides.Food Research International 100: 832–840.

Stauffer, C.E. 1996. Fats and Oils: Practical Guides for the Food Industry. Eagan Press Handbook Series. St.Paul, Minnesota, USA.

Thailand 2003. Compendium of Methods for Food analysis, TMC-05, 1st ed., pp. 2-33–2.36. The National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, Bangkok, Thailand.

Wijarnprecha, K., Aryusuk, K., Santiwattana, P., Sonwai, S., Rousseau, D. 2018. Structure and rheology of oleogels made from rice bran wax and rice bran oil. Food Research International 112: 199–208.

Ultrasound-assisted extraction for the recovery of proteins from duckweed (*Wolffia globosa)* using response surface methodology

Natchaya Duangjarus[a], Weerachai Chaiworapuek[b], Pitiporn Ritthiruangdej[c], Sudathip Sae-tan[a], Suvimol Charoensiddhi[a,d,*]

[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[c]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[d]Advance Technology for Food Safety Specialty Unit, Kasetsart University, Bangkok, 10900

*Corresponding author. E-mail address: suvimol.ch@ku.th

Abstract

Duckweed (*Wolffia globosa*), known as Khai-nam or Phum, is considered as a good source of proteins containing up to 40% of dry weight. For comparative purposes with the conventional extraction method by using water as a solvent with magnetic stirrer, two ultrasound-assisted extraction (UAE) modes, namely flat and horn transducers have been investigated. Among all cases, both UAE modes performed effectively than the conventional method as a significant increase in the protein yield and a decrease in the extraction time were achieved. However, UAE with a flat transducer was selected for process optimization using response surface methodology due to the high potential for industrial application. The response variables have been addressed as ultrasonic frequency (X1; 40 to 120 kHz), extraction time (X2; 5 to 25 min), and duckweed powder to water ratio (X3; 1:15 to 1:25). The statistical analysis fitted with a second-order model (R^2=0.943) revealed that X1, X3, and the quadratic of X1 and X3 had significant effects ($p < 0.05$) on the protein yields. The optimized conditions for maximum recovery of protein (42.36%) from duckweed were achieved from the ultrasonic frequency at 120 kHz, duckweed powder to water ratio 1:25, and 15 min of extraction time.

Keywords: Protein extraction, Response surface methodology, Ultrasound-assisted extraction, *Wolffia globosa*

Introduction

Duckweed (*Wolffia globosa*) known in Thai as Khai-nam or Phum, is one of the smallest flowering plants. It is commonly found in freshwater habitats around Thailand and in many other countries. This plant is a new alternative food source with high nutritional value for health-conscious consumers. Duckweed contains proteins approximately 40% of dry weight, therefore it becomes a great source of alternative plant-based proteins. However, duckweed is currently limited to use as a local food in Thailand. Most of duckweed meal sold in the market is usually grown and harvested from natural pond. Although duckweed has the potential to be grown at industrial-scale volumes, but one major limitation is the lack of scientific validation of its nutritive as protein source and commercial feasibility.

Water and alkali extraction is the conventional method for protein extraction, but this method usually requires long extraction time, low extraction yield, and non-environment friendly (Brouwer et al., 2019). Therefore, this has contributed to the growing interest in extraction method with high efficiency and eco-friendly. Recently, Ultrasound-assisted extraction (UAE) has been widely used for extraction of many natural products as it has been proven as an effective method to improve yield of extracted components, increase extraction rate, and decrease extraction time (Chemat et al., 2017). The statistical interaction between ultrasound and material can create oscillation of cavitation bubbles, which facilitates the extraction (Panda and Manickam, 2019). Response surface methodology (RSM) is an effectively statistical tool for optimizing complex processes. It is widely used in optimizing the extraction process variables such as protein, polysaccharides, and phenolic compounds from various kinds of materials (Cacace and Mazza, 2003). RSM can reduce a number of experimental trials, which are needed to evaluate multiple parameters and their statistical interactions (Zhong and Wang, 2010).

The purposes of this study were to compare the extraction efficiency, particular to extraction yield and time of duckweed proteins using conventional method with two UAE modes, namely flat and horn transducer. The optimized UAE conditions for protein extraction were investigated, and RSM was designed to analyze the effect of extraction variables on the protein yield of duckweed extracts.

Materials and Methods

Materials and reagents

Fresh duckweeds (*W. globosa*) which were harvested in May-June were supplied by Advanced Greenfarm Co., Ltd., Thailand. All chemicals such as Bovine surum albumin (BSA), $CuSO_4.5H_2O$, and Folin-Ciocalteu phenol were analytical grade and purchased from reputable suppliers.

Sample preparation

Fresh duckweeds were dried by tray dryer at 60°C for 8 h and ground with a hammer mill and sieved through 1 mm sieve to obtain duckweed powders.

Comparison of protein extraction method

Duckweed powders mixed in the distilled water with the ratio of 1:15 were used in all methods in this investigation. For the conventional method, the mixture was stirred with magnetic stirrer at speed level 4 (C-MAG HS 7, IKA- Werke GmbH & Co.KG, Germany). For the UAE methods, the mixture was homogenated by horn transducer, using 20 kHz of ultrasonic frequency with approximate power at 200 W (Model 300VT Ultrasonic Homogenizer with 12.7 mm diameter titanium tip, BioLogics, Inc., USA), while the flat transducer was conducted using ultrasonic frequency at 120 kHz, power level 4 hold in the food grade stainless steel vessel with volume capacity of 500 ml. The extraction time of each method was 15, 30, and 60 min. Then, the slurry was centrifuged at 4°C, 12,000g for 20 min. The supernatant was stored at -60°C before freeze drying and grinding to a dried extract, respectively.

Optimization of flat ultrasound-assisted extraction condition

According to the comparison study of protein extraction method, the flat-UAE was selected to optimize the extraction condition. The effect of ultrasonic frequency (X_1), extraction time (X_2), and duckweed powder to water ratio (X_3) on the duckweed protein yield (%) based on dried duckweed raw material (Y) was investigated. Each variable was coded at three levels: -1, 0, 1 as follows: 40, 80, 120 kHz; 5, 15, 25 min; and 1:15, 1:20, 1:25 for ultrasonic frequency, extraction time, and duckweed powder to water ratio, respectively.

Response surface methodology (RSM) with Box-Behnken design (BBD) was used to determine the optimal condition of three extraction variables on the protein content of dried duckweed extracts. The design consisted of 15 experimental points varying three levels coded, three replicates (treatment 13–15) at the center of the design were used to allow for estimation of the pure error sum of square. The protein analysis of all experiment points was performed in triplicates.

Experiment data were fitted to a quadratic polynomial model and regression coefficients obtained by the enter method. The quadratic model applied in the response surface was shown in the Equation 1:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

where Y is the response values associated with each factor combinations. β_0 is an intercept value, β_i is regression coefficients, and X_i is the code levels of independent variable. X_i, X_j, and X_i^2 stand for the statistical interaction and quadratic terms, respectively.

Duckweed powders were mixed with distilled water and held in the stirred flat-UAE chamber at the different duckweed powder to water ratio, ultrasonic frequency, and extraction time specified in 15 experimental points at room temperature. After the ultrasonic treatment process, the slurry was centrifuged at 4°C, 12,000g for 20 min. The supernatant was evaporated using a rotary evaporator at 72°C under vacuum until the remaining volume was 30 ml. The solution was stored at -60°C before freeze drying and grinding as a dried protein-rich extract.

Protein analysis

The soluble protein extracted yield was determined according to the Lowry method (Lowry et al., 1951) using bovine serum albumin as a standard, and the absorbance at 750 nm was measured. Then, the protein yield (%) based on dried duckweed raw material was calculated. In addition, % total protein of dried duckweed raw material and the extract from the optimal condition were determined according to the Kjeldahl method using a conversion factor of 6.25 (Kjeldahl, 1883) in order to calculate % recovery of protein.

Statistical analysis

Completely randomized design (CRD) was applied to the comparison study of protein extraction method. The experiments were conducted in triplicate, and Duncan's multiple range test was used to perform statistical analysis, using the IBM SPSS statistics 23.0 (IBM Corporation Software group, Somers, NY, USA) with significant difference at the 95% confidence level. For optimization analysis, Box-Behnken design (BBD) were applied in this study. IBM SPSS statistics 23.0 (IBM Corporation Software group, Somers, NY, USA) with significant difference at the 95% confidence level was used to analyze linear regression. RSM was analyzed using STATISTICA 10 software, supplied by TIBCO.

Results and Discussion

Comparison of protein extraction methods

To compare the efficiency of three extraction methods; conventional stirrer, horn-UAE, and flat-UAE, with different extraction time, the protein yield of dried extracts was calculated based on dried duckweed (Table 1). The conventional method showed a significant increase in the protein extracted yield (6.04 to 8.99%) with the increased extraction time (15 to 60 min), while there was no difference in the protein extracted yield (10%) from the horn-UAE method. Interestingly, the protein extracted yield from the flat-UAE method were significantly decrease from 12.22 to 11.37% with the increased extraction time. However, two modes of UAE showed significantly higher protein extracted yield than the conventional method at the short extraction time. It was suggested that both UAE methods performed more effectively than the conventional method as a significant increase in the protein extracted yield and a decrease in the extraction time were achieved. This might be due to the cavitation event occurred by propagation of ultrasound waves via a series of compression and rarefaction waves. At sufficient power, the rarefaction cycle may exceed the extraction force of molecules of the liquid medium and cavitation bubbles will be formed. When vapor from the system enters the bubble during expansion phase in negative pressure and implode, the wave was promoted with high shear energy and turbulence. This might facilitate the release of the components in the cellular matrix (Bedin et al., 2020). Relative to the general use of horn-UAE mode, the flat-UAE was developed to improve the release of ultrasound wave. The flat-UAE method in the present study was designed to place the transducer around the sample vessel leading to the release of ultrasound wave thoroughly samples. In contrast to the horn-UAE, ultrasound wave was released only from the tip of transducer. Hence, the flat transducer might enhance more bubble cavitation than the other mode.

Table 1 Effect of different extraction method and time on the % yield of extracted protein based on dried duckweed

Time (min)	Extraction method		
	Magnetic stirrer	Horn-UAE	Flat-UAE
15	6.04 ± 0.16^{Cb}	10.03 ± 0.37^{Ba}	12.22 ± 0.15^{Aa}
30	7.30 ± 0.45^{Bab}	10.86 ± 0.41^{Aa}	11.77 ± 0.11^{Aab}
60	8.99 ± 1.03^{Aa}	10.03 ± 1.62^{Aa}	11.37 ± 0.3^{Ab}

*Mean ± standard deviation from triplicate analyses in a row and column with different capital and small letters are significantly different ($p < 0.05$) of extraction method and time, respectively.

Fitting the models

Table 2 was a regression analysis of duckweed protein extraction following 15 combinations of three independent variables (ultrasonic frequency, X1; extraction time, X2; and duckweed powder to water ratio, X3. The total determination coefficient (R^2) was 0.943, indicating that it was carried out to fit mathematical model of the experimental data design. The second-order equation in terms of coded values was shown in the Equation 2:

$$Y = 28.910 - 0.210X_1 + 0.323X_2 - 1.649X_3 + 0.000X_1X_1 - 0.007X_2X_2 + 0.029X_3X_3 - 0.002X_1X_2 + 0.009X_1X_3 + 0.002X_2X_3 \quad (2)$$

Table 2 Box-Behnken experimental design and % yield of extracted protein based on dried duckweed

Run	Coded variables			Uncoded variables			% Yield of extracted protein
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	40	5	20	7.70
2	-1	1	0	40	25	20	10.05
3	1	-1	0	120	5	20	9.20
4	1	1	0	120	25	20	8.88
5	-1	0	-1	40	15	15	10.70
6	-1	0	1	40	15	25	10.39
7	1	0	-1	120	15	15	6.90
8	1	0	1	120	15	25	13.52
9	0	-1	-1	80	5	15	8.33
10	0	-1	1	80	5	25	9.84
11	0	1	-1	80	25	15	8.11
12	0	1	1	80	25	25	10.05
13	0	0	0	80	15	20	9.10
14	0	0	0	80	15	20	8.67
15	0	0	0	80	15	20	9.36

The p-value was used to determine the significance of each coefficient (Table 3). X_1 (ultrasonic frequency) and X_3 (duckweed powder to water ratio) showed the significant factors ($p < 0.05$). Also, the statistical interaction effect of ultrasonic frequency and duckweed powder to water ratio was significant ($p < 0.05$), whereas the extraction time was not significant factor.

Table 3 Coefficients analysis of dependent variable: Y

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	28.910	6.259		4.619	.006
X1	-.210	.046	-4.096	-4.519	.006
X2	.323	.170	1.576	1.899	.116
X3	-1.649	.539	-4.024	-3.058	.028
X1X1	.000	.000	1.198	1.879	.119
X2X2	-.007	.003	-1.037	-2.146	.085
X3X3	.029	.013	2.860	2.268	.073
X1X2	-.002	.001	-.847	-2.160	.083
X1X3	.009	.002	3.830	5.605	.002
X2X3	.002	.006	.227	.348	.742

Analysis of response surface

The 3D surface plots were drawn to illustrate the main and statistical interaction effects of three independent variables on the % yield of extracted protein based on dried duckweed raw material (Fig 1 A-C). Each graph was obtained by varying effect of two variables on the response (% yield of extracted protein), while fixing the remaining one variable at the central value. Fig 1A showed the high response on % yield of extracted protein in the combination of ultrasonic frequency 40 kHz with 15–25 min of extraction time and the other was 120 kHz of ultrasonic frequency with 5–15 min of extraction time. It is indicated that 120 kHz of ultrasonic frequency was preferable condition as it could reduce the extraction time. The high response from the statistical interaction effect between extraction time and duckweed powder to water ratio was shown in the zone of duckweed powder to water ratio 1:23–1:25 with the extraction time 10–15 min (Fig 1B). Similarly, the statistical interaction of ultrasonic frequency 120 kHz with duckweed powder to water ratio 1:23–1:25 showed the highest response on the % yield of extracted protein (Fig 1C). This suggested more protein recovery was resulted from high ultrasonic frequency and high duckweed powder to water ratio due to the increase in mass transfer rates from cavitation event (Panda and Manickam, 2019). However, the maximum ultrasonic frequency in this study is 120 kHz due to the limitation of experimental equipment, so higher frequency may be interesting for further study. Results revealed the range of optimal combination condition of duckweed protein extraction was ultrasonic frequency 120 kHz, 10-15 min of extraction time, and duckweed powder to water ratio 1:23–1:25.

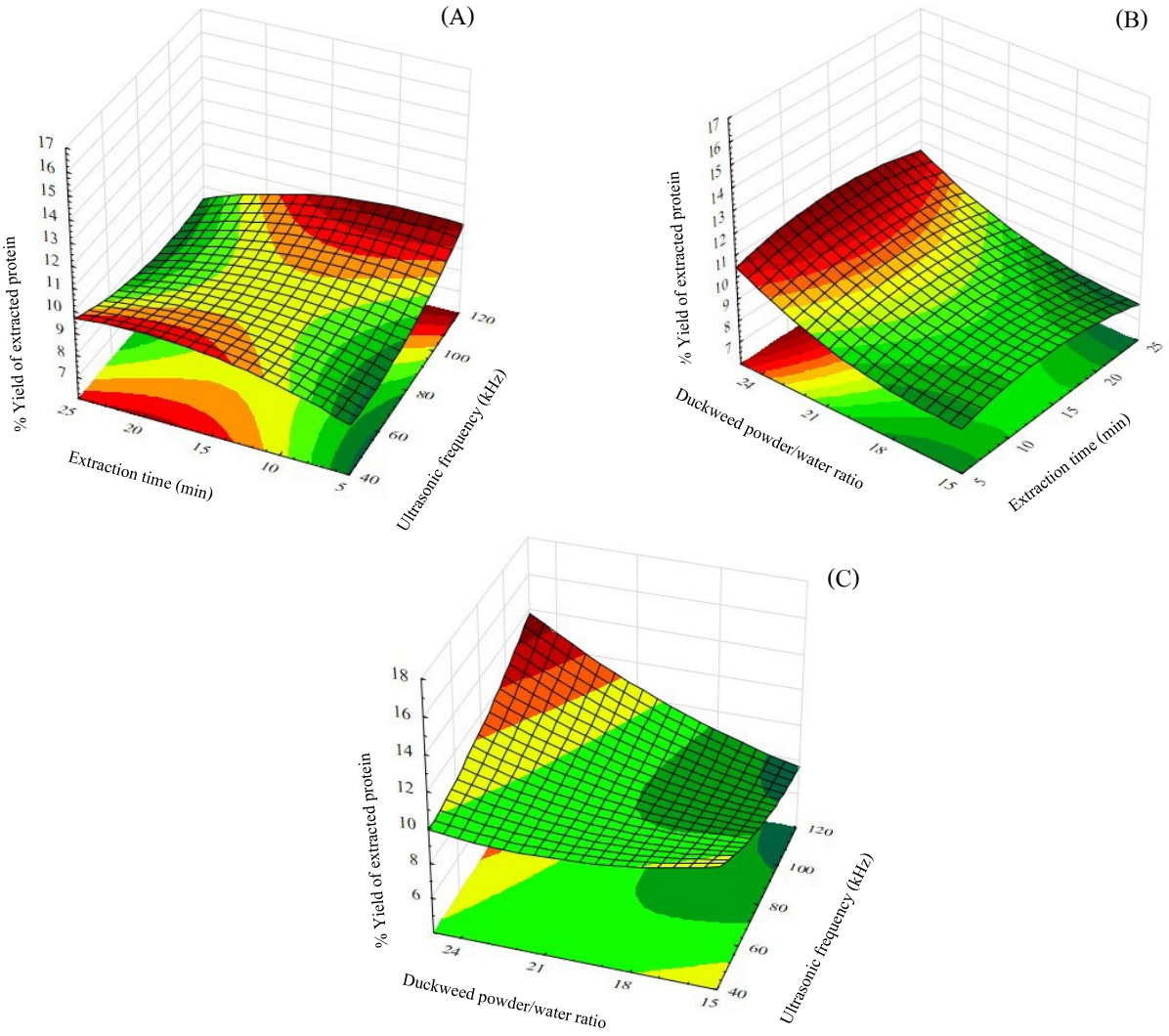


Fig. 1 Surface plots with contour for the % yield of extracted protein based on dried duckweed; (A) Effect of ultrasonic frequency and extraction time with duckweed powder to water ratio 1:20, (B) Effect of extraction time and duckweed powder to water ratio with ultrasonic frequency 80 kHz, and (C) Effect of ultrasonic frequency and duckweed powder to water ratio with extraction time 15 min.

Optimization of the flat ultrasound-assisted extraction condition

The % yield of extracted protein based on dried duckweed raw material following 15 selected conditions was shown in Table 2. The protein yield of all experiments varied from 6.90 to 13.52%. Results revealed the combination of extraction variables that obtained the highest protein yield (13.52%) was ultrasonic frequency 120 kHz, extraction time for 15 min, and duckweed powder to water ratio 1:25. This optimized condition gave 42.36% recovery in the protein content from dried duckweed raw material. Similar results were obtained from Zhu et al. (2009), the extraction of defatted wheat germ proteins using UAE and reverse micelles prepared by chemical solutions was optimized. The final extracted protein efficiency from wheat germ could reach 45.6%, therefore it is indicated that our study may be more practical to develop for the large-scale application with greener and simpler process approach.

Conclusion

Ultrasound-assisted extraction, both horn and flat transducer, was performed more effectively for protein extraction from duckweed than the conventional method. However, the flat-UAE was selected for further optimized study as this method could increase more protein yield and decrease extraction time with practical operation in an industrial scale. Among three independent variables, the ultrasonic frequency, duckweed powder to water ratio, and their statistical interaction had a significant effect on the protein yield. The optimal extraction condition was determined as follows: ultrasonic frequency 120 kHz, extraction time 15 min, and duckweed powder to water ratio 1:25. Under this condition, 42.36% recovery in protein content from the dried duckweed raw material was achieved.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the conference funding support from the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, as well as the duckweed raw materials supported by Advanced Greenfarm Co., Ltd.

References

Bedin, S., Netto, F.M., Bragagnolo, N., Taranto, O.P. 2020. Reduction of the process time in the achieve of rice bran protein through ultrasound-assisted extraction and microwave-assisted extraction. Sep. Sci. Technol. 55: 300–312. doi.org/10.1080/ 01496395.2019.1577449

Brouwer, P., Nierop, K.G., Huijgen, W.J., Schluepmann, H. 2019. Aquatic weeds as novel protein sources: Alkaline extraction of tannin-rich Azolla. Biotechnol. Rep. 24, e00368. doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00368

Cacace, J., Mazza, G. 2003. Optimization of extraction of anthocyanins from black currants with aqueous ethanol. J. Food Sci. 68: 240–248. doi.org/10.1111/j.1365-2621. 2003. tb14146.x

Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., Abert-Vian, M. 2017. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications: A review. Ultrason. Sonochem. 34: 540-560. dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035

Kjeldahl, C. 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. Anal. Chem. 22: 366.

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., Randall, R.J. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. J. Biol. Chem. 193: 265–275.

Panda, D., Manickam, S. 2019. Cavitation technology—The future of greener extraction method: A review on the extraction of natural products and process intensification mechanism and perspectives. Appl. Sci. 9: 766. doi:10.3390/app9040766

Zhong, K., Wang, Q. 2010. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from dried longan pulp using response surface methodology. Carbohydr. Polym. 80: 19–25. doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.066

Zhu, K.-X., Sun, X.-H., Zhou, H.-M. 2009. Optimization of ultrasound-assisted extraction of defatted wheat germ proteins by reverse micelles. J. Cereal Sci. 50w: 266–271. doi.org/10.1016/j.jcs.2009.06.006

Isolation and identification of potential emerging foodborne bacteria in raw chicken and pork ground meats

Than Than Htay[a], **Sudsai Trevanich**[a,b,*]
[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[b]Center for Advanced Studies for Agriculture and Food, Kasetsart University Institute for Advanced Studies, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: sudsai.t@ku.th

Abstract

Some members of Enterobacteriaceae, such as *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. have been recognized as foodborne pathogenic bacteria in humans. *Providencia* spp. and *Morganella* spp. are recently reported as possible emerging foodborne pathogens found in various food-producing animals for human consumption. The present study was performed to isolate and identify *Providencia* spp. and *Morganella* spp. in two types of retail meats sold in Bangkok and Pathum Thani provinces. A total of 18 chicken ground meat samples and 10 pork ground meat samples were randomly collected from 7 different retail markets in those two provinces. Isolation and identification of target bacteria were done according to modified ISO 21567: 2004 followed by API 20E with a few modifications. The results showed 13 and 5 isolates of *Providencia* spp. were isolated from 18 chicken ground meat and 10 chicken ground meat, respectively. Besides, 10 and 7 isolates of *Morganella morganii* were isolated from 18 chicken ground meat and 10 pork ground meat, respectively. The occurrence percentages of *Providencia* spp. in chicken ground meat samples and pork ground meat samples were 72% and 50%, respectively. The occurrence percentages of *M. morganii* in chicken ground meat samples and pork ground meat samples were 55% and 70%, respectively. This study indicates that chicken ground meats and pork ground meats are potential sources of *Providencia* spp. and *M. morganii*.

Keywords: Ground chicken, Ground pork, *Morganella morganii*, *Providencia* spp.

Introduction

Providencia species were also known as opportunistic pathogens that caused travellers' diarrhoea. *Providencia* is the genus of Gram-negative, rod-shaped bacterium that is members of the family of Enterobacteriaceae (Shah et al., 2019). This genus contains nine significant species: *P. alcalifaciens*, *P. sturatii*, *P. rettgeri*, *P. rustigianii*, *P. heimbachae*. *P. sneebia*, *P. burhodogranariea* and *P. thailandensis.* (Hu et al., 2019). Among them, *P. alcalifaciens* is the causative organism for both diarrhoeas in human and animals. *Providencia* is found in polluted water and isolated from a wide range of living organisms (Du et al., 2018). Besides, Nimnoi and Pongsilp (2020) reported that *Providencia* spp. were isolated from seafood in Thailand. Furthermore, *Providencia* spp. were isolated from raw chicken, pork and beef samples (Shima et al., 2015). Both developed and developing countries are concerned with outbreaks related to *P. alcalifaciens* which is transmitted mainly through the consumption of contaminated foods such as, teriyaki chicken burger, pork schnitzel with potato salad and mashed potatoes. It also caused three foodborne outbreaks in Japan, Turkey and Kenya (Shah et al., 2019).

Morganella morganii is a Gram-negative bacteria that belong to the family of Enterobacteriaceae and commonly found in the environment and intestinal tracts of humans, mammals and reptiles (Minnullina et al., 2019). *M. morganii* is also an opportunistic pathogen that causes extensive clinical and community-acquired infections (Minnullina et al., 2019). Besides, *M. morganii* secretes histamine in decomposed fish meat that causes histamine poisoning in humans due to its high histidine decarboxylase activity (Yamaki et al., 2020). *M. morganii* produces a harmful level of histamine during storage at an inappropriate temperature (Wongsariya et al., 2016). Nimnoi and Pongsilp, (2020) reported that *M. morganii* was isolated from seafood in Thailand. Moreover, *M. morganii* isolated from diseased Australia's poultry flock, including geese, turkeys and chicken layers (Palmieri et al., 2020). Furthermore, *M. morganii* caused fetal infection in broiler chicks from the hatchery in China (Zhao et al., 2012). (Li et al., 2018) reported that the pathogen caused a high mortality rate of about 57% in cattle and contaminated in milk. Furthermore, it is also found in the poultry farm environment in Portugal (Jones- Dias et al., 2016). Besides, *M. morganii* was isolated from swine farms in China (Chen et al., 2019). Therefore, *Providencia* spp. and *M. morganii* are recently potential foodborne pathogens and there is a few information for the presence of these pathogens from raw meats in Thailand. This study aimed to isolate and identify *Providencia* spp. and *M. morganii* from chicken ground meats and pork ground meats in Bangkok and Pathum Thani Province.

Materials and Methods

Meat sample collection

A total of 28 ground meat samples, including 18 chicken ground meat samples and 10 pork ground meat samples were collected from 7 different retail markets (Amonphan market, Saphan Mai market, Bangkhen market, Thannomit market, Talaad Thai market, Rangsit market and Pornpat market) in Bangkok and Pathum Thani Province during July to October 2020.

Meat samples were collected aseptically, kept into sealed plastic bags and transported to a laboratory in an icebox. Samples were then examined within 24 hr at the Food microbial safety research laboratory, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

Isolation and identification of target bacteria from meat samples

Providencia spp. and *Morganella* spp. were isolated from chicken ground meat samples and pork ground meat samples by using ISO 21567: 2004 (ISO, 2004) with some modifications. Twenty-five grams of each meat sample were transferred into the stomacher bag and mixed with 225 ml of *Shigella* broth containing 0.5 µg/ml of sterile novobiocin solution. The sample was then homogenized at medium speed in a stomacher blender for 1 min. The homogenized meat sample was incubated in an anaerobic jar at 42°C for 20 hr. After incubation, the enriched culture was streaked onto three selective differential media including Mac Conkey agar (MAC) as low selectivity medium, Xylose lysine deoxycholate agar (XLD) as moderative selectivity, and Hektoen enteric agar (HE) as highly selectively medium and incubated aerobically at 37° C for 18–24 hr.

Suspected *Providencia* spp. and *Morganella* spp. colonies obtained were tested with some preliminary biochemical tests, including motility in semi-solid nutrient agar (Himedia laboratories, India), triple sugar iron agar (TSI), and Lysine iron decarboxylase agar (LIA) and oxidase test. All media used except for semi-solid nutrient agar were purchased from Oxoid Limited, United Kingdom. *Providencia* and *Morganella* positive isolates were further identified at specie levels by the API 20E (BioMe´rieux) biochemical strip for Enterobacteriaceae family.

Results and Discussion

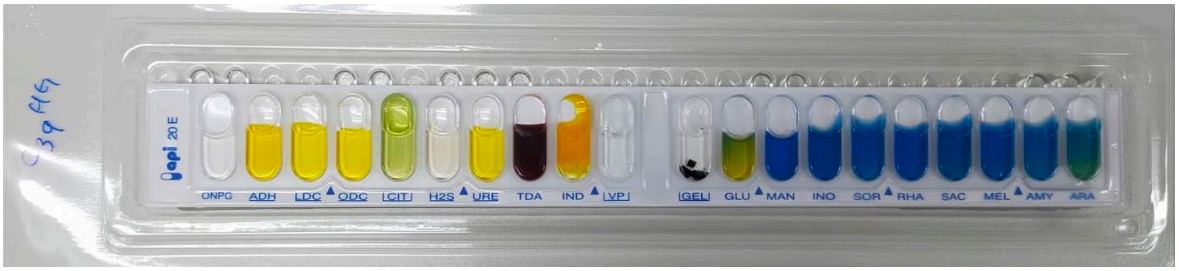
In this study, suspected 18 *Providencia* spp. and 17 *Morganella* spp. colonies appearance on three selective differential media and characteristics results of biochemical tests were shown in Table 1. All suspected *Providencia* spp. and *Morganella* spp. colonies appeared as colourless, variable in motility, alkaline slant and acid butt, H_2S negative in TSI, red slant and acid butt, H_2S negative in LIA and negative oxidase test. Both target bacteria could not ferment lactose or sucrose, but be able to ferment glucose only under anaerobic condition in TSI. Additionally, they could not produce H_2S. In case of LIA, they showed activities of lysine deaminase and decarboxylase, but no H_2S production was observed in LIA. Lysine deamination combined with ferric ammonium citrate and formed a burgundy colour on the slant area. In addition, the target organism could not produce cytochrome oxidase enzyme. Therefore, oxidase activity was negative.

Table 1 Potential colonial appearances and characteristics of *Providencia* and *Morganella* isolates

Bacteria	Appearance of suspect colony			Biochemical Test			
	XLD	HE	MAC	Motility	TSI	LIA	Oxidase test
Providencia	Colorless	Colorless	Colorless (lactose negative colony)	Variable	Alkaline slant and acid butt H_2S negative	Red slant/ acid butt H_2S negative	Negative
Morganella	Colorless	Colorless	Colorless (lactose negative colony)	Variable	Alkaline slant and acid butt H_2S negative	Red slant/ acid butt H_2S negative	Negative

Totally, 13 suspected isolates of *Providencia* spp. were isolated from 18 chicken ground meat samples and 5 suspected isolates of *Providencia* spp. were isolated from 10 pork ground meat samples. Suspected isolates obtained after preliminary biochemical tests were tested with the API 20E. The result is shown in Fig. 1A and 1B. Identification percentage of *P. alcalifaciens* or *P. rustigianii* showed 89.3% in API 20E. Eighteen suspected *Providencia* spp. isolated from chicken ground meat and pork ground meat samples were identified as *P. alcalifaciens* or *P. rustigianii.* From the obtained results, the API 20E cannot differentiate the specie levels between *P. alcalifaciens* and *P. rustigianii*. Hu et al. (2019) described that both *P. alcalifaciens* and *P. rustigianii* have the same biochemical reactions. Therefore, the molecular-based techniques (Polymerase chain reaction (PCR) and real-time PCR) and whole genome sequence are needed to be performed to identify the species of those *Providencia*. Recently, *Providencia* spp. concerned with diarrhoea and urinary tract infection have been rising in both developed and developing countries (Di *et al*., 2018). In the present study, the prevalence percentage of 13 suspected *Providencia* spp. from 18 chicken ground meat samples was 72%. The prevalence percentage of 5 suspected *Providencia* spp. from 10 chicken ground meat samples was 50%. Both chicken and pork ground meat samples were noticeably contaminated with *Providencia* spp., including *P. alcalifaciens* or *P. rustigianii*. Shima et al. (2015) reported that the prevalence of *Providencia* spp. from raw chicken, pork and beef samples was 65%, 68% and 72%, respectively. In addition, *P. alcalifaciens*, *P. rettgeri*, *P. sturatii* and *P. rustigianii* were isolated from both raw meat samples and diarrhoea patients (Shima et al., 2015).

(A)



(B)

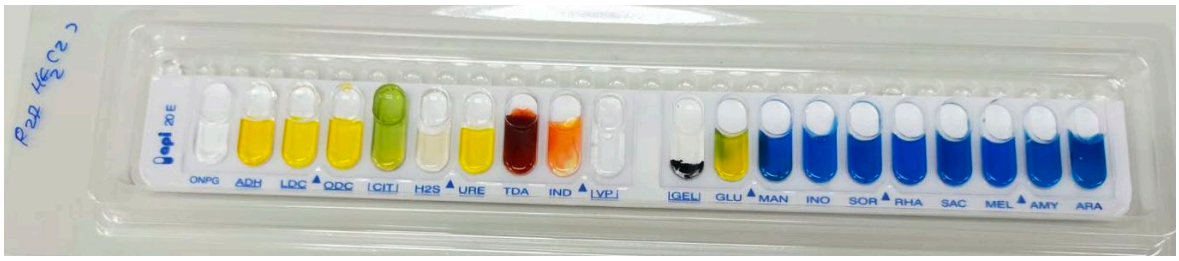


Fig. 1 Representative results of API 20E for identification of *P. alcalifaciens* or *P. rustigianii* isolated from chicken ground meat sample purchased from Talaad Thai market (A) and *P. alcalifaciens* or *P. rustigianii* isolated from pork ground meat sample purchased from Rangsit market (B)

Another study by Di et al. (2018) showed that 42% *Providencia* spp. contaminated in beef, pork and chicken meats in China and Japan and four species including *P. alcalifaciens*, *P. rustigianii*, *P. sturatii* and *P. rettgeri* were identified from those retail meats. They reported that retail meats were the potential source of *Providencia* transmission to humans and could be cause a diarrhoea. It seems that various *Providencia* spp. contamination in meat samples is due to different collected samples, different samples sizes, and geographical conditions as well as different isolation methods. Furthermore, Nahar et al. (2016) reported that *P. sturatii* was found in chicken droppings in local farms in Bangladesh. Therefore, their study pointed out that *P. sturatii* has been circulating in poultry farms and environments.

In the present study after testing with API 20E (Fig. 2), all 10 suspected *Morganella* spp. isolates from 18 chicken ground meat samples were identified as *M. morganii* and all 7 suspected *Morganella* spp. isolates from 10 pork ground meat samples were confirmed as *M. morganii*. Identification percentage of *Morganella morganii* showed 99.9% in API 20E. The prevalence percentage of 10 suspected *Morganella morganii* from 18 chicken ground meat samples was 55%. The prevalence percentage of 7 suspected *Morganella morganii* from 10 pork ground meat samples was 70% respectively. The prevalence of *M. morganii* in chicken and pork ground meat samples in our study is higher than the previous study reported that 3 isolates of *M. morganii* with 1.1% from retail chicken in Middle Tennessee (Kilonzo-Nthenge et al., 2013). Another study by Li et al. (2018) found that *M. morganii* was isolated from milk and cows. Moreover, *M. morganii* infection caused high motility rate of about 57% and caused severe pathological lesions in cattle. Therefore, this study pointed out that *M. morganii* as a potential pathogen for zoonotic. Chen et al. (2019) reported that *M. morganii* was presented in swine farms in China. Jones-Dias et al. (2016) reported that *M. morganii* was isolated from 13 days old broiler in poultry farm in Portugal. Besides, *M. morganii* contaminated in foods shows the importance of public health because it is an emerging pathogen of food animals and has

zoonotic potential. However, no clear evidence about the foodborne illness related to *M. morganii* has been published. However, this study and other studies pointed out that *M. morganii* is the potential foodborne pathogens from meats such as chicken and pork.

(A)



(B)

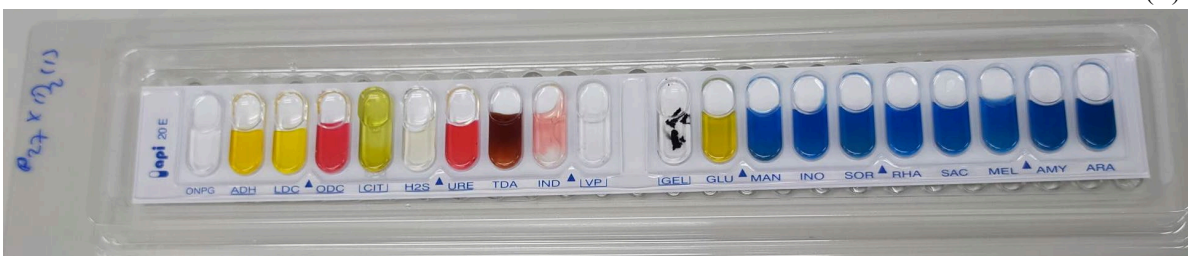


Fig. 2 Representative results of API20E for identification of *M. morganii* isolated from chicken ground meat sample purchased from Saphan Mai market (A) and *M. morganii* isolated from pork ground meat sample purchased from Rangsit market (B)

Conclusion

To the best of our knowledge, this is the first report of the isolation and identification of *M. morganii* from chicken ground meats and pork ground meats in Thailand. In this study, we also present the isolation and identification of some species of *Providencia* from chicken ground meats and pork ground meats. However, more samples at different locations need to be studied in order to present prevalence information of *M. morganii* and *Providencia* spp. in Thailand.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This work was supported by a grant from TICA (Thailand International Cooperation Agency) in Thailand. Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for support of registration fee for KU 59th conference.

References

Chen, Y., Lei, C., Zuo, L., Kong, L., Kang, Z., Zeng, J., Zhang, X., Wang, H. 2019. A novel Cfr-carrying Tn 7 transposon derivative characterized in *Morganella morganii* of swine origin in China. Journal of Antimicrobial Chemotherapy 74: 603–606. doi.org/10.1093/jac/dky494

Di, H., Liang, S., Li, Q., Shi, L., Shima, A., Meng, H., Yan, H., Yamasaki, S. 2018. *Providencia* in retail meats from Guangzhou, China and Osaka, Japan: Prevalence, antimicrobial resistance and characterization of classes 1, 2 and 3 integrons. Journal of Veterinary Medical Science 80: 829–835. doi: 10.1292/jvms.18-0037

Du, Y., Li, H., Yin, Z., Rozalski, A., Torzewska, A., Yang, P., Qian, C., Xu, T., Cao, H., Wu, P. 2018. Development of a molecular serotyping scheme and a multiplexed luminex-based array for *Providencia*. Journal of Microbiological Methods 153: 14–23. doi.org/10.1016/j.mimet.2018.08.009

Hu, Y., Feng, Y., Zhang, X., Zong, Z. 2019. *Providencia huaxiensis sp. nov.*, ecovered from a human rectal swab. International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology. 69: 2638–2643. doi.org/ 10.1099/ijsem.

ISO, 2004. ISO 21567:2004 Microbiology of food and animal feeding stuffs-horizontal method for detection of *Shigella* spp.

Jones-Dias, D., Clemente, L., Moura, I.B., Sampaio, D.A., Albuquerque, T., Vieira, L., Manageiro, V., Caniça, M. 2016. Draft genomic analysis of an avian multidrug resistant *Morganella morganii* isolate carrying Qnrd1. Frontiers in Microbiology Journal 7(1660): 1–6. doi.org/10.3389/fmicb.2016.01660

Kilonzo-Nthenge, A., Rotich, E., Nahashon, S. 2013. Evaluation of drug-resistant *Enterobacteriaceae* in retail poultry and beef. Poultry Science 92: 1098–1107. doi.org/ 10.3382/ps.2012-02581

Li, G., Niu, X., Yuan, S., Liang, L., Liu, Y., Hu, L., Liu, J., Cheng, Z. 2018. Emergence of *Morganella morganii* subsp. *morganii* in dairy calves, China. Journal of Emerging Microbes and Infections. 7: 1–12. doi.org/10.1038/s41426-018-0173-3

Minnullina, L., Pudova, D., Shagimardanova, E., Shigapova, L., Sharipova M., Mardanova, A. 2019. Comparative genome analysis of uropathogenic *Morganella morganii* strains. Journal of Frontiers in Cellular and Infection Microbiology 9: 167. doi.org/10.3389/fcimb.2019.00167

Nahar, A., Marzan, M., Siddiquee, M., Nahar, S., Anwar, K.S., Islam, S. 2016. Multidrug resistant *Providencia stuartii* in chicken droppings: Public health implications for poultry workers and associated communities in nearby Dhaka Metropolis, Bangladesh. British Microbiology Research Journal 14: 1. doi.org/10.9734/BMJR/2016/2588

Palmieri, N., Hess, C., Hess, M., Alispahic, M.J.B.g. 2020. Sequencing of five poultry strains elucidates phylogenetic relationships and divergence in virulence genes in *Morganella morganii.* BMC Genomics Journal 21: 1–13. doi.org/10.1186/s12864-020-070001-2

Shah, M.M., Odoyo, E., Ichinose, Y. 2019. Epidemiology and pathogenesis of *Providencia alcalifaciens* infections. The American Journal of Tropical Medicine Hygiene 101: 290–293. doi.org/10.4269/ajtmh.18-0376

Shima, A., Hinenoya, A., Samosornsuk, W., Samosornsuk, S., Mungkornkaew, N., Yamasaki, S. 2015. Prevalence of *Providencia* strains among patients with diarrhea and retail meats in Thailand. Japanese Journal of Infectious Diseases 69: 323–325. doi.org/10.7883/yoken.JJID.2015.224

Wongsariya, K., Bunyapraphatsara, N., Yasawong, M., Chomnawang, M.T. 2016. Development of molecular approach based on PCR assay for detection of histamine producing bacteria. Journal of Food Science Technology 53: 640–648.

Yamaki, S., Kuronuma, S., Kawai, Y., Yamazaki, K. 2020. Inhibitory Effect of a combination with novel jumbo bacteriophages Φmv-1 and Φmv-4 on Morganella Morganii Subsp. Morganii growth and histamine accumulation. International Journal of food microbiology 317(108457): 1–9.

Possible household washing procedure to reduce nitrate content in fresh vegetables from supermarket

Karnjana Vachpanich[a,b], Kanithaporn Vangnai[a], Pariyanuj Chulaka[c], Kullanart Tongkhao[a,b,*]
[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[b]Center of Excellence on Agriculture Biotechnology: (AG-BIO/PERDO), Nakhon Pathom 73140, Thailand.
[c]Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: kullanart.t@ku.th

Abstract

FAO/WHO recommended the intake of a minimum of 400 g per day of fruit and vegetables for the prevention of chronic diseases. However, vegetables were reported as a major source of nitrate content, which may result methemoglobinemia and carcinogenesses. Washing procedures were among the most common processes applied to a leafy vegetable prior consumption, however there were no reports on their efficient on nitrate reduction. The purpose of this study was to investigate different washing procedures in reducing nitrate content in green oak lettuce, Chinese kale and water spinach. The washing procedures included soaking for 10 min in a ratio of 1 g of vegetable per 20 milliliters of solution in tap water, 0.35% w/v salt solution, 0.5% v/v vinegar solution, 0.07% w/v sodium bicarbonate and 0.76% v/v alkyl polyglycoside solution, and rinsing under running water at 2L/min and 5 L/min for 2 min. Soaking and rinsing procedures significantly reduced nitrate level in green oak about 25% to 48% and water spinach about 40% to 54% from fresh vegetables, respectively. Reduction of nitrate level in Chinese kale after soaking and rinsing were not significantly different ($p > 0.05$) from the fresh Chinese kale. Therefore, washing process was suitable for decreasing nitrate content in vegetables.

Keywords: Fresh vegetables, Nitrate content, Reduction, Washing

Introduction

FAO/WHO recommended the intake of a minimum of 400 g per day of fruit and vegetables because consisted of phytochemicals, mineral and fiber for prevention of chronic diseases. Washing of vegetables is a basic method that could reduce risk from physical =, and chemical hazard is pesticide contaminant. Uhlig et al. (2017) demonstrated that washing at high flow rate could reduce aerobic count to 80%. Zhang et al. (2007) showed that washing vegetable could decrease pesticides residue in cabbage about 15% to 79% depending on water washing. The efficacy of water washing in removing pesticide residue mainly depends on the solubility of the pesticide and surface characteristics of the fruit or vegetable (Bhilwadikar et al., 2019). In addition, excess fertilizers in vegetables could be are classified as chemical hazard as well. For example, nitrate found accumulated in vegetable as a resulted of nitrogen fertilizer, which is a primary nutrient for vegetables. In addition, FAO (2019) showed that world demand of nitrogen fertilizer increasing in every year.

Nitrate is a non-toxic substance. However, 5% of nitrate could convert to nitrite at stomach (Kobayashi et al., 2015). Then the nitrate could combine with amine compounds from foods, resulted in the formation of nitrosamine. Nitrite and nitrosamine in human body may cause methemoglobinemia and cancer, respectively. Generally, during pre-harvesting step could br use to reduce nitrate such as using light prior harvesting (Khan et al., 2018), replacing the nutrient solution with water before harvesting or not providing nitrogen before harvest (Santamaria et al., 2001). In addition, post-harvest management is another factor that affects the nitrate content in vegetable (Lin et al., 1980). Therefore, The European Food Safety Authority (EFSA) has determined safe levels or acceptable daily intakes (ADIs) for nitrate is 3.7 milligrams per kilogram of body weight per day (mg/kg bw/day). In the present research, we report a survey of nitrate content in edible parts of fresh leafy vegetables labeling as organic and non-organic available from large retail supermarket compared with fresh non-organic vegetables from fresh market. Then we further investigate the effect of household washing methods on nitrate reduction in leafy vegetables.

Meterials and Methods

Sample selection and collection

All total 60 samples included 4 types of vegetables base on most popular for consumption and distribution: green oak lettuce, red oak lettuce, Chinese kale and water spinach. Organic vegetables were collected from the retail supermarket. Whereas, non-organic vegetables were collected from both the retail supermarket and the fresh market (Si Mum Mueang market, Pathum Thani). The vegetables were stored in ice box during transportation with controlled time to less than 2 hr to the laboratory. After-that the samples were kept in a refrigerator at 4ºC overnight before analyze.

Washing procedure

Methods for washing vegetables followed by Thai FDA (2010). After removing the inedible portion 50 grams of fresh vegetable were soaked in different solutions for 10 minutes consist of (i) Tap water, 0.35% w/v salt solution, 0.5% v/v vinegar solution, 0.07% w/v sodium

bicarbonate and 0.76% v/v alkyl polyglycoside solution. All soaking conditions were prepared in a ratio of 1 gram of vegetable per 20 milliliters of solution. After that the vegetables were washed by passing with tap water at a flow rate of 2 litter and 5 litter per minutes for 2 minutes. All treatment used chemical food grade. Control is vegetables before washing.

Extraction procedure

Methods for sample extraction were adapted from Chou et al. (2003). 50 grams of each vegetables included edible parts were ground. The ground sample was randomly selected for 5 grams prior blended with 80 milliliters of deionized water until homogeneous. The mixture were incubated in water bath at 80ºC for 20 minutes then it was set at room temperature. After that, the mixture was filterred by using filter paper No. 4. The supernatant was then transferred to a 100 milliliter-volumetric flask and adjusted until 100 milliliters with deionize water. The extracts were stored in refrigerator at 4ºC for further step.

Determination of nitrate

Sample analyze was modified from Chou et al. (2003). High performance liquid chromatography system consists of a Shimadzu SPD-M20A with diode array detector and a Shim-pack C18 HPLC column: 5 μm, 250 mm. × 4.6 I.D. The mobile phase solution consists of methanol HPLCgrade 30% v/v with the addition of n-octylammonium orthophosphate reagent. The extracted sample was adjusted to about pH 7.0 ± 0.1 by using 10% orthorphophoric acid v/v prior filtering with 0.45 μm nylon filter membrane and sonicating before injection. The flow rate 0.8 ml/min at UV wavelength 213nm were used. The injection volume was 20 μl. Standard solution was prepared from a stock solution of sodium nitrate 100 mg/L. The concentration of standard curve comprises 15, 30, 45, 60, 75 mg/L and stored at 4ºC prior used.

Statistical analysis

Completely Random Design was used in this study. All treatments were conducted in 3 replicates of measurement have been applied in this study. IBM SPSS Statistics Ver.19 was used for analyses variance (ANOVA) and compared means using Tukey's multiple comparison. The confidence level was 95% (p = 0.05).

Result and Discussion

Comparisons nitrate content (mg/100 g) in fresh green oak lettuce, red oak lettuce, Chinese kale and water spinach sampled from supermarket and fresh market

Nitrate levels in different type of vegetable are shown in Table 1, the mean of nitrate found in our samples varied from 1,469.04 to 4,430.66 mg per kg fresh weight. Organic vegetables had the lowest nitrate content in all four types of vegetable used in this study including: green oak lettuce (146.90 mg/100 g), red oak lettuce (196.75 mg/100 g), Chinese kale (239.53 mg/100 g) and water spinach (200.38 mg/100 g). Whereas, the non-organic vegetable from supermarket included green oak lettuce (274.29 mg/100 g), red oak lettuce (231.55 mg/100 g), Chinese kale (443.06 mg/100 g) and water spinach (367.17 mg/100 g) and fresh market included green oak lettuce (254.89 mg/100 g), red oak lettuce (340.44 mg/100 g),

Chinese kale (298.77 mg/100 g) and water spinach (274.95 mg/100 g) showed similar nitrate content.

The higher nitrate content in the vegetables grown in non-organic system could be the result of possible higher amount of chemical fertilizer used, whereas the organic system which used low or no chemical fertilizer due to its nutrient provided by soil-microbial activity (Guadagnin et al., 2005). Therefore, the non-organic vegetable can uptake the fertilizer better than the organic fertilizer. Our nitrate content results showed similar trend as reported by Nascimento (2019) and Nunez De Gonzalez et al. (2015) which revealed that nitrate content in organic vegetables such as lettuce and spinach showed lower content than conventional vegetables from commercial samples.

Table 1 Nitrate content (mg/100 g fresh weight: FW) in four type of vegetables

Type of vegetables	Nitrate content mg/100 g FW (minimum - maximum)		
	Supermarket		Fresh market
	Organic	Non-organic	Non-organic
Green oak lettuce^{ns}	146.90 ± 48.55^{NS}	274.29 ± 106.55^{AB}	254.89 ± 136.14^{NS}
	(60.90 – 175.81)	(95.38 – 357.39)	(22.01 – 376.74)
Red oak lettuce^{ns}	196.75 ± 65.91^{NS}	231.55 ± 109.36^{B}	340.44 ± 50.02^{NS}
	(124.98 – 269.61)	(2,161.92 – 3518.40)	(295.83 – 415.47)
Chinese kale^{ns}	239.53 ± 167.69^{NS}	443.06 ± 131.11^{A}	298.77 ± 160.78^{NS}
	(127.22 – 532.15)	(305.18 – 618.07)	(47.68 – 444.12)
Water spinach	200.38 ± 163.82$^{a, NS}$	367.17 ± 41.21$^{ab, AB}$	274.95 ±136.42$^{b, NS}$
	(54.70 – 420.27)	(312.11 – 425.34)	(36.73 – 375.09)

The data are the means ± SD.

$^{a, b}$Different letters in horozontal row indicate significant differences treatments ($p \leq 0.05$)

$^{A, B}$Different letters in vertical column indicate significant differences treatments ($p \leq 0.05$)

$^{ns, NS}$No significant difference in the same row and column respectively ($p > 0.05$)

Influence of household washing on nitrate content (mg/kg) in fresh green oak lettuce, Chinese kale and water spinach sampled from supermarket

The effect of various household washing methods were shown in Table 2.

Green oak lettuce. Soaking green oak lettuce in 0.5% v/v vinegar solution 10 min were found that it can reduce nitrate level from control 163.52 to 84.03 mg/100 g FW (48.61%) more than 0.76% v/v alkyl polyglycoside, 0.35% w/v Salt, 0.07% w/v $NaHCO_3$ and tap water, respectively ($p < 0.05$). In addition, reduction of green oak lettuce rinse under running water flow rate 2L and 5L per min reduce nitrate from control 163.52 to 95.93 and 121.49 mg/100 g FW (41.33% and 25.70%), respectively ($p < 0.05$).

Chinese kale. Reduction of nitrate content in Chinese kale found that there were not significant difference in the nitrate level of all treatment ($p > 0.05$). Though soaking in 0.07% w/v $NaHCO_3$ and 0.76% v/v alkyl polyglycoside can reduce nitrate content in Chinese kale more than other solutions are 343.23 to 264.62 and 296.96 mg/100 g FW (22.90% and 13.19%), respectively.

Water spinach. After soaking water spinach in different solution showed the lowest nitrate level when washing by tap water from control 452.32 to 229.74 mg/100 g FW (49.21%) then 0.35% w/v Salt, 0.07% w/v $NaHCO_3$, 0.76v/v alkyl polyglycoside and 0.5% v/v Vinegar but were not significant in each treatment, while rinsing under running tap water 2L and 5L per min can reduce nitrate level more than soaking from 452.32 to 205.04 and 213.78 mg/100 g FW (54.67% and 52.74%) but were not significant ($p > 0.05$).

From the result showed washing vegetable by soaking or rinsing can decrease nitrate content in some vegetable because of nitrate is solubility compound when washing vegetable nitrate release from vegetable to washing water (Ebrahimi et al., 2020), however nitrate release more or less depending on the characteristic of vegetable.

Table 2 Average of nitrate level (mg/100 g fresh weight: FW) in green oak lettuce, Chinese kale and water spinach before and after washing

Washing procedure	Nitrate content (mean ± SD) mg/100 g FW		
	Green oak lettuce	Chinese kale	Water spinach
Control	163.52 ± 7.35^{a}	343.23 ± 16.16^{ns}	452.32 ± 70.30^{a}
Soaking			
Tap water	101.53 ± 15.60^{bc}	335.41 ± 24.24^{ns}	229.74 ± 35.29^{b}
0.35% w/v Salt	94.67 ± 12.02^{bc}	330.49 ± 89.16^{ns}	253.61 ± 17.40^{b}
0.5% v/v Vinegar	84.03 ± 6.92 ^{c}	314.97 ± 37.62^{ns}	343.23 ± 16.16^{b}
0.07% w/v $NaHCO_3$	94.71 ± 12.55^{bc}	264.62 ± 85.24^{ns}	261.63 ± 34.72^{b}
0.76% v/v alkyl polyglycoside	92.90 ± 14.03 ^{c}	297.96 ± 44.24^{ns}	265.72 ± 16.04^{b}
Running water			
2L/min	95.93 ± 23.35^{bc}	347.30 ± 11.55^{ns}	205.04 ± 92.24^{b}
5L/min	121.49 ± 19.38 ^{b}	341.70 ± 32.04^{ns}	213.78 ± 24.3 ^{b}

The data are the means ± SD of three replicate samples.

$^{a, b}$Different letters in vertical row indicate significant differences treatments ($p \leq 0.05$)

^{ns}No significant difference ($p > 0.05$)

Conclusions

Nitrate can be found in many foods, but vegetables are major source of nitrate. Accumulation of nitrate in non-organic vegetables was found higher than organic vegetables while vegetables from supermarket tended to be found higher amounts of nitrate content than vegetables from fresh market. Washing method could reduce nitrate content around 3% to 50%. However, the suitable method to decrease nitrate content for all samples in this study is 0.07% w/v $NaHCO_3$. Therefore, washing process was suitable for decreasing nitrate content in vegetables.

Acknowledgement

This research was supported by the Thai Health Promotion Foundation, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry at Kasetsart University and Center of Excellence on Aricultural Biotechnology (AG-BIO/PERDO) S&T Postgraduate Education and Research Development Office (PERDO) Project No. AG-BIO 59-004-001.

References

Anjana, S.U., Iqbal, M. 2007. Nitrate accumulation in plants, factors affecting the process, and human health implications. A review. J. Agronomy for Sustainable Development 27: 45–57. doi:10.1051/agro:2006021

Bhliwadikar, T., Pounraj, S., Manivannan, S., Rastogi, N.K., Negi, P.S. 2019. Decontamination of microorganism and peticides from fresh and vegetables: Acomprehensive review from common household processes to modern techniques. J. Comprehensive Reviews Food Science Food safety 184: 1003–1038. doi: 10111/1541-4337.12453

Chou, S.-S., CHUNG, J.-C., HWANG2, D.-F. 2003. A high performance liquid chromatography method for determining nitrate and nitrite levels in vegetables. J. Food and Drug Analysis 11: 233–238.

Ebrahimi, R., Ahmadian, A., Ferdousi, A., Zandi, S., Shahmoradi, B., Ghanbari, R. 2020. Effect of washing and cooking on nitrate content of potatoes (cv. Diamant) and implications for mitigating human health risk in Iran. J European Association for Potato Research (EAPR) 63: 449–462. doi:10.1007/s11540-020-09450-4

FAO. 2019. World fertilizer trends and outlook to 2022: Food and agriculture organization of the United Nations.

EFSA. 2008. Nitrate in vegetables Scientific Opinion of the panel on contaminants in the food chain. J The EFSA 689: 1–79.

Guadagnin, S.G., Rath, S., Reyes, F.G. 2005. Evaluation of the nitrate content in leaf vegetables produced through different agricultural systems. J. Food Addit. Contam. 22: 1203–1208.doi:10.1080/02652030500239649

Kobayashi, J., Ohtake, K., Uchida, H. 2015. NO-Rich diet for lifestyle diseases. J. Nutrients
7: 4911–4937. doi:10.3390/nu7064911

Khan, K.A., Yan, Z., He, D. 2018. Impact of light intensity and nitrogen of nutrient solution on nitrate content in three lettuce cultivars prior to harvest. J. Agricultural Science 10: doi:10.5539/jas.v10n6p99

Kyriacou, M.C., Soteriou, G.A., Colla, G., Rouphael, Y. 2019. The occurrence of nitrate and nitrite in Mediterranean fresh salad vegetables and its modulation by preharvest practices and postharvest conditions. J. Food Chem. 285: 468–477. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.02.001

Lin, J.K., Yen, J.Y. 1980. Changes in the nitrate and nitrite contents of fresh vegetables during cultivation and post-harvest storage. J. Food Cosmet. Toxicol. 18: 597–603. doi: 10.1016/s0015-6264(80)80007-1

Nascimento, A.L. 2019. Nitrate and nitrite in commercial samples of conventional organic and hydroponic leafy vegetables. J Food and Agriculture. doi:10.9755/ejfa.2019.v31.i10.2013

Nunez de Gonzalez, M.T., Osburn, W.N., Hardin, M.D., Longnecker, M., Garg, H.K., Bryan, N.S., et al. 2015. A survey of nitrate and nitrite concentrations in conventional and organic-labeled raw vegetables at retail. J Food Sci 80: 942–949. doi:10.1111/1750-3841.12858

Santamaria, P. 2006. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. Journal of The Science of Food and Agriculture 86: 10–17. doi:10.1002/jsfa.2351

Santamaria, P., Elia, A., Serio, F., Todaro, E. 1999. A survey of nitrate and oxalate content in fresh vegetables. J The Science of Food and Agriculture 79: 1882–1888.

Santamaria, P., Gonnella, M., Elia, A., Parente, A., Serio, F. 2001. Ways of reducing rocket salad nitrate content. J Acta Horticulturae 529–536. doi:10.17660/ActaHortic.2001.548.64

Uhlig, E., Olsson, C., He, J., Stark, T., Sadowska, Z., Molin, G. 2017. Effect of household washing on bacterial load and removal of Escherichia coli from lettuce and “ready-to-eat” salads. J Food Sci Nutrient 5: 1215–1220. doi: 10.1002/fsn3.514

Zhang, Z.-Y., Liu, X-J., Hong, X.-Y. 2007. Effect of home preparation on pesticide residue in cabbage. J Food Control 18: 1484–1487. doi:10.1016/j.foodcont.2006.11.002

Effect of *Lactobacillus brevis* TISTR 860 and *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 on gamma-aminobutyric acid content in fermented rice flour: feasibility study

Chonnipa Chittrakhani[a], Sirichai Songsermpong[a,*], Sudsai Trevanich[a], Rashidah Sukor[b]
[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[b]Department of Food Science, Faculty of Food Science and Technology, University Putra Malaysia, Serdang, Selangor 43400, Malaysia.
*Corresponding author. E-mail address: fagisrsp@ku.ac.th

Abstract

This research aimed to reduce the fermentation time of fermented rice flour for Kanomjeen noodle to 24 hours by adding the initial starter cultures which are *Lactobacillus brevis* TISTR 860 (LB) and *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 (LP) in rice slurry to achieve the good fermentation and high gamma-aminobutyric acid (GABA) content. Before the fermentation with LB and LP, the pH value of rice slurry was adjusted to 4.5 and enriched 2% of monosodium glutamate (MSG). The results showed that LB was able to grow from 8.04 to 9.33 log CFU/g and LP could grow from 7.91 to 9.31 log CFU/g. The titratable acidity of LP was increased to 2.41% while LB was 1.004%. In addition, the pH values were gradually decreased in LP and LB from 4.5 to 4.07 and 4.37, respectively. GABA content after 24 hours, for LB was 31.72mg / 100g dry basis while LP was 0.45 mg/100g dry basis. In conclusion, LB was suitable for good fermentation and produced high GABA in 24 hr.

Keywords: Fermented rice flour, GABA, Kanomjeen, Lactobacilli

Introduction

Broken rice is obtained from rice milling process that is a by-product which has low value. Kanomjeen is a Thai traditional rice noodle made from wet milling of broken rice, removing excess water then steaming for making outer part of fully cooked flour and kneading with inner raw rice flour and some hot water. Then rice noodles were pressed through the mold into boiling water until fully cooked and then cooled. Kanomjeen is a popular rice noodles throughout Southeast Asia but maybe called by other names in different areas such as Mohinga in Myanmar, Khao Pun in Laos, Bun in Vietnam, Laksa in Malaysia and Indonesia (Satmalee et al., 2017). Rice noodles can be classified into 2 categories, namely, fermented rice noodles and non-fermented rice noodles. The fermented rice noodles are more popular than another one because it has a unique aroma, flavor, and color (Lu et al., 2005). The processing of making fermented rice noodles relies on natural fermentation which uses natural microorganisms for fermentation, it might take 2-6 days to ferment rice noodles (Kradangar and Songsermpong, 2015). Most of the bacteria found in fermented foods are Lactic acid bacteria (LAB). Many fermented foods, such as kimchi, tempe, tea leaves and fermented rice noodles were found to contain gamma-aminobutyric acid (GABA) which is obtained from the fermentation process (Diana et al., 2014). GABA is generated through the irreversible α-decarboxylation reaction of L-glutamic acid which is catalyzed by glutamic acid decarboxylase enzyme (GAD) from LAB (Kook and Cho, 2013). Moreover, GABA has been studied in the medical field because of its numerous physiological functions such as relaxing, anti-anxiety, and anti-convulsive effect (Nakamura et al., 2009). It had been reported that GABA has the ability to reduce blood pressure (Kook and Cho, 2013). Oupathumpanont et al. (2009) used *Lactobacillus plantarum* to study on its fermentation of fermented rice flour. The results showed the reduction of fermentation time within 24 hr but the researcher team did not study on its GABA production. Saraphanchotiwitthaya and Sripakit (2018) could fermented red kidney bean and barley grain with *Lactobacillus brevis* TISTR 860 and showed GABA yield of 44.47 mM. Due to the limitation of knowledge whether which lactic acid bacteria can produce GABA in the fermented rice flour; therefore, comparison of LP and LB was studied. The objective of this research is to study the growth of *Lactobacillus brevis* TISTR 860 and *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 and gamma-aminobutyric acid production in fermented rice flour.

Materials and Methods

Preparation of Lactic acid bacteria

Lactobacillus brevis TISTR 860 (LB) was isolated from pickled bastard mustard and *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 (LP) was isolated from Fermented rice flour. Both LB and LP were bought from Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Thailand. LB and LP strains were cultured in MRS broth at 30°C for 48 hr and used as the inoculum (Saraphanchotiwitthaya and Sripakit, 2018).

Preparation of fermented rice

White rice (Leuang Pratew 123 variety) was washed twice then soaked overnight in water with a ration of rice to water of 1:2 (Oupathumpanont et al., 2009). Rice was washed

again twice before wet milling. 2% of monosodium glutamate (MSG) was added in water for wet milling with a ration of rice to water of 1:1 to get rice slurry and then adjusted initial pH value of rice slurry to 4.5 by adding of 88% of lactic acid, food grade (Purac Ltd, Thailand) before inoculated culture strains (Saraphanchotiwitthaya and Sripakit, 2018). LB and LP were inoculated and incubated at 30ºC for 24 hr.

Lactic acid bacteria count

1 mL of sample was transferred to 9 mL of 0.1% peptone. 0.1 mL of sample was transferred to petri dish and pour plates with MRS agar and then incubated at 30°C for 48 hr, after that lactic acid bacteria colony counts were operated.

Determination of pH value and % Titratable acidity

Samples were measured for pH using pH meter, whereas titratable acidity during and after fermentation was determined by titration with 0.1 N sodium hydroxide solution and used phenolphthalein as indicator until it reached the endpoint or a pinkish change occurs. The results were presented as the percentage of lactic acid (Kradangar, 2011).

Determination of gamma-aminobutyric acid (GABA) in rice flour

Dried fermented rice flour samples were determined for GABA content at the Institute of Food Research and Product Development (IFRPD). The institute used the high-performance liquid chromatography method with diode array detector for determination (Kradangar and Songsermpong, 2015). 2 g of dried sample was added with 0.3% sulfosalicylic acid then mixed by using magnetic stirrer. Transferred the solution into centrifuge tube to get clear part solution. After that, added 0.01 M sodium bicarbonate and 3.98 mM Dabsyl choride then heated in water bath at 70ºC. The solution was added ethanol and 0.025 M monopotassium phosphate. Before injection the solution in HPLC the solution was filtered with nylon syringe filter.

Results and Discussion

Effect of fermentation time on lactic acid bacteria growth

At the suitable pH for growth, both LB and LP have the potential for growth as shown in Table 1. In 24 hours, rice flour can be used as a food source for these lactic acid bacteria. Fig. 1 presented their growth cycle starting with lag phase, exponential phase, and stationary phase and declined phase.

Table 1 Log numbers of lactic acid bacteria in different time

Starter culture	Initial starter culture (log cfu/mL)	Lactic acid bacteria (log cfu/g) in different time (hr)				
		0	6	12	18	24
LB	9.03 ± 0.27	7.67 ± 0.00^{c}	7.62 ± 0.03^{c}	9.37 ± 0.03^{a}	9.33 ± 0.09^{a}	8.68 ± 0.08^{b}
LP	8.95 ± 0.27	7.69 ± 0.04^{c}	7.71 ± 0.03^{c}	9.27 ± 0.00^{a}	9.31 ± 0.06^{a}	8.56 ± 0.03^{b}

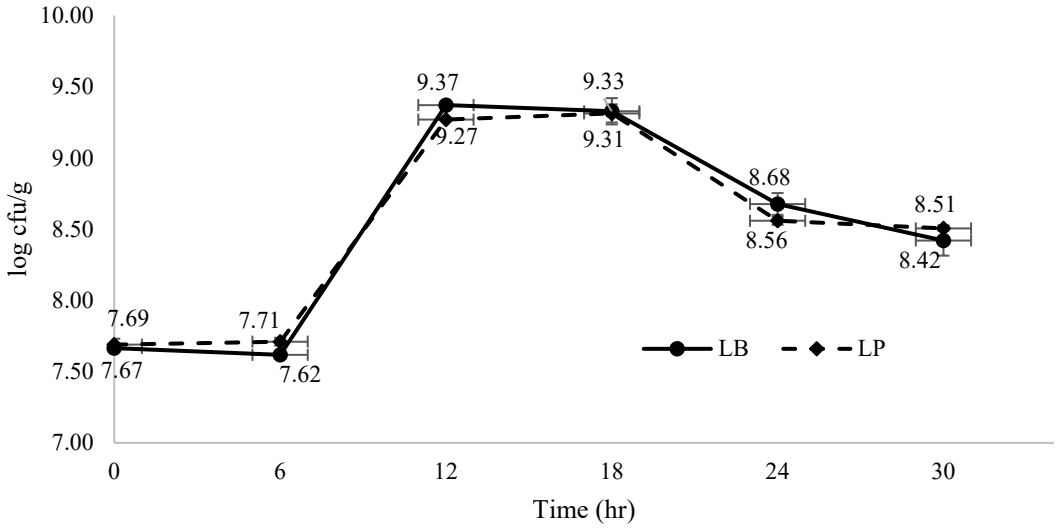


Fig. 1 LB and LP growth curve in the fermentation rice flour during fermentation

Effect of fermentation time on pH value and titratable acidity

The initial pH value of rice slurry samples were adjusted to 4.5 before fermentation. After 24 hr, the pH value of both samples which were fermented by LB and LP strains, gradually decreased. Due to within the fermentation process of lactic acid bacteria, organic acids which were lactic acid and acetic acid were released in the system (Lee et al., 1999). Resulting in higher acidity, presented in lower pH value as showed in Fig. 2.

The pH value results were associated with the more acids produced by both lactic acid strains. As at 18 hr was the period that had the highest growth of LB and LP. Therefore, from 18 hr to 24 hr, the pH were decreased rapidly because the amount of organic acids had accumulated during fermentation.

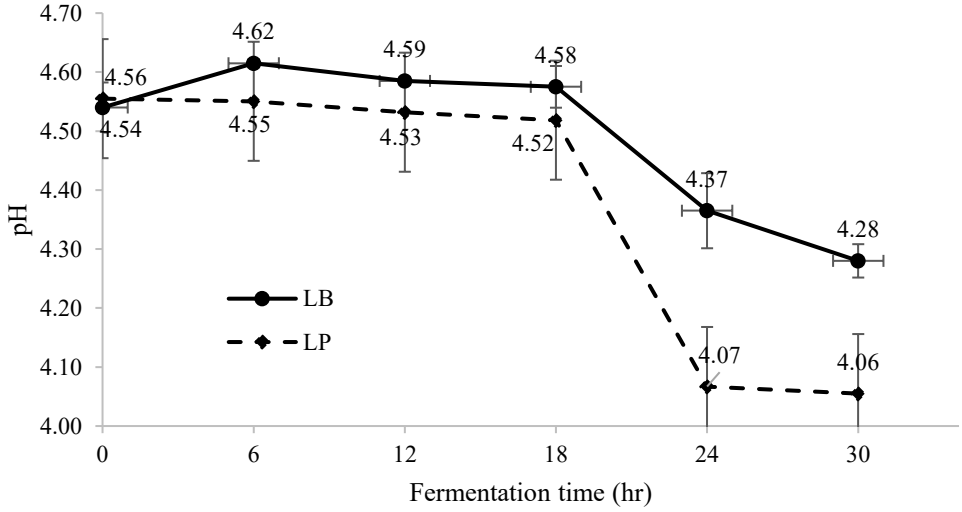


Fig. 2 pH value of LB and LP fermented rice flour during fermentation

Titratable acidity was presented as the amount of lactic acid. It was found that along fermentation time, the amount of lactic acid was increased. However, LP was more capable of producing lactic acid than LB. Fig. 3 showed that LB was able to produce low amounts of lactic acid, thus the acidity increased slowly. While the LP produced the acid quickly and in high amounts.

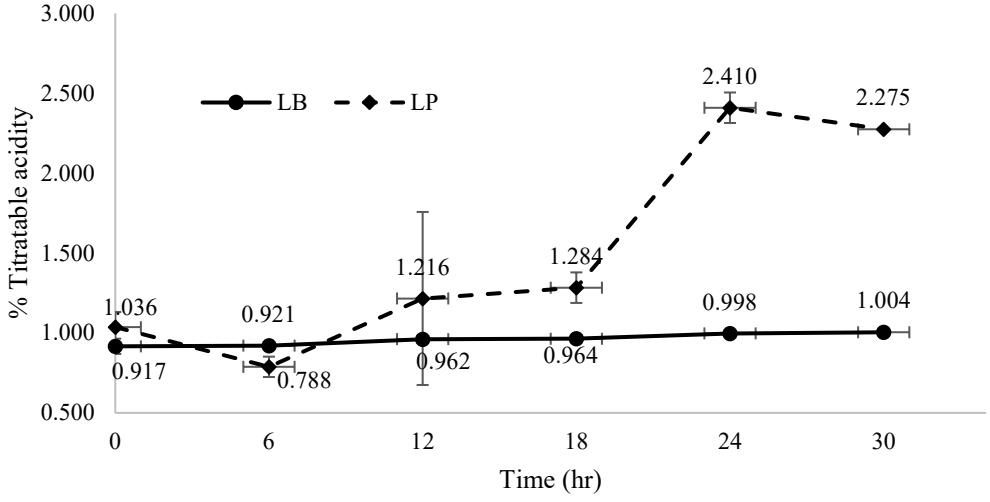


Fig. 3 Titratable acidity of LB and LP fermented rice flour during fermentation

Effect of fermentation with LB and LP on GABA content

Both fermented rice flour samples which were fermented by LB and LP for 24 hr were dried at 55ºC for 5 hr then dried samples were determined the GABA content at IFRPD by using HPLC technique. The results showed that LB produced no GABA at 12 hr but produced GABA in the amount of 31.72 mg/ 100 g dry basis at 24 hr. In contrast, LP produced GABA in the amount of 2.5 mg/ 100 g dry basis at 12 hr and the GABA was reduced to 0.45 mg/ 100 g dry basis at 24 hr. Thus, LB had potential to produce GABA than LP. Saraphanchotiwitthaya and Sripakit (2018) could fermented red kidney bean and barley grain with *Lactobacillus brevis* TISTR 860 and showed GABA yield of 44.47 mM. This is due to before fermentation, 2% MSG was added, which increased the amount of L-glutamic acid, causing the glutamic acid decarboxylase enzyme (GAD) from LAB to catalyzed irreversible α-decarboxylation reaction to get more GABA. Moreover, the main factors of GABA production are pH, substrate and other additives such as carbon source. The optimum pH for glutamate decarboxylase activity is strictly species-dependent. In this case, the optimum pH for LB is 5.0 – 4.2 (Diana et al., 2014) this is the same range as the pH result of LB showed in Fig. 2 but for LP the optimum pH is nearly 5 that was opposed to its pH value result, decreased from 4.5 to 4.0 (Park et al., 2021). Although during fermentation, LP was able to yield a lower pH value and higher titratable acidity. This relate to the lactic acid production ability of LP (Park et al., 2021) better than LB (Wu and Shah, 2018)

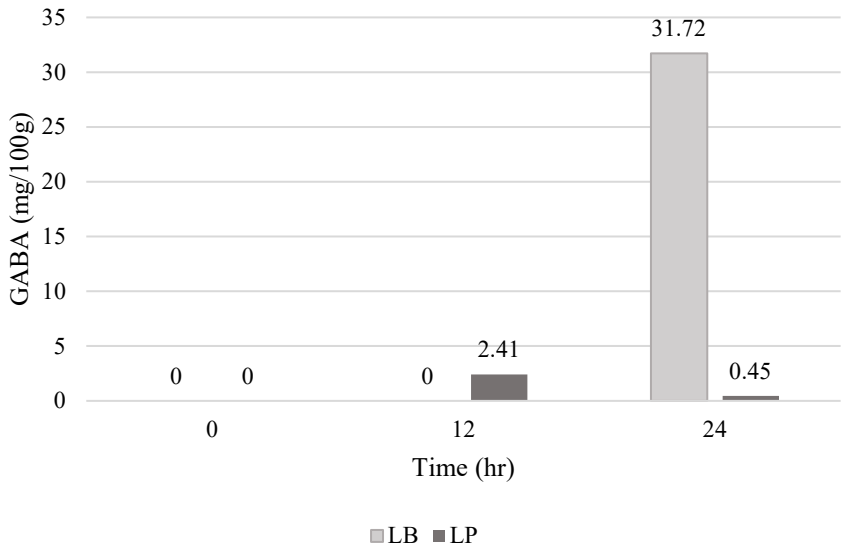


Fig. 4 GABA content changing of fermented rice flour with LB and LP. One replication only.

Conclusion

Lactobacillus brevis TISTR 860 could produce GABA better than *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 in the fermented rice flour due to its potential to catalyze irreversible α-decarboxylation reaction to get GABA with highest content was 31.72mg / 100g dry basis within 24 hr. In contrast, *Lactobacillus plantarum* TISTR 951 was able to produced lactic acid and reduced pH better than *Lactobacillus brevis* TISTR 860 but produced little GABA. More replications of GABA content are needed to confirm the results. The qualities study on fermented rice flour and noodles are needed for commercial applications. Therefore, according to all results *Lactobacillus brevis* TISTR 860 is recommend to be a GABA producer and further experiment.

Acknowledgements

This research was part of dual M.Sc. program co-funded by Erasmus+5739757-EPP-2016-TH-EPPKA2-CBHE-JP (2016-3771) project.

References

Diana, M., Quílez, J., Rafecas, M. 2014. Gamma-aminobutyric acid as a bioactive compound in foods: a review. J. Funct. Foods. 2014: 407–420. doi: 10.1016/j.jff.2014.07.004

Kook, M. -C., Cho, S. -C. 2013. Production of GABA (gamma amino butyric acid) by lactic acid bacteria. Korean J Food Sci. 33: 377–389. doi:10.5851/kosfa.2013.33.3.377

Kradangar, P., Songsermpong, S. 2015. Optimization of fermentation process on the GABA content and quality of fermented rice flour and dry fermented rice noodles. J. Food Process. Preserv. 39: 1183–1191. doi:10.1111/jfpp.12334

Kradangar, P. 2011. The effect of fermentation process on the quantity of GABA and quality of fermented rice flour, fermented rice noodle and dry fermented rice noodle. M.Sc. thesis, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University. Bangkok, Thailand. [in Thai]

Lee, J.H., Lee, S.K., Park, K.H., Hwang, I.K., Ji, G.E. 1999. Fermentation of rice using amylolytic Bifidobacterium. Int. J. Food Microbiol. 50: 155–161.

Lu, Z.-H., Li, L.-T., Min, W.-H., Wang, F., Tatsumi, E. 2005. The effects of natural fermentation on the physical properties of rice flour and the rheological characteristics of rice noodles. Int. J. Food Sci. Technol. 40: 985–992. doi:10.1111/j.1365-2621.2005.01032.x

Nakamura, H., Takishima, T., Kometani, T., Yokogoshi, H. 2009. Psychological stress-reducing effect of chocolate enriched with gamma-aminobutyric acid (GABA) in humans: assessment of stress using heart rate variability and salivary chromogranin A. Int J Food Sci Nutr. 60: 106–113. doi:10.1080/09637480802558508

Oupathumpanont, O., Chantarapanont, W., Suwonsichon, T., Haruthaithanasan, V., Chompreeda, P. 2009. Screening lactic acid bacteria for improving the Kanom-jeen process. Kasetsart J. (Nat. Sci.). 43: 557–565.

Park, S.J., Kim, D.H., Kang, H.J., Shin, M., Yang, S.-Y., Yang, J., Jung, Y.H. 2021. Enhanced production of γ-aminobutyric acid (GABA) using Lactobacillus plantarum EJ2014 with simple medium composition. Lwt. doi:10.1016/j.lwt.2020.110443

Saraphanchotiwitthaya, A., Sripalakit, P. 2018. Production of γ-aminobutyric acid from red kidney bean and barley grain fermentation by *Lactobacillus brevis* TISTR 860. Biocatal. Agric. Biotechnol. 16: 49–53. doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.016

Satmalee, P., Surojanametakul, V., Phomkaivorn, N., Pantavee, W., Yoshihashi, T. 2017. Remove of soluble protein during fermentation process for improving textural properties of traditional Thai rice noodle, Kanom-jeen. JIRCAS. 4: 327–331

Wu, Q., Shah, N.P. 2018. Restoration of GABA production machinery in *Lactobacillus brevis* by accessible carbohydrates, anaerobiosis and early acidification. Food Microbiol. 69: 151–158. doi:10.1016/j.fm.2017.08.006

การยอมรับและความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อหน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมชนิดถอดเปลี่ยนได้

Acceptance and satisfaction of customer toward the cloth mask with a disposable aromatic filter pad

พรรณภัทร พรหมเพ็ญ[a,b,*], ธัญกร กรุงทองจันทร์[a], กันต์กนิษฐ์ ไทยงามศิลป์[a], ศิรินันท์ แก่นทอง[a], จิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์[a]

Phannaphat Phromphen[a,b,*], Thanyakon Krungthongchan[a], Kankanit Thaingamsin[a], Sirinun Kaenthong[a], Jitsopha Chaleawsak[a]

[a]ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ 10110

[b]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Home Economics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand.

[b]Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: pannapat605@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหน้ากากผ้าที่มีแผ่นกลิ่นหอมที่สามารถถอดเปลี่ยนได้โดยใช้เทคนิคการเคลือบไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยและศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อหน้ากากที่พัฒนาขึ้น ในขั้นตอนแรกจะทำการศึกษาพฤติกรรมการซื้อหน้ากากและความชอบของกลิ่นน้ำมันหอมระเหยบนตัวอย่างแผ่นกรองนันวูฟเว่น หลังจากนั้นจะทำการพัฒนาต้นแบบหน้ากากผ้า ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อต้นแบบหน้ากากผ้าฝ้ายถักที่มีแผ่นกรองนันวูฟเว่นพอลีพรอพิลีนที่มีกลิ่นหอม ผลการวิจัยพบว่ากลุ่มตัวอย่างมีความชอบกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์มากที่สุดและไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างเพศหญิงและเพศชาย ส่วนผลการทดสอบความพึงพอใจต่อหน้ากากผ้าตัวอย่างพบว่ากลุ่มตัวอย่างร้อยละ 90 ที่ได้ทดลองใช้หน้ากากผ้าจะรู้สึกผ่อนคลายและเห็นว่าสามารถช่วยป้องกันฝุ่นควันที่เกิดขึ้นในระหว่างการเดินทางได้ อีกทั้งกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่คาดว่าจะซื้อหน้ากากดังกล่าวหากมีวางจำหน่ายในท้องตลาดในราคาที่สูงกว่าราคาที่ซื้อราคาหน้ากากในท้องตลาดปัจจุบันสองเท่า

คำสำคัญ: การพัฒนาผลิตภัณฑ์, น้ำมันหอมระเหย, ไมโครเอนแคปซูเลชัน, หน้ากากผ้า

Abstract

This research aims to develop the cloth mask with the aromatic microcapsule coated filter pad and study the consumer acceptability. Firstly, the purchasing behavior of mask and the preference of aromatic scent were conducted among 100 young adults in Bangkok, Thailand. Then, the prototype of the cloth masks was carried out by using the knitted cotton fabric and the polypropylene nonwoven fabric. Finally, the consumer acceptability of the developed mask was evaluated. It was found that the peppermint scented was preferred and there is no difference between the genders. It also was found that 90% of the respondents felt relax while using this prototype mask with peppermint pad in daily basis. Moreover, most of the participants would buy the developed mask if they are available in the market at two times of the current market price.

Keywords: cloth mask, essential oil, microencapsulation, product development

คำนำ

ตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2562 ที่มีการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรน่า (โควิด-19) มีคำแนะนำให้บุคคลทั่วไปที่ไม่มีอาการป่วยควรสวมหน้ากากผ้าในที่สาธารณะเพื่อชะลอการแพร่กระจายของน้ำมูกหรือน้ำลายจากการไอจาม เพื่อช่วยให้คนที่ไม่แน่ใจว่าตนเองติดเชื้อไวรัสหรือไม่แพร่กระจายเชื้อโรคไปสู่บุคคลอื่นๆ (U.S. food and drug administration, 2020) ทำให้ประชาชนทั่วไปมีความคุ้นชินกับการใช้หน้ากากเพื่อเป็นการป้องกันฝุ่นละอองเข้าสู่ระบบหายใจและป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่อาจจะติดมากับสารคัดหลั่ง หน้ากากผ้าผลิตมาจากผ้าทอหรือผ้าถัก ส่วนใหญ่นิยมผลิตมาจากเส้นใยฝ้าย ประชาชนทั่วไปสามารถผลิตหน้ากากผ้าขึ้นได้เองในครัวเรือน ข้อดีของหน้ากากผ้าคือ มีราคาถูก สามารถใช้ซ้ำและสามารถทำความสะอาดได้ด้วยวิธีการอย่างง่าย อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบให้มีการเพิ่มชั้นของไส้กรองได้ (Chughtai et al., 2015) การใช้งานหน้ากากผ้าต้องพิจารณาถึงช่องว่างระหว่างเส้นด้าย จำนวนชั้นของผ้า และ ชนิดของผ้า (Renagsagamy et al., 2010) อย่างไรก็ตาม หน้ากากผ้าไม่สามารถกรองเชื้อโรคที่มีขนาดเล็กและยังสามารถป้องกันฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แม้ว่าจะเพิ่มจำนวนชั้นของไส้กรองก็ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นละอองดีขึ้น (Jang and Kim, 2015)

ไมโครเอนแคปซูเลชัน (Microencapsulation) เป็นกระบวนการห่อหุ้มสารสำคัญให้อยู่แกนกลาง (Core) ด้วยสารห่อหุ้ม (Shell) เช่น พอลิเมอร์ ขี้ผึ้ง โปรตีนไฮโดรไลเสท ฟอสโฟลิพิด เป็นต้น เพื่อให้ได้เป็นไมโครแคปซูลขนาดประมาณ 1–1000 ไมครอน (บัณฑิต และคณะ, 2557) โดยสารห่อหุ้มจะทำหน้าที่ป้องกันสารสำคัญที่อยู่แกนกลางไม่ให้เกิดการออกซิเดชั่นจากความร้อน แสง ความชื้น หรือ การสัมผัสจากสารอื่นๆ (Rodrigues et al., 2008) ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีไมโครเอนแคปซูเลชันมาใช้ในการเพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในรูปแบบใหม่ที่การตกแต่งสำเร็จสิ่งทอแบบเดิมไม่สามารถทำได้หรือทำได้ด้วยเทคโนโลยีอื่นแต่มีต้นทุนที่สูงกว่า (Nelson, 2002) โดยสารแกนกลางที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล เช่น สีย้อม น้ำหอม ฮอร์โมน ยาปฏิชีวนะ หรือ สารต่อต้านแมลง จะถูกปลดปล่อยออกมาโดยทันทีเมื่อวัสดุสิ่งทอโดนกระทำโดยแรงทางเชิงกล (Monllor et al., 2007) มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีไมโครเอนแคปซูเลชันมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น การตกแต่งผ้าฝ้ายให้มีกลิ่นหอมและต่อต้านแบคทีเรีย (Singh et al., 2017) การพัฒนาชุดเครื่องนอนที่เคลือบด้วยไมโครแคปซูลกลิ่นหอมเพื่อช่วยให้รู้สึกผ่อนคลายขณะนอนหลับทำให้การนอนหลับยาวนานยิ่งขึ้นและรู้สึกสดชื่นเมื่อตื่นนอน (Suthaphot et al., 2012) หรือการนำไมโครแคปซูลไปน้ำมันหอมระเหยไปเคลือบผ้าหุ้มเบาะรถตู้โดยสารเพื่อสร้างบรรยากาศในห้องโดยสารเพื่อช่วยลดความตึงเครียดเวลาขับรถได้ (ณุกานดา และคณะ, 2558)

ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยและข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกซื้อและใช้งานหน้ากากในชีวิตประจำวัน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยการผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Prototype) ผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้าฝ้ายถักโดยจะมีช่องสำหรับใส่แผ่นนันวูฟเว่นที่ทำการเคลือบด้วยไมโครแคปซูลกลิ่นน้ำมันหอมระเหยโดยแผ่นกรองอากาศนี้จะมีกลิ่นหอมและสามารถถอดเปลี่ยนได้ จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปทำการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมที่สามารถถอดเปลี่ยนได้เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

สารละลายไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยทางการค้า 3 กลิ่น ได้แก่ กลิ่นลาเวนเดอร์ กลิ่นกุหลาบ และกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์ จากบริษัท ดีซีเอ็มซี คอปเปอเรชั่น

การเตรียมแผ่นกรองกลิ่นหอมด้วยไมโครแคปซูลกลิ่นน้ำมันหอมระเหย

นำผ้าไม่ถักไม่ทอพอลีพรอพิลีนสปันบอนด์ขนาด 30 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นผ้าไม่ถักไม่ทอที่มีความใกล้เคียงกับผ้าไม่ถักไม่ทอพอลิพรอพิลีนสปันบอนด์ที่ใช้เป็นชั้นนอกของหน้ากากอนามัย ไปแช่ในสารละลายไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยในน้ำกลั่นความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 10 นาที กลับด้านแล้วแช่ต่ออีก 10 นาที จากนั้นนำผ้าไม่ถักไม่ทอพอลีพรอพิลีนไปรีดผ่านลูกกลิ้งโดยใช้เครื่องบีบน้ำชนิดลูกกลิ้งรุ่น Horizontal, Vertical Padder Type (HVF) ความดัน 3 บาร์ และ ความเร็วลูกกลิ้ง 1 เมตร/วินาที เพื่อควบคุมให้มีปริมาณไมโครแคปซูลบนผ้า (% wet pick up) เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที เพื่อนำไปใช้เป็นแผ่นกรองกลิ่นหอมในลำดับต่อไป

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลบนผ้าไม่ถักไม่ทอ

โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ JEOL รุ่น JSM 6400 LV การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยการอบแห้งตัวอย่างแผ่นกรองนันวูฟเว่นที่เคลือบด้วยไมโครแคปซูลกลิ่นน้ำมันหอมระเหยที่อุณหภูมิ 5 กิโลโวลต์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กำลังขยาย 300 เท่า

การสำรวจพฤติกรรมการเลือกซื้อหน้ากากและความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยบนแผ่นกรอง

กลุ่มตัวอย่าง คือ ประชาชนในเขตกรุงเทพมหานคร อายุระหว่าง 18–25 ปี เพศชาย 50 คนและเพศหญิง 50 คน โดยการสุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ (Accidental Sampling) จากบริเวณที่มีระบบขนส่งมวลชน ได้แก่ ป้ายโดยสารรถประจำทาง ท่าเรือ สถานีรถไฟฟ้าบนดิน (BTS) และสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน (MRT) เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ แบบสอบถามออนไลน์โดยให้กลุ่มตัวอย่างแสกน QR code เพื่อตอบข้อคำถามในเว็บไซต์ Google Form แบบสอบถามมี 3 ตอน ประกอบด้วย ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ตอนที่ 2 ความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อกลิ่นบนผ้าไม่ถักไม่ทอที่ผ่านการเคลือบไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยตัวอย่างทั้ง 3 กลิ่น ได้แก่ กลิ่นลาเวนเดอร์ กลิ่นกุหลาบ และกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์ โดยคณะผู้วิจัยจะให้กลุ่มตัวอย่างขยี้และดมกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นกรองกลิ่นหอมนันวูฟเว่น และตอนที่ 3 การเลือกซื้อและใช้งานหน้ากากเพื่อการป้องกัน การประเมินความพึงพอใจใช้การกำหนดระดับความพึงพอใจเป็น 5 ระดับ (Likert scale 5 point) หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ข้อมูล โดยจัดแยกข้อมูลในแบบสอบถามเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ สถิติเชิงพรรณนาที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติเชิงอนุมานที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-

way ANOVA) การทดสอบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Tukey' Honestly Significance Difference (HSD) และการทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติ t-test

การพัฒนาตัวอย่างผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมถอดเปลี่ยนได้

คณะผู้วิจัยเลือกใช้แบบตัดหน้ากากผ้าที่ทำจากผ้าฝ้ายถักแบบซิงเกิลเจอร์ซีขนาด 32 กรัม/ตารางเมตร แล้วปรับรูปแบบของหน้ากากโดยการเพิ่มช่องด้านบนตลอดความยาวแนวหน้ากากผ้าเพื่อให้ผู้ใช้สามารถถอดเปลี่ยนแผ่นกรองกลิ่นหอมได้เองโดยง่าย ดังแสดงใน Fig.1



Fig. 1 Prototype of the developed cloth mask with the disposable aromatic pad

การทดสอบพึงพอใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หน้าผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมถอดเปลี่ยนได้

กลุ่มตัวอย่าง คือ ประชาชนในเขตกรุงเทพมหานคร อายุ 18–25 ปี จำนวน 30 คน โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ในการใช้หน้ากากในชีวิตประจำวัน กลุ่มตัวอย่างจะต้องทดลองใช้หน้ากากผ้าในขณะเดินทางโดยระบบขนส่งสาธารณะ เช่น รถเมล์ รถไฟลอยฟ้า รถใต้ดิน หรือ เรือโดยสาร เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วตอบแบบสอบถามโดยการกรอกข้อมูลลงในแบบสอบถามออนไลน์บนเว็บไซต์ Google Form แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 4 ตอน คือ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ตอนที่ 2 การเลือกซื้อและใช้งานหน้ากากผ้า ตอนที่ 3 การให้คะแนนระดับความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอม และตอนที่ 4 ข้อเสนอแนะ โดยมีสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ค่าร้อยละ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลบนผ้าไม่ถักไม่ทอ

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลของผ้าไม่ถักไม่ทอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าไม่ถักไม่ทอที่เคลือบด้วยไมโครแคปซูลกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์ แสดงใน Fig. 2 ในการวิจัยมาเป็นตัวแทน เนื่องจากกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์เป็นกลิ่นที่กลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจมากที่สุด

ผลการวิจัย พบว่าผ้าไม่ถักไม่ทอที่ผ่านการเคลือบไมโครแคปซูลเปปเปอร์มิ้นท์มีไมโครแคปซูลยึดเกาะโดยมีทั้งกระจายและยึดเกาะเป็นกลุ่มก้อน

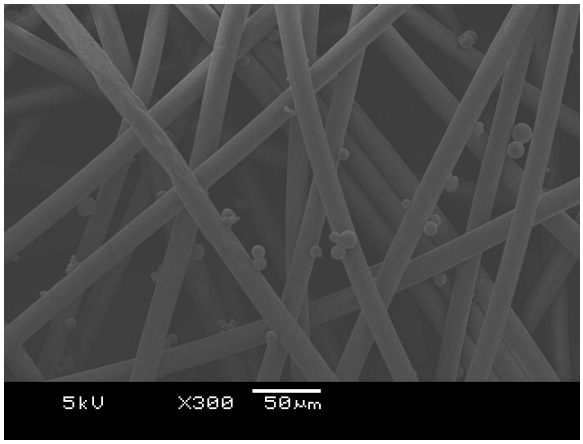


Fig. 2 SEM of peppermint microcapsule coated on polypropylene nonwoven fabric

ผลสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นกรองนันวูฟเว่นและพฤติกรรมการซื้อหน้ากาก

ความพึงพอใจต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นกรองนันวูฟเว่นตัวอย่างทั้งสามกลิ่น และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของระดับคะแนนความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นนันวูฟเว่นที่ระดับ 0.05 ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Mean preference rating of the different scented filter pad

Scent	$\overline{x}$	S.D.	F-test	Sig.
Rose	2.98[b]	1.07		
Lavender	3.35[a]	1.09	5.02	.01
Peppermint	3.44[a]	1.10		

จากตารางที่ 1 พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในบริเวณที่มีความวุ่นวายของการจราจรมีความพึงพอใจต่อแผ่นนันวูฟเว่นที่เคลือบด้วยไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยกลิ่นลาเวนเดอร์และเปปเปอร์มิ้นท์ในระดับดี อาจจะเป็นผลมาจากน้ำมันหอมระเหยกลิ่นลาเวนเดอร์และเปปเปอร์มิ้นท์เป็นกลิ่นที่ทำให้รู้สึกผ่อนคลาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าการสูดดมน้ำมันหอมระเหยกลิ่นลาเวนเดอร์และเปปเปอร์มิ้นท์จะช่วยลดระดับความกังวล (Cruz et al., 2011) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์ช่วยบรรเทาอาการปวดศีรษะ (Ali et al., 2015) สามารถลดอาการคลื่นไส้อาเจียนของผู้ป่วยมะเร็งที่ได้รับเคมีบำบัดและยังทำให้ผู้ป่วยรู้สึกผ่อนคลายและคลายความกังวลอีกด้วย (Lestari et al., 2017) ส่วนความพึงพอใจต่อแผ่นนันวูฟเวนที่เคลือบด้วยไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยกลิ่นกุหลาบอยู่ในระดับปานกลาง แม้ว่ากลิ่นกุหลาบช่วยในการผ่อนคลายอารมณ์ บรรเทาอาการซึมเศร้าและคลายเครียด (Hongratanaworakit, 2009)

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของระดับคะแนนความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นนันวูฟเว่นพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างเป็นรายคู่ด้วยวิธีการทดสอบของ Tukey HSD พบว่า ระดับความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างต่อแผ่นนันวูฟเว่นที่เคลือบด้วยไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยมีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างกลิ่นกุหลาบกับกลิ่นลาเวนเดอร์ และกลิ่นกุหลาบกับกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์ ส่วนกลิ่นลาเวนเดอร์และกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

นอกจากนั้นการทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติ t-test ของความพึงพอใจระหว่างกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นนันวูฟเวนระหว่างเพศชายและเพศหญิง ที่ระดับ 0.05 แสดงใน Table 2

Table 2 Comparison of male and female preference of the different scented filter pad

Scent	เพศชาย		เพศหญิง		t-value	*p*
	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.		
Rose	2.82[a]	1.26	3.14[a]	0.83	1.83	0.07
Lavender	3.22[a]	1.18	3.48[a]	1.05	1.34	0.19
Peppermint	3.34[a]	1.12	3.54[a]	1.09	0.85	0.40

*$p < 0.05$

จาก Table 2 พบว่า ความพึงพอใจระหว่างกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นนันวูฟเว่นระหว่างเพศชายและเพศหญิง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังนั้นเพศไม่มีผลต่อความพึงพอใจต่อกลิ่นใดกลิ่นหนึ่งเป็นพิเศษ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า เพศไม่มีผลต่อความชอบของกลิ่นน้ำหอม (Lindqvist, 2012) และเมื่อวิเคราะห์ความพึงพอใจต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยทั้งสามกลิ่นจากแผ่นนันวูฟเวนของกลุ่มตัวอย่างทั้งเพศชาย พบว่าระดับความพึงพอใจต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยจากแผ่นนันวูฟเวนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 เช่นเดียวกับกลุ่มตัวอย่างเพศหญิงที่พบว่าความพึงพอใจต่อกลิ่นน้ำมันหอมระเหยทั้งสามกลิ่นจากแผ่นนันวูฟเวนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ไมโครแคปซูลน้ำมันหอมกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์ที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดทั้งในเพศหญิงและเพศชายมาเป็นตัวแทนของกลิ่นน้ำมันหอมระเหยในการผลิตเป็นแผ่นกรองที่มีกลิ่นหอมในผลิตภัณฑ์หน้ากากอนามัย

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ได้ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับการเลือกซื้อและการใช้งานหน้ากากเพื่อการป้องกันในชีวิตประจำวัน พบว่า สถานที่ที่กลุ่มตัวอย่างเลือกซื้อหน้ากากบ่อยที่สุด คือ ร้านสะดวกซื้อ โดยคิดเป็นร้อยละ 69 รองลงมาเป็นร้านขายยา และ ห้างสรรพสินค้า โดยคิดเป็นร้อยละ 26 และ 5 ตามลำดับ เมื่อสอบถามความเป็นไปได้ของการจำหน่ายหน้ากากผ้าที่สามารถซักได้และวางจำหน่ายพร้อมกับแผ่นกรองมีกลิ่นหอมที่ถอดเปลี่ยนได้ กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 43 เห็นว่าราคาของหน้ากากที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมควรอยู่ในช่วง 20–29 บาท กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 38 เห็นว่าควรจะวางขายที่ราคา 30–39 บาท และร้อยละ 15 เห็นว่าควรจะวางขายที่ราคา 40–49 บาท ตามลำดับ นอกจากนั้นกลุ่มตัวอย่างร้อยละ 95 มีความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรอง

กลิ่นหอม ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่ผู้บริโภคจะเลือกซื้อหน้ากากที่สามารถถอดแผ่นกรองที่มีกลิ่นหอมได้หากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีวางจำหน่ายในท้องตลาด

ผลการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หน้าผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมถอดเปลี่ยนได้

การวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ได้ทดลองใช้หน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์เป็นเวลา 1 วัน และทำการตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้าที่สามารถถอดแผ่นกรองกลิ่นหอมได้ ผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หน้ากากผ้าที่มีแผ่นกรองกลิ่นหอมพบว่ากลุ่มตัวอย่างร้อยละ 90 ที่ได้ใช้หน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นรู้สึกผ่อนคลายมากขึ้นในระหว่างการเดินทางเนื่องจากการออกแบบที่มีช่องด้านบนให้ใส่แผ่นกรองกลิ่นหอม เมื่อเกิดแรงกระทำบนแผ่นกรองทำให้ไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยถูกปลดปล่อยออกมาทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกผ่อนคลาย และ กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 97 มีแนวโน้มจะเลือกซื้อหน้ากากที่สามารถถอดกรองเปลี่ยนกลิ่นได้หากมีวางจำหน่ายในท้องตลาด ซึ่งสอดคล้องกับการสอบถามกลุ่มตัวอย่างที่ทำแบบสอบถามเกี่ยวกับกลิ่นของน้ำมันหอมระเหยที่มีแนวโน้มจะซื้อหน้ากากที่สามารถถอดกรองเปลี่ยนกลิ่นได้ เมื่อสอบถามประเด็นของสถานที่ที่จะวางจำหน่ายหน้ากากผ้า กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 50 เห็นว่าควรวางจำหน่ายที่ร้านสะดวกซื้อ ซึ่งสอดคล้องกับผลสำรวจพฤติกรรมการซื้อหน้ากาก และสอดคล้องกับงานวิจัยของธันยวนันฐ์ และคณะ (2559) ที่กล่าวว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่ร้านสะดวกซื้อเนื่องจากสะดวกในการเดินทางและผลิตภัณฑ์ที่ซื้อบ่อยที่สุดคือ กลุ่มผลิตภัณฑ์ของใช้ ส่วนกลุ่มตัวอย่างร้อยละ 40 และร้อยละ 10 เห็นว่าที่ห้างสรรพสินค้าและร้านขายยา ตามลำดับ นอกจากนั้นกลุ่มตัวอย่างร้อยละ 40 มีความเห็นว่าหน้ากากผ้าที่พัฒนาขึ้นควรวางขายในช่วงราคา 40-49 บาท ส่วนกลุ่มตัวอย่างร้อยละ 37 และร้อยละ 17 คิดว่าระดับราคาควรอยู่ที่ 30-39 บาท และ 50 บาทขึ้นไป ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับราคาหน้ากากผ้าทั่วไปที่ไม่มีฟังก์ชั่นพิเศษในท้องตลาดจะเห็นได้ว่าหน้ากากที่พัฒนาขึ้นจะสามารถวางจำหน่ายได้ในราคาที่สูงกว่าประมาณสองเท่า อย่างไรก็ตามต้นทุนในการผลิตหน้ากากผ้าในงานวิจัยนี้จะสูงกว่าการผลิตหน้ากากผ้าธรรมดา เนื่องจากมีการเพิ่มวัตถุดิบหลัก เช่น ผ้าไม่ถักไม่ทอ สารละลายไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหย ค่าใช้จ่ายในการผลิต และ ค่าแรงงาน ดังนั้นหากจะมีการวางจำหน่ายผลิตภัณฑ์ควรคำนึงถึงการตั้งราคาขายเพื่อให้สอดคล้องกับต้นทุนที่เพิ่มขึ้น

สรุป

จากการสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อแผ่นตัวอย่างกลิ่นน้ำมันหอมระเหยพบว่ากลุ่มตัวอย่างมีความชอบกลิ่นเปปเปอร์มิ้นท์มากที่สุด และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างเพศหญิงและเพศชาย นอกจากนั้นกลุ่มตัวอย่างมากกว่าร้อยละ 90 มีความสนใจจะซื้อผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นหากมีวางจำหน่าย ในร้านสะดวกซื้อ โดยจะมีราคาสูงกว่าหน้ากากผ้าธรรมดาในท้องตลาดสองเท่า จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการปรับปรุงหน้ากากผ้าธรรมดาให้มีความแตกต่าง มีความน่าสนใจเพื่อเพิ่มทางเลือกใหม่ให้กับผู้บริโภค

เอกสารอ้างอิง

ณุกานดา ภัทรปุตรานนท์, ศรีกาญจนา จตุพัฒน์วโรดม, รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์. 2558. สมบัติกายภาพของผ้าฝ้ายผสมสแปนเด็กส์ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลกลิ่นน้ำมันหอมระเหย. ใน: รายงานการประชุมหาดใหญ่วิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยหาดใหญ่, สงขลา, หน้า 1501–1512.

ธันยวนันฐ์ เลียนอย่าง, พัชราภา อินทพรต, วริษา กังสวัสดิ์, สิทธิพัทธ์ เลิศศรีชัยนนท์. 2559. ความต้องการด้านผลิตภัณฑ์ในร้านสะดวกซื้อเขตกรุงเทพมหานครของผู้บริโภควัยก่อนและหลังเกษียณอายุ. วารสารปัญญาภิวัฒน์. 8: 32–41.

บัณฑิต พรหมรักษา, จุรีรัตน์ ดาดวง, เดือนจิต คำพิทักษ์, ประณิธิ หงสประภาส, พัชรี บุญศิริ. 2557. เทคนิคไมโคร เอนแคปซูเลชันและบทบาททางการแพทย์. ศรีนครินทร์เวชสาร. 29: 90–97.

Ali, B., Al-Wabel, N.A., Shams, S., Ahamad, A., Khan, S.A., Anwar, F. 2015. Essential oils used in aromatherapy: a systemic review. Asian. Pac. J. Trop. Biomed. 5: 601–611.

Chughtai, A.A., Seale, H., Dung, T.C., Maher, L., Nga, P.T., MacIntyre, C.R. 2015. Current practices and barriers to the use of facemasks and respirators among hospital-based health care workers in Vietnam. Am. J. Infect. Control. 43: 72–77.

Cruz, A.B., Kim, T., Park, S.B. 2011. Effects of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) and peppermint (*Mentha cordifolia* Opiz.) odors on anxiety and sport skill performance. Asia Life Sci. 20: 323–329.

Hongratanaworakit, T. 2009. Relaxing effect of rose oil on humans. Nat. Prod. Commun. 4: 291–296.

Jang, J.Y., Kim, S.W. 2015. Evaluation of filtration performance efficiency of commercial cloth masks. J. Environ. Health Sci. Eng. 41: 203–215.

Jing, H., Zuobing, X., Rujun, Z., Shuangshuang, M., Mingxi, W., Zhen, L. 2011. Properties of aroma sustained-release cotton fabric with rose fragrance nanocapsule. Chin. J. Chem. Eng. 19: 523–528.

Lestari, I., Khurniawan, A., Mojokerto, S.B.S.P. 2017. Decreasing nausea and vomiting due to chemotherapy induction through peppermint aromatherapy. J. Nurs. Midwifery. Sci. 1: 49–55.

Lindqvist, A. 2012. Preference and gender associations of perfumes applied on human skin. J. Sens. Stud. 27: 490–497.

Monllor, P., Bonet, M.A., Cases, F. 2007. Characterization of the behaviour of flavour microcapsules in cotton fabrics. Eur. Polym. J. 43: 2481–2490.

Nelson, G. 2002. Application of microencapsulation in textiles. Int. J. Pharm. 242: 55–62.

Rengasamy, S., Eimer, B., Shaffer, R.E. 2010. Simple respiratory protection-evaluation of the filtration performance of cloth masks and common fabric materials against 20–1000 nm size particles. Ann Occup Hyg. 54: 789–798.

Rodrigues, S.N., Martins, I.M., Fernandes, I.P., Gomes, P.B., Mata, V.G., Barreiro, M.F., Rodrigues, A.E. 2009. Scentfashion®: microencapsulated perfumes for textile application. Chem. Eng. J. 149: 463–472.

Singh, N., Yadav, M., Khanna, S., Sahu, O. 2017. Sustainable fragrance cum antimicrobial finishing on cotton: indigenous essential oil. Sustain. Chem. Pharm. 5: 22–29.

Suthaphot, N., Chulakup, S., Chonsakorn, S., Mongkholrattanasit, R. 2012. Application of aromatherapy on cotton fabric by microcapsules. In: Proceeding of RMUTP International Conference: Textiles & Fashion. Bangkok. Thailand.

U.S. food and drug administration. 2020. N95 respirators, surgical masks, and face masks. https://www.fda.gov/medical-devices/personal-protective-equipment-infection-control/n95-respirators-surgical-masks-and-face-masks. 30 January 2021.

การสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของสีผิวของขนมปังระหว่างการอบ

Kinetic modelling of bread crust color during baking

ธนชาติ มนต์ภัสสร, วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์*, มาศอุบล ทองงาม

Thanachart Monpassorn, Waraporn Boonsupthip*, Masubon Thongngam

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: waraporn.b@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของสีของขนมปัง โดยอบขนมปังที่อุณหภูมิ 150, 175 และ 200°C แล้วทำการเก็บค่าสีด้วยภาพถ่ายผิวขนมปังและแปลงค่าสีในระบบ RGB เป็นค่าสีในระบบ CIELAB โดยพบว่าค่าความสว่าง L^* ค่าสีแดง R,ค่าสีเขียว G มีค่าลดลงตามเวลาตามรูปแบบของจลนพลศาสตร์เคมีลำดับที่ 0 และค่าสีฟ้า B ลดลงแบบพลศาสตร์เคมีลำดับที่ 1 ผลของอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ด้วยสมการอาร์รีเนียส สำหรับ a^* (ค่าสีเขียว-แดง) และ b^* (ค่าสีน้ำเงิน-เหลือง) ที่ 150, 175 และ 200°C มีกราฟเมื่อเทียบกับเวลาอบเป็นเส้นตรง, ซิกมอยด์ และรูประฆังคว่ำตามลำดับ มีซึ่งไม่สามารถอธิบายโดยสมการจลนพลศาสตร์เคมีทั่วไป และค่าความแตกต่างของสี ΔE^* มีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการอบก่อนที่จะค่อยๆคงที่ และไม่สามารถหาได้โดยสมการจลนพลศาสตร์เคมีทั่วไป ดังนั้น การตรวจติดตามสีที่บริเวณผิวหน้าขนมปังขณะอบด้วยค่า L*, R, G และ B ด้วยสมการจลนพลศาสตร์ สามารถใช้ในการเลือกอุณหภูมิที่ใช้อบขนมปัง เพื่อให้ได้สีของขนมปังที่ต้องการได้

คำสำคัญ: การอบ, ขนมปัง, จลนพลศาสตร์, สี

Abstract

The objective of this research was to develop the kinetic model of bread crust color change during baking. The bread was baked at 150, 175 and 200 °C and its top surface color was imaged. The RGB color values were recorded and converted into the CIELAB. It was found that the lightness, L^* values, and the R (red value) and G (green value) were decreased but B (blue value) decreased over time following the kinetic reaction with zero and first orders, respectively. The effect of temperature on the reaction rates was perfectly expressed by the Arrhenius equation. The kinetics of a^* (green-red) and b^* (blue-yellow) values at 150, 175, 200 °C showed linear, singmoidal and bell shapes, respectively. Which cannot explained by standard kinetics equation. Color Difference value ΔE^* is greatly increased in the beginning of baking before gradually stabilizing and cannot explained by standard kinetics equation. In conclusion, monitoring the bread color change using L^*, R, G and B with a simple kinetic model can be used to select the temperature at which the bread is baked to get the desired color of the bread.

Keywords: baking, bread, color, kinetic

คำนำ

ขนมปังเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรีชนิดหนึ่ง เป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง มีส่วนประกอบหลักคือแป้งสาลี โดยขนมปังนั้นอยู่คู่กับมนุษยชาติมาอย่างยาวนาน โดยคาดว่ามีจุดเริ่มต้นมาจากทางยุโรปก่อนที่จะเผยแพร่ไปยังอียิปต์และเผยแพร่ต่อไปยังแถบเมดิเตอร์เรเนียน และหลังจากนั้นก็เผยแพร่มาทางเอเชีย โดยในช่วงแรกนั้นขนมปังยังไม่เป็นที่นิยมของชาวเอเชียทางซีกตะวันออกเนื่องจากยังมีความนิยมที่จะบริโภคข้าว และแป้งสาลีมักจะถูกนำมาผลิตอาหารประเภทเส้น เช่น บะหมี่มากกว่า แต่หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ชาวเอเชียทางซีกตะวันออกได้มีการติดต่อกับทางซีกโลกตะวันตกมากขึ้น และทำให้ความนิยมในการบริโภคขนมปังและผลิตภัณฑ์เบเกอรีอื่นๆสูงมากขึ้น ซึ่งรวมถึงการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรีในประเทศไทยด้วย และช่วงสงครามเวียดนามได้มีทหารชาวอเมริกาจำนวนมากได้เข้ามาสร้างฐานทัพในประเทศไทย ทำให้เกิดความก้าวหน้าในอุตสาหกรรมเบเกอรี และเกิดความนิยมการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรีเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก (จิตรธนา และอรอนงค์, 2553) และเนื่องจากความนิยมการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรีที่สูงในประเทศไทย การพัฒนาคุณภาพของขนมปังก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการดึงดูดผู้บริโภคและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่นได้ โดยสีผิวของขนมปังก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยให้คุณภาพของขนมปังดีขึ้น (Rosell, 2019) ซึ่งการเกิดสีของขนมปังขณะอบนั้นเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ (Capuano et al., 2008) และปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวของน้ำตาล (Zanoni et al., 1995) โดยทั้งสองปฏิกิริยามีอุณหภูมิ, pH และค่า water activity เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ 150, 175 และ 200°C ต่อค่าสีผิวของขนมปังทั้งในระบบสีแบบ RGB และ L*a*b* และนำมาสร้างสมการจลนพลศาสตร์เพื่อที่จะอธิบายค่าสีของขนมปังที่อุณหภูมิต่างๆ และนำไปพัฒนากระบวนการผลิตเบเกอรีให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างขนมปัง

เตรียมขนมปังโดยใช้แป้งขนมปัง 1000 กรัม ยีสต์ผง 10 กรัม น้ำตาล 120 กรัม เกลือ 15 กรัม นมผง 40 กรัม ไข่ไก่ 50 กรัม เนยขาว 100 กรัม น้ำ 620 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนวดโดยเครื่องนวดแป้งแบบสองแขน (KM-10 กิตติวัฒนา ประเทศไทย) เป็นระยะเวลา 15 นาที และนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงโดยใช้พลาสติกห่ออาหารห่อผิวหน้าโดเพื่อลดการสูญเสียความชื้น ก่อนจะนำมาแบ่งและปั้นเป็นก้อนกลมโดยมีน้ำหนักก้อนละ 70 กรัม และบ่มที่อุณหภูมิห้องอีก 1 ชั่วโมง 30 นาทีโดยใช้พลาสติกห่ออาหารห่อผิวหน้าโดเช่นเดียวกันและอบโดยใช้เตาอบไฟฟ้า (SM-C6Q Uki Food Technology ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 150, 175 และ 200°C เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุก 2 นาที

การบันทึกค่าสีของขนมปัง

ทำการบันทึกค่าสีของขนมปังโดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Leo´n et al.(2006) โดยการถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิตอลซึ่งตั้งห่างจากตัวอย่าง 22.5 เซนติเมตร และแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟ LED 18 W อุณหภูมิสี 6500 K ดัง

Fig. 1 และรูปจะถูกจัดเก็บเป็นไฟล์ JPG ที่ความละเอียด 4128x3096 พิกเซล ลงในระบบคอมพิวเตอร์ (Intel Celeron 1005M 1.90GHz) และทำการใช้ซอร์ฟแวร์ Affinity Painter เพื่อทำการบันทึกค่าสีในระบบ RGB ของขนมปัง

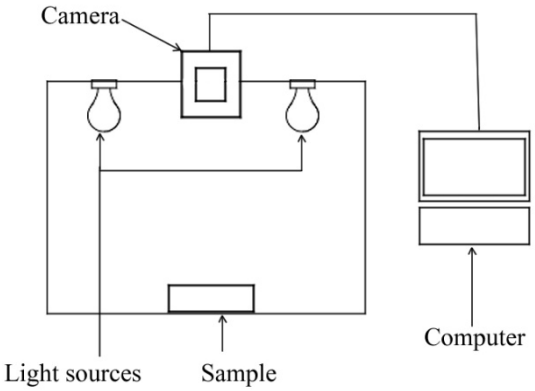


Fig. 1 Image acquisition system

ทำการแปลงค่าสีในระบบ RGB เป็นค่าสีในระบบ XYZ โดยใช้สมการจาก Castro et al. (2017) Equations 1, 2, 3, 4

$$r = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{R} + 0.055}{1.055}^{2.4} & \text{โดย} \quad \dfrac{\mathrm{R}}{255} > 0.04045 \\ \dfrac{\mathrm{R}}{12.92} & \dfrac{\mathrm{R}}{255} <= 0.04045 \end{cases} \tag{1}$$

$$g = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{G} + 0.055}{1.055}^{2.4} & \text{โดย} \quad \dfrac{\mathrm{G}}{255} > 0.04045 \\ \dfrac{\mathrm{G}}{12.92} & \dfrac{\mathrm{G}}{255} <= 0.04045 \end{cases} \tag{2}$$

$$b = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{B} + 0.055}{1.055}^{2.4} & \text{โดย} \quad \dfrac{\mathrm{B}}{255} > 0.04045 \\ \dfrac{\mathrm{B}}{12.92} & \dfrac{\mathrm{B}}{255} <= 0.04045 \end{cases} \tag{3}$$

โดย R,G,B คือค่าสีแดง, สีเขียว และสีฟ้าในระบบ RGB ตามลำดับ มีค่าอยู่ระหว่าง 0–255 และ r, g, b คือ normalized values ของค่าสีในระบบ RGB

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = 100 \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathrm{X} = \frac{\mathrm{x}}{\mathrm{X_n}}; \mathrm{Y} = \frac{\mathrm{y}}{\mathrm{Y_n}}; \mathrm{Z} = \frac{\mathrm{z}}{\mathrm{Z_n}} \tag{5}$$

โดย X_n, Y_n, Z_n คือค่าของสีขาว ในระบบ XYZ โดยมีแหล่งกำเนิดแสงที่ความสว่าง D65 ใช้มาตรฐานการรับภาพแบบมาตรฐาน CIE 1964 มีค่า $X_n = 95.05$, $Y_n = 100$, $Z_n = 108.9$ และทำการแปลงค่าสีเป็นระบบ L*a*b* จาก Equations 6, 7, 8

$$L* \begin{cases} 116(Y)^{1/3} - 16 & \text{โดย} \quad Y > 0.008856 \\ 903.3Y & \quad Y \leq 0.008856 \end{cases} \tag{6}$$

$$a* \ 500(X^{1/3} - Y^{1/3}) \tag{7}$$

$$b* \ 200(Y^{1/3} - Z^{1/3}) \tag{8}$$

โดยค่า $L*$ คือค่าความสว่างของสีผิวของขนมปัง มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100

$a*$ คือค่าสีเขียว – แดงของสีผิวของขนมปัง มีค่าตั้งแต่ -128 ถึง 127

$b*$ คือค่าสีน้ำเงิน - เหลืองของสีผิวของขนมปัง มีค่าตั้งแต่ -128 ถึง 127

การศึกษาสมการจลนพลศาสตร์

สมการจลนพลศาสตร์คือสมการที่ใช้อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ โดยปฏิกิริยาเคมีที่พบในอาหารมักเป็นชนิดลำดับที่ 0 ถึงลำดับที่ 2 (วราภรณ์, 2560) โดยสามารถอธิบายได้โดย Equation 9

$$\frac{dC_s}{dt} = kC_s^n \tag{9}$$

โดย C_s = ค่าสีของขนมปัง

n= ลำดับของสมการจลนพลศาสตร์

$\frac{dC_s}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนสีของขนมปังที่อบเมื่อเวลาผ่านไป

โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบเปลี่ยนไป ค่าอัตราการเปลี่ยนสีของขนมปังที่อบเมื่อเวลาผ่านไปอาจจะเปลี่ยนไปด้วยซึ่งสมการอารีย์เนียสเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเปลี่ยนสีของขนมปังเมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งสมการอารีย์เนียสสามารถเขียนได้ดังนี้ (Equation 10)

$$k = A_0 exp(-\frac{E_a}{RT}) \tag{10}$$

โดย A_0 = ค่าคงที่ pre-exponential constant

E_a = ค่าพลังงานกระตุ้น (Cal/mol หรือ J/mol)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส = 1.987 cal/mol.K = 8.314 J/mol.K

T = อุณหภูมิ (K)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลังจากทำการอบขนมปังที่อุณหภูมิ 150, 175 และ 200°C จาก Fig. 2 พบว่าค่าความสว่าง $L*$ มีค่าลดลงตามจลนพลศาสตร์ลำดับที่ 0 โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่อุณหภูมิ 150, 175 และ 200°C มีค่าเท่ากับ 0.0749, 1.3072 และ 3.0118 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการลดลงของค่า $L*$ จะมากยิ่งขึ้น โดยพบค่าคงที่ของปฏิกิริยา k เมื่อนำมาพลอตกราฟกับค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบขนมปังจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิใน

รูปแบบสมการเส้นตรง k = 0.0587T - 8.8145 โดยการลดลงของค่า L^* นั้น คาดว่าเป็นผลจากจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดและคาราเมลไลเซชันซึ่งส่งผลให้ขนมปังมีสีที่เข้มมากขึ้น (Purlis และ Salvadori, 2007) และจาก Fig. 3 พบว่าที่อุณหภูมิ 150 และ 175 °C ค่าสีแดง R นั้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากในขณะที่อุณหภูมิ 200°C พบการเปลี่ยนแปลงของ ค่า R ที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยค่า R นั้นอธิบายได้ด้วยสมการจลนพลศาสตร์เคมีลำดับที่ 0 โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) อุณหภูมิ 150, 175 และ 200 °C มีค่าเท่ากับ 0.0195, 0.2039 และ 5.4558 min^{-1} โดยจากสมการอารีย์เนียส R มีค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) = 187.564 kJ/mol, A_0= $2.78*10^{21}$, R^2 = 0.9908 และจาก Fig. 4 พบว่าค่าสีเขียว G นั้นค่าลดลงเมื่อใช้เวลาอบขนมปังที่มากขึ้นเช่นเดียวกับค่า L^* และ R โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่อุณหภูมิ 150, 175 และ 200 °C มีค่าเท่ากับ 0.8095, 3.7645 และ 8.5593 min^{-1} ตามลำดับ มีค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ -78.513 kJ/mol, A_0= $-1.15*10^{8}$, R^2 = 0.9263

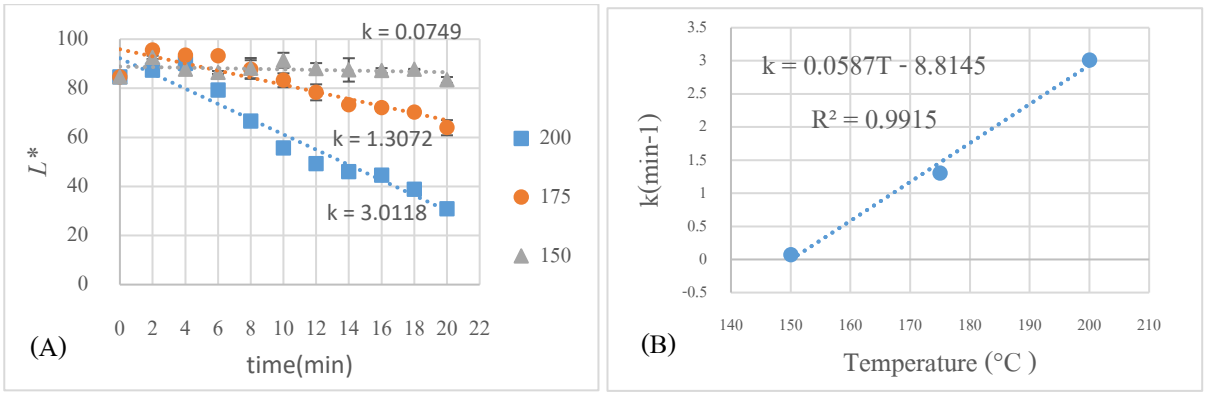


Fig. 2 Bread surface lightness (L) of bread during baking at 150, 175 and 200°C (A) and the relative between k and temperature (B)

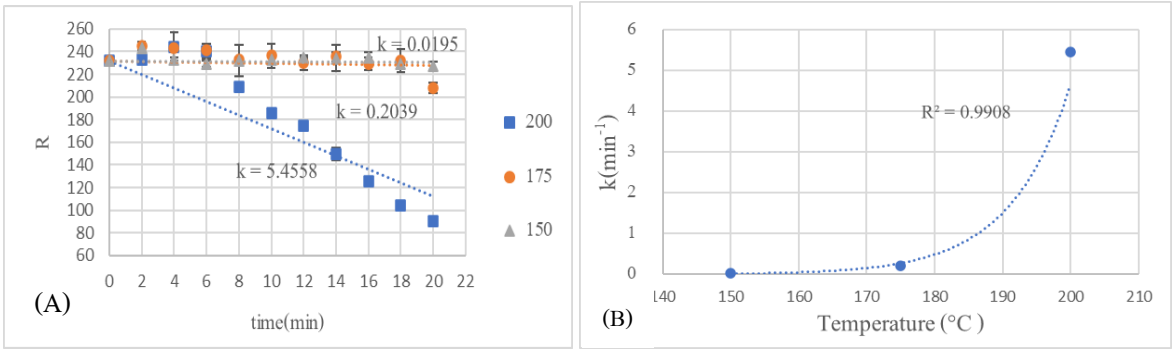


Fig. 3 Red color value (R) of bread during baking at 150, 175 and 200 °C (A) and the relative between k and temperature (B)

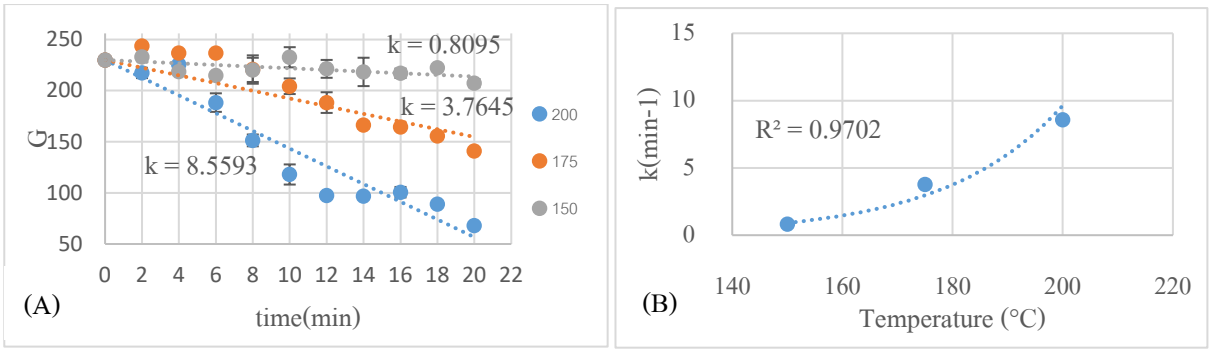


Fig. 4 green color value (G) of bread during baking at 150, 175 and 200 °C (A) and the relative between k and temperature (B)

จาก Fig. 5 และ Fig. 6 สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าสีของ B (ค่าสีฟ้า) ของขนมปังนั้นพบว่า ค่า B มีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการอบที่มากขึ้นโดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบและค่อยๆมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลงซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์ลำดับที่ 1 โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k) ที่อุณหภูมิ 150, 175 และ 200 °C มีค่าเท่ากับ 0.019, 0.032 และ 0.051 min^{-1} ตามลำดับ และสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการอาริย์เนียสในการอธิบายได้โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) -32.871 kJ/mol, A_0= 1.59*10^{-27}, R^2 = 0.999 และสำหรับค่า ΔE^* นั้นซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของสี สามารถหาได้จากค่า L^*, a^* และ b^* จาก Equation 11

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (11)$$

โดยพบว่าค่า $\Delta E*$ ไม่สามารถอธิบายได้สมการจลนพลศาสตร์ทั่วไปได้ และพบว่าในช่วงแรกของการอบ ค่า ΔE^* มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา และเมื่อเวลาผ่านไปก็มีอัตราการเพิ่มที่ลดลง

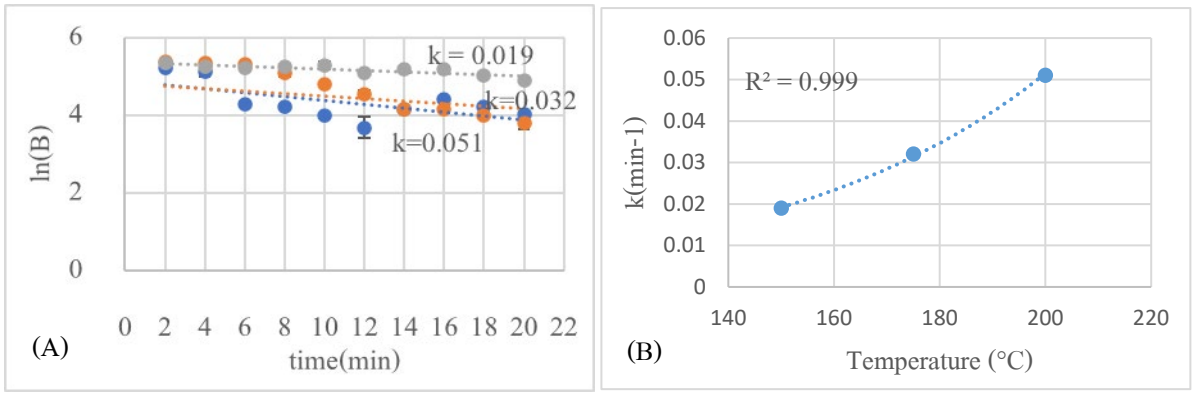


Fig. 5 the relative between logarithm of blue color (B) and the time (A) and the relative between k and temperature (B)

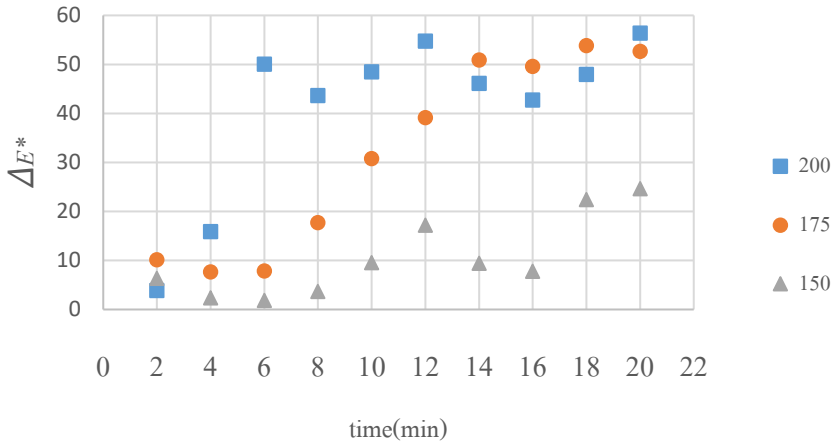


Fig. 6 total color change value (ΔE^*) of bread during baking at 150, 175 and 200°C

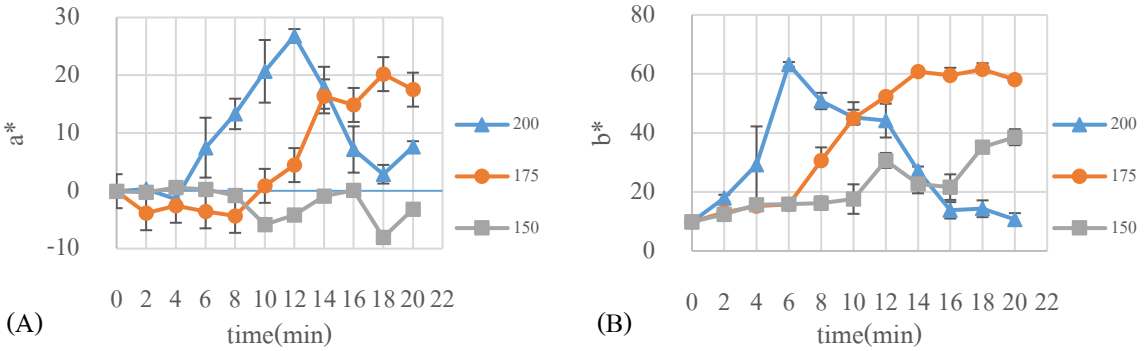


Fig. 7 a^* value (green - red) of bread during baking at 150, 175 and 200°C (A), b^* value (blue - yellow) of bread during baking at 150, 175 and 200°C (B)

เมื่อพิจารณา Fig. 7 พบว่ากราฟค่าสี a^* (ค่าสีเขียว-แดง) และ b^* (ค่าสีน้ำเงิน-เหลือง) นั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือที่อุณหภูมิ 200°C นั้นกราฟจะเป็นรูประฆังคว่ำ และที่อุณหภูมิ 175°C กราฟมีรูปร่างเป็นกราฟแบบซิกมอยด์ และที่อุณหภูมิ 150°C กราฟนั้นเป็นรูปเส้นตรง ซึ่งไม่สามารถอธิบายโดยสมการจลนพลศาสตร์เคมีทั่วไปได้ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 175 และ 200°C นั้นสีของขนมปังจะมีค่าออกไปทางสีแดง ส่วนที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าค่า a^* ของขนมปังไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่า b^* เมื่อใช้เวลาอบที่มากขึ้นพบว่าค่า b^* มีค่าที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ยกเว้นที่อุณหภูมิการอบที่ 200°C ที่เมื่อเวลาการอบมากกว่า 6 นาที จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเข้าใกล้ค่าที่จุดเริ่มต้นที่ 20 นาที คาดว่าเป็นผลจากการที่ขนมปังเกิดการไหม้และมีสีใกล้เคียงสีดำมากขึ้น ทำให้ความเป็นสีแดงสีแดงลดลงค่า a^* จึงลดลง

สรุป

ในการอบขนมปังที่อุณหภูมิต่างๆพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดและคาราเมลไลเซชัน โดยผลของสองปฏิกิริยาข้างต้นทำให้ค่าความสว่าง L^* ของขนมปังมีค่าลดลง ซึ่งการที่ค่าความสว่างลดลงก็ทำให้ค่าสี R, G และ B มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน และจากค่า b^* ทำให้ทราบว่าสีของขนมปังจะมีสีเหลืองมากขึ้นเมื่อใช้เวลาอบมากขึ้นยกเว้นที่อุณหภูมิ 200°C ที่ค่า b^* จะลดลงหลังจากอบ

มากกว่า 6 นาที โดยค่า a^* นั้นมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสีใกล้เคียงกับค่า b^* และที่ 200°C และค่าสี L^*, R, G สามารถติดตามได้ด้วยสมการจลนพลศาสตร์ลำดับ 0 และค่า B สามารถติดตามด้วยสมการจลนพลศาสตร์ลำดับ 1 ซึ่งจะสามารถนำค่าเหล่านี้ไปทำนายค่าสีของขนมปังระหว่างการอบ พัฒนากระบวนการผลิตขนมปังให้ได้ขนมปังที่มีคุณภาพดีขึ้นไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

จิตรธนา แจ่มเมฆ, อรอนงค์ นัยวิกุล. 2553. เบเกอรีเทคโนโลยีเบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 10. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์. 2560. หลักการออกแบบกระบวนการผลิตอาหาร, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Capuano, E., Ferrigno, A., Acampa, I., Ameur, L.A., Fogliano, V. 2008. Characterization of the Maillard reaction in bread crisps. European Food Research and Technology 228: 311–319. doi.org/10.1007/s00217-008-0936-5

Castro, W., Oblitas, J., Chuquizuta, T., George, H.A. 2017. Application of image analysis to optimization of the bread-making process based on the acceptability of the crust color. Journal of Cereal Science 74: 194–199. doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.002

Leo´n, K., Mery, D., Pedreschi, F., Leo´n, J. 2006. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. Food Research International 39: 1084–1091. doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.006

Purlis, E., Salvadori, V.O. 2007. Bread browning kinetics during baking. Journal of Food Engineering 80: 1107–1115.

Zanoni, B., Peri, C., Bruno, D. 1995. Modelling of browning kinetics of bread crust during baking. LWT - Food Science and Technology 28: 604–609.

Physical characteristics and stability of vegetable oil emulsions containing different oil phases compared with commercial milk cream

Tirayus Jaiyai[a,b], Kullanart Tongkhao[a], Masubon Thongngam[a], Utai Klinkesorn[a,b,*]
[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[b]Center of Excellence on Agricultural Biotechnology: (AG-BIO/PERDO-CHE), Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: utai.k@ku.th, fagiutk@ku.ac.th

Abstract

Due to the content of long-chain saturated fatty acids (C14:0-C18:0) in milk cream and more interest in plant-based products of consumers in the present time, it may force the increasing demand for alternative non-dairy creams, such as vegetable oil emulsions. Therefore, the influence of the vegetable oil phase (rice bran oil, coconut oil, and 1:1 rice bran: coconut oils blend) on the physical characteristics and stability of 35 wt% oil-in-water emulsion was studied in this work by comparing with commercial milk cream. The solid fat content profile of blended oil emulsion showed the most similarity to that of the commercial sample. All emulsions showed the shear thinning behavior and the highest viscosity was observed for commercial milk cream. Polydispersity index values of less than 0.3 were found for all samples, indicating a monomodal size distribution. However, the commercial milk cream had the largest droplet size of approximately 1193 nm. The results were consistent with the microstructure observed through the light-microscope. The emulsion made with blended oil had the highest stability even after storage for 42 days. The results suggested that the emulsion made with the blended oil between rice bran and coconut oils could be used to imitate milk cream. Furthermore, this vegetable oil emulsion has a potential to replace the milk cream in some food products such as ganache.

Keywords: Milk cream, Oil-in-water emulsion, Physical characteristics, Storage stability, Vegetable oil type

Introduction

Milk cream is one kind of oil-in-water emulsion that usually contained 30-40 wt% fat which is widely used as an ingredient in sweet and savory dishes, such as ice cream, desserts, confectionery, cakes, and soup (Deosarkar et al., 2016). However, the content of long-chain saturated fatty acids, i.e., myristic acid (C14:0; ~11%), palmitic acid (16:0; ~31%), stearic acid (18:0; ~12%) (Mansson, 2008), and the increase of consumer's interest in plant-based products may force the reduction uses of milk cream and the increasing demand of the alternative non-dairy creams, in the present time. The non-dairy creams or imitation milk creams had been prepared in some previous works using hydrogenated vegetable fat and palm oils (Adriana and Andrzej, 2019; Shamsi et al., 2002). However, there is no or less research studied on production of milk cream analogue from rice bran oil and coconut oil.

Rice bran oil contains a balancing fatty acids profile, which the major fatty acids are oleic acid (C18:1; ~42%), linoleic acid (C18:2; ~32%), and palmitic acid (C16:0; ~21%) (Kupongsak and Sathitvorapojjana, 2017). This oil is also a rich source of unsaponifiable compounds (i.e., γ-oryzanol and phytosterols) that having a health benefit especially cholesterol-lowering potential (Pal and Pratap, 2017). More than 90% of total fatty acids in coconut oil are saturated fatty acids included lauric acid (C12:0; ~47%), myristic acid (C14:0; ~19%), palmitic acid (C16:0; ~9%), caprylic acid (C8:0; ~8%), and capric acid (C10:0; ~6%) (Kupongsak and Sathitvorapojjana, 2017). Even though coconut oil composes largely of saturated fatty acids, it is a source of medium-chain fatty acids (C8:0-C12:0), which may protect fat deposition on the organs and blood vessels. Thus, coconut oil is not considered as a potential atherogenic fat as reported for oil containing long-chain saturated fatty acids. Moreover, a very small amount of cholesterol present in the coconut oil is also reported (Boemeke et al., 2015). Therefore, the emulsion cream made from healthy vegetable oils, such as rice bran oil and coconut oil, should be recommended for imitation milk cream.

Oil-in-water emulsion is a system consisting of small oil droplets dispersed in an aqueous continuous phase. The type and composition of oil phase were reported as the main parameters affected the characteristics and stability of emulsion system. Hence, in this work, the influence of the oil phase (rice bran oil, coconut oil, and rice bran: coconut oils blend; 1:1) on the physical characteristics and stability of vegetable oil-in-water emulsion was studied.

Materials and Methods

Materials

Commercial milk cream (35% fat from dairy milk containing carrageenan as a thickener), edible rice bran oil (Thai Edible Oil Co., Ltd.) and coconut oil (Thai Pure Coconut Co., Ltd.) were purchased from a local supermarket in Bangkok, Thailand. Diacetyl tartaric acid ester of mono- and diglycerides (DATEM) was provided by Berli Jucker Public. Co., Ltd. (Bangkok, Thailand). Sodium caseinate (93.7% protein) and maltodextrin (DE 18-20) were obtained from Vicchi Enterprise Co., Ltd. (Bangkok, Thailand). Analytical grade di-potassium phosphate (K_2HPO_4) was a product of Ajax Finechem Pty Ltd. (New South Wales, Australia).

Oil-in-water emulsion preparation

Vegetable oil emulsions comprising 35 wt% oil and 65 wt% aqueous phases were produced using the modified method from Wanthong and Klinkesorn (2020). The aqueous phase was prepared by dispersing all of dry materials (2 wt% sodium caseinate, 2.5 wt% refined sugar, 2.5 wt% maltodextrin, 0.5 wt% DATEM, and 0.15 wt% di-potassium phosphate) in distilled water. The aqueous solution was heated to 80°C using a magnetic hot plate stirrer

(SCHOTT Instrument GmbH, D-55122 Mainz, Germany) at a speed of 500 rpm for 15 minutes to prevent the lump formation. Then, the different hot oil phases (rice bran oil, coconut oil, and 1:1 (w/w) blend of rice bran and coconut oil) were separately mixed with the aqueous phases and homogenized at 9500 rpm for 4 minutes using a handheld high-speed homogenizer (Ultra-Turra®xT25 basic, Ika®-Werke Gmbh & Co., Staufen im Breisgau, Germany). These coarse emulsions, thereafter, were passed through the two-stage high- pressure value homogenizer (15MR-8TA, APV Gaulin, Inc., Wilmington, MA, USA) applying the pressure of the first and second stages of 1500 and 500 psi, respectively. The prepared emulsions were then kept at ≈ 4°C in a refrigerator for 24 h before the measurement of the characteristics and stability.

Solid fat content measurement

The solid fat content (SFC) of vegetable oil emulsions and commercial cream was measured using a differential scanning calorimeter (DSC) (Pyris 1, Perkin Elmer, MA, USA) according to the modified method from Mahisanunt et al. (2020). In brief, each sample was weighed (5±0.5 mg) and hermetically sealed in a stainless-steel pan. The samples were heated from 25 to 90°C and then held for 5 minutes at 90°C before cooled to -40°C at a rate of 10°C/min. After holding for 5 minutes, the sample pan was heated from -40 to 90°C at the same rate and the melting profile was recorded. Then, the SFC was determined using the continuous integration of the DSC melting curve at different temperatures.

Viscosity measurement

The viscosity of all samples was measured at 25ºC using a rotational viscometer (DV-III^{+}, AMETEK Brookfield, MA, USA) with a UL adapter. Approximately 15 ml of emulsions and milk cream was placed in a cylindrical tube chamber. The spindle rotational speed ranging from 10 to 100 rpm was applied and the apparent viscosity at various shear rates was recorded.

Droplet size and distribution measurement

The emulsion samples and milk cream were diluted with distilled water, then approximately 1 ml of diluted samples was transferred into the disposable polystyrene cuvette. The sample cuvettes were placed inside the dynamic light scattering instrument (Zetasizer Nano series-Zen 3600, Malvern Instruments, Worcestershire, UK). Then, the droplet size and distribution were analyzed at 25ºC and expressed in the term of Z-average and particle size distribution index (PDI), respectively.

Microstructure observation

The microstructure of emulsions was explored using a light microscope (Axio Imager MI, Carl Zeiss Pte Ltd., Germany) at an objective magnification of 40×. The samples were diluted 50 times with distilled water. A drop of diluted emulsions was placed on microscope slides, and a coverslip was then carefully placed on a top of each slide. After that, at least 5 images of each slide were recorded by digital image processing software (Image-Pro Plus^{TM}, version 6).

Stability index measurement

Each vegetable oil emulsion and commercial milk cream (~10 ml) were placed in a glass test tube (16 mm diameter and 150 mm height) and sealed with a screw cap. The total height of emulsion (H_E) was measured before storing the sample tubes in a refrigerator at ~ 4ºC for 42 days. During storage, the height of the serum layer (H_S) from the bottom of sample tubes was recorded. The stability index (% SI) was calculated as 100 - (H_S/H_E)

Statistical analysis

Data from three replications and at least twice measurements were analyzed using a one-way analysis of variance (ANOVA). Duncan's multiple range test was used to test the significance of differences among mean values at $p < 0.05$ significance level.

Results and Discussion

Solid fat content

Solid fat content (SFC) is an important factor for the texture and mouthfeel of cream. In this work, the SFC of vegetable oil emulsions and milk cream as a function of temperature (from -10 to 40°C) was measured and shown in Fig. 1A. The results showed that all samples had an SFC of ~ 100% at -10°C and this decreased to ~ 0% when the temperature increased above 30°C. The coconut oil emulsion (COE) had the highest SFC values followed by the emulsion of blended oil (BOE), and rice bran oil (ROE), respectively. Principally, the SFC of emulsion or cream at a specific temperature related to the fatty acid composition of oil droplets as the higher saturated fatty acids, the higher SFC (Mutoh et al., 2001). The literature reported that coconut oil, rice bran oil, and their 1:1 (w/w) blend had approximately 93, 25, and 64% of saturated fatty acids, respectively (Bhatnagar et al., 2009). From our results, the most similar solid fat content profile compared with the commercial milk cream (~58% saturated fatty acids; Shamsi et al., 2002) could be noted for blended oil emulsion.

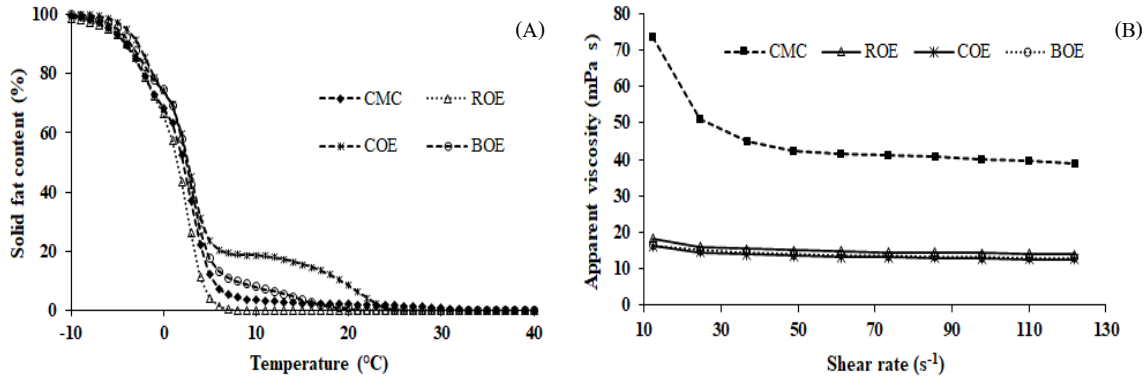


Fig. 1 Solid fat content curve (A) and apparent viscosity as a function of the shear rate (B) of vegetable oil emulsions (ROE = rice bran oil; COE = coconut oil; BOE = blended oil) and commercial milk cream (CMC)

Apparent viscosity

Apparent viscosity as a function of shear rate was reported to describe the flow behavior of emulsion samples (Fig. 1B). All vegetable oil emulsions exhibited a shear thinning non-Newtonian behavior as seen when the shear rate increased, the viscosity was decreased (Gulao et al., 2018). Moreover, the different vegetable oils in this study showed less effect on the apparent viscosity of prepared emulsions with the values ranging from 14.1–18.3, 12.6–16.2, and 13.0-16.4 mPa·s for rice bran oil, coconut oil, and blended oil emulsions, respectively. As expected, the commercial milk cream showed the highest viscosity ranged between 38.9 and 73.6 mPa·s. This result may be due to the fact that the commercial product contains carrageenan as a thickener caused an increase in viscosity of the cream. These results were consistent with the previous work which reported that the oil type had less effect on emulsion viscosity than

the concentration of oil droplets and stabilizer or thickener content in the continuous aqueous phase (Kowalska et al., 2020).

Droplet size and distribution

Generally, milk cream is an oil-in-water emulsion consisting the oil droplets that are dispersed in an aqueous phase. In this work, therefore the various vegetable oil-in-water emulsions were produced to imitate a dairy cream. The droplet size and distribution of prepared emulsions and commercial milk cream are shown in Table 1. Among the vegetable oil emulsions, rice bran oil emulsion had the largest droplet size approximately 600 nm which significantly larger than coconut oil emulsion (~ 502 nm), but not significant different with the blended oil emulsion (~ 552 nm). Larger oil droplets in rice bran oil emulsion when compared with the coconut oil emulsion could be correlated to the higher level of long-chain triglycerides in rice bran oil than coconut oil (Lu et al., 2020). However, all vegetable oil emulsions had smaller oil droplets compared with commercial milk cream (~ 1193 nm, $p < 0.05$). This may be due to the different processing conditions, emulsifier types and concentrations, and aqueous phase compositions used for production of the prepared emulsion from the commercial cream. The consistent effect of such parameters on emulsion droplet size had been studied and reported in the previous works (Zhao et al., 2017). The polydispersity index or PDI is a dimensionless measurement determining the droplet size distribution in an emulsion. The PDI values of all vegetable oil emulsions prepared in the present work included the commercial milk cream were less than 0.3 indicating a unimodal distribution and being considered suitable values (Wanthong and Klinkesorn, 2020).

Table 1 Droplet size (Z-Average) and polydispersity index (PDI) of vegetable oil emulsions and commercial milk cream

Sample	Z-Average (nm)	PDI
Commercial milk cream	1192.64 ± 41.77^{a}	0.131 ± 0.022^{b}
Rice bran oil emulsion	598.26 ± 78.96^{b}	0.267 ± 0.046^{a}
Coconut oil emulsion	501.96 ± 50.20^{c}	0.232 ± 0.060^{a}
Blended oil emulsion	551.87 ± 26.19^{bc}	0.268 ± 0.034^{a}

[a,b,c]Mean values superscripted with different lowercase within the same column indicate significant difference ($p < 0.05$)

Microstructure

The microstructure of samples observing via optical light microscope (Fig. 2) indicated that all prepared vegetable oil emulsions and commercial milk cream were stable to droplets flocculation. There was no evidence of droplet aggregation in the samples. Most of the oil droplets were individually dispersed in a continuous phase and the largest size of droplets in commercial milk cream (Fig. 2D) was noted in consistent with the droplet size and distribution results described above.

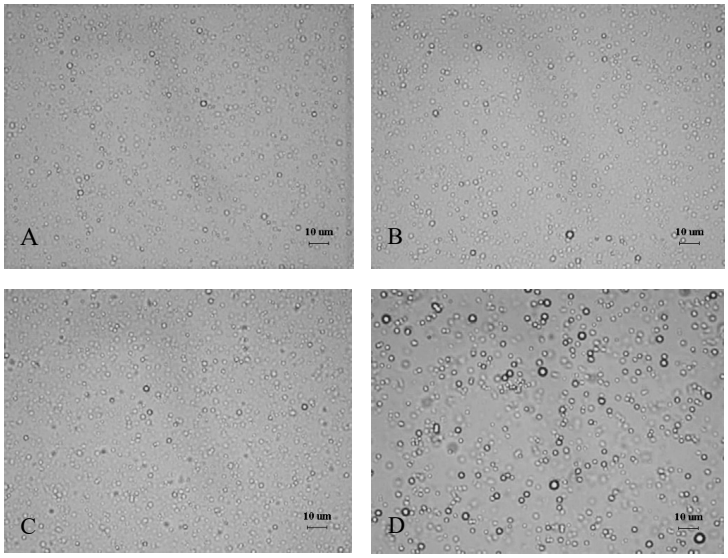


Fig. 2 Optical light microscopic images of vegetable oil emulsions (A = rice bran oil; B = coconut oil; C = blended oil) and commercial milk cream (D)

Stability index

The physical stability of samples was monitored during storage at 4°C for 42 days and the obtained results are shown in Fig. 3. There was no phase separation observed for the emulsions produced with various vegetable oils included the commercial milk cream after storage for 1 and 14 days (Fig. 3A-3C). At the 21 days of storage, the serum phase around 1-2 mm at the bottom of the commercial milk cream (CMC) began to separate. This serum fraction slightly increased with the storage time to around 3–4 mm after a 42-day storage period. The coconut oil emulsion was the least stable sample among prepared vegetable oil emulsions with showed unstable at 42 days of storage (Fig. 3A and 3G). The most stable emulsion throughout the storage period was found for rice bran oil and blended oil emulsions with no visually observed serum fraction. The least stability of coconut oil emulsion at 4°C was probably because almost all of the coconut oil droplets in emulsion could be crystallized and became solid crystals. After longer storage time, they tended to undergo polymorphic transitions, which led to a change in the shape and induced particle aggregation. For rice bran oil and blended oil emulsion, there was a remaining liquid oil fraction in the droplets which less prone to crystallize and not many polymorphic transitions. As result, more storage stability was observed in these emulsions than coconut oil emulsion (Qian et al., 2013).

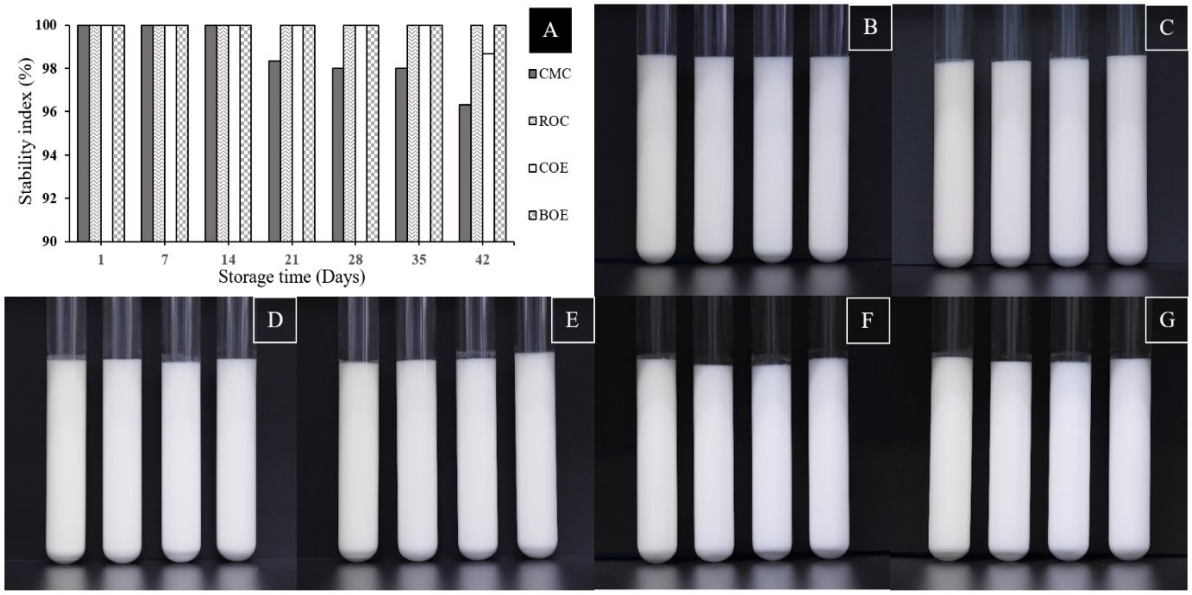


Fig. 3 Stability index (A) and visual appearance of vegetable oil emulsions and cream stored at 4 °C for 42 days (B = 1 day, C = 14 days, D = 21 days, E = 28 days, F = 35 days, and G = 42 days). The samples from the left to the right side are commercial milk cream (CMC), rice bran oil emulsion (ROE), coconut oil emulsion (COE), and blended oil emulsion, (BOE), respectively.

Conclusion

This work suggested that the 1:1 (w/w) blend between rice bran oil and coconut oil could be used as an oil phase to imitate the liquid dairy cream according to the studied formulation and processing conditions. These blended oil emulsions showed a similar solid fat content profile to that of commercial milk cream. Small droplet size (< 600 nm) with narrow and homogeneity distribution (PDI < 0.3) of blended oil emulsions supported the prolonged stability at a refrigerated temperature (~ 4°C) storage. The possible application to replace a milk cream with this vegetable oil emulsion in food products such as ganache has seemed to be potential application and it will be carried out in our next study.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors are grateful for partial financial support by the Center of Excellence on Agricultural Biotechnology, Science and Technology Postgraduate Education and Research Development Office, Office of Higher Education Commission, Ministry of Education (AG-BIO/PERDO-CHE). We also wish to acknowledge the use of laboratory facilities and research equipment provides by Faculty of the Agro-Industry, Kasetsart University.

References

Adriana, B., Andrzej, B. 2019. Comparison of physical and functional properties of whipping cream and whipping cream analogue. Food Sci. Nutr. Res. 2: 1–7.

Bhatnagar, A.S., Prasanth Kumar, P.K., Hemavathy, J., Gopala Krishna, A.G. 2009. Fatty acid composition, oxidative stability, and radical scavenging activity of vegetable oil blends with coconut oil. J. Am. Oil Chem. Soc. 86: 991–999.

Boemeke, L., Marcadenti A., Busnello, Gottschall C.B.A. 2015. Effects of coconut oil on human health. Open J. Endocr. Metab. Dis. 5: 84–87.

Deosarkar, S.S., Khedkar, C.D., Kalyankar, S.D., Sarode, A.R. 2016. Cream: Types of cream. The Encyclopedia of Food and Health 2: 331–337.

Gulão, E.S., Souza, C.J.F., Costa, A.R., Rocha-Leão, M.H.M., Garcia-Rojas, E.E. 2018. Stability and rheological behavior of coconut oil-in-water emulsions formed by biopolymers. Polímeros 28: 413–421.

Kowalska, M., Wozniak, M., Zbikowska, A., Kozlowska, M. 2020. Physicochemical characterization and evaluation of emulsions containing chemically modified fats and different hydrocolloids. Biomolecules 10: 1–17.

Kupongsak, S., Sathitvorapojjana, S. 2017. Properties and storage stability of O/W emulsion replaced with medium-chain fatty acid oil. Pol. J. Food Nutr. Sci. 67: 107–115.

Lu, M., Zhang, T., Jiang, Z., Guo, Y., Qiu, F., Liu, R., Zhang, L., Chang, M., Liu, R., Jin, Q., Wang, X. 2020. Physical properties and cellular antioxidant activity of vegetable oil emulsions with different chain lengths and saturation of triglycerides. Lwt-Food Sci. Technol. 121: 1–9.

Mahisanunt, B., Hondoh, H., Klinkesorn, U. 2020. *In situ* observation and physical-chemical characteristics of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) kernel olein crystals obtained from acetone fractionation. J. Am. Oil Chem. Soc. 97: 1203–1213.

Mansson, H.L. 2008. Fatty acids in bovine milk fat. Food Sci. Nutr. Res. 52: 1–3.

Mutoh, T.A., Nakagawa, S., Noda, M., Shiinoki, Y., Matsumura, Y. 2001. Relationship between characteristics of oil droplets and solidification of thermally treated creams. J. Am. Oil Chem. Soc. 78: 177–182.

Pal, Y.P., Pratap, A.P. 2017. Rice bran oil: A versatile source for edible and industrial applications. J Oleo Sci. 66: 551–556.

Qian, C., Decker, E.A., Xiao, H., McClements, D.J. 2013. Impact of lipid nanoparticle physical state on particle aggregation and β-carotene degradation: Potential limitations of solid lipid nanoparticles. Food Res. Int. 52: 342–349.

Shamsi, K., Che, Man Y.B., Yusoff, M.S.A., Jinap, S. 2002. A comparative study of dairy whipping cream and palm oil-based whipping cream in terms of FA composition and foam stability. J. Am. Oil Chem. Soc. 79: 583–588.

Wanthong, T., Klinkesorn, U. 2020. Rambutan (*Nephelium lappaceum*) kernel olein as a non-hydrogenated fat component for developing model non-dairy liquid creamer: effect of emulsifier concentration, sterilization, and pH. J Food Sci Technol. 57: 4404–4413.

Zhao, Y., Khalid, N., Shu, G., Neves, M.A., Kobayashi, I., Nakajima, M. 2017. Formulation and characterization of oil-in-water emulsions stabilized by gelatinized kudzu starch. Int J Food Prop: 1–13.

Effect of processing cycles on properties of polyethylene terephthalate

Rizka Try Gustina, **Amporn Sane, Piyawanee Jariyasakoolroj, Busarin Chongcharoenyanon***
Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: busarin.cho@ku.th

Abstract

The present study aims to investigate the effect of processing cycles on the physical and mechanical properties of polyethylene terephthalate (PET) prepared by melt extrusion process. The samples were prepared by melting PET pellets using a twin-screw extruder with a processing temperature range of 120-280°C and screw speed of 130 rpm. The melting process of PET pellets was carried out from 1 to 6 cycles to simulate recycled PET (rPET). The results showed significant changes in physical and mechanical properties of rPET with increasing number of melting cycle. The density of the samples decreased from 1.42 to 1.30 g/cm³ after 6 cycles of extrusion process. The density reduction could be explained by chain scission due to hydrolysis, thermal and oxidation degradation. The chain scission produces shorter chains which results in more ends per unit volume and hence a higher free volume. Melt flow index (MFI) of PET pellets drastically increased from 44.18 to 298.15 g/10 min after 6 cycles of melt extrusion. In addition, the impact strength of rPET decreased from 2.63 $x10^{-2}$ kJ/m^2 to $0.41x10^{-3}$ kJ/m^2. Our results have shown that increasing the number of extrusion cycles reduced the processability and mechanical properties of PET.

Keywords: PET, Extrusion cycle, Plastic recycling, Melt flow index, Impact strength, Yellowness, Density.

Introduction

Polyethylene terephthalate (PET) is a thermoplastic polyester that is widely used in the packaging industry for food, beverages, and pharmaceutical products. PET is a material produced by polymerizing ethylene glycol and dimethyl terephthalate acid during poly-condensation production (Bo Li et al., 2016). PET is a semi-crystalline polymer that has excellent chemical resistance, melt mobility, rotational ability, and consists of repeating units, compared to polypropylene (PP), PET has a higher melting temperature (T_m) which is around 260ºC and has the glass transition temperature (T_g) varies between 67 and 140°C. According to Masmoudi et al. (2018) using PET has a significant impact on environmental pollution. In natural conditions, PET products experience slow decomposition so that the recycling process is considered the best and economical way to preserve PET as a resource and reduce the solid waste pollution produced after its use.

Recycling is one way that is considered capable of reducing PET waste pollution. In general, PET can be recycled by the different methods: 1) Chemical recycling, which PET is subjected to reactions that are the opposite of polymerization such as hydrolysis to obtain intermediary products such as polyglycols, or even monomers or initial materials terephthalic acid (TPA) or dimethyl phthalate (DMT) and ethylene glycol (EG) from which plastic is made. 2) Mechanical recycling, this method is a method commonly used for the PET recycling process, this process includes a series of simple, relatively inexpensive processes for grinding, drying, washing, and reprocessing waste. In general, this sequence of processes results in a degraded recycling structure when compared to the original molecule, because in this process the chain has been subjected to mechanical stress (Mancini et al., 1999).

A common problem that occurs during the mechanical recycling of PET is polymer degradation which causes a decrease in molecular weight (M_w), impairing the mechanical properties. Degradation will occur during PET processing. Mechanical, thermal, oxidative, and especially hydrolytic degradation has a negative effect on the resulting properties of the product and must be kept within certain limits. To obtain a low moisture content, PET must be processed by applying low shear stress and must minimize PET pellets from being exposed to oxygen the drying process of PET is required before extrusion (Michaeli, 2004). The molecular weight of PET significantly affects physical and mechanical properties. If the molecular weight is too low, the transition temperature and general mechanical properties are also too low for the polymer material to have useful commercial applications(Sanches et al., 2005). This study aims to investigate the effect of processing cycles on the physical and mechanical properties of polyethylene terephthalate (PET) prepared by the melt extrusion process.

Materials and Methods

Preparation recycled polyethylene terephthalate by extrusion

The virgin PET resin (R0) from a local factory in Bangkok, Thailand was dried at 160ºC for 6 h before processing (Duarte et al., 2016). Samples were in a twin-screw extruder for blending and were cut into pellets with a pelletizer. The extruder barrel temperature profile was in a range of 120-280˚C from hopper to die of extrusion. The extrusion process is repeated six

times. The sheet made from the pellets of each recycles PET with the different conditions using the twin-screw extruder connected with a 10 cm sheet.

Properties testing of recycled Polyethylene Terephthalate (rPET)

Melt flow index (MFI) of virgin PET and rPET were measured according to American Society for Testing and Materials (ASTM)1238-10. The measurement was performed using a Melt flow indexer (MFI-203, Custom Scientific, USA) at 285˚C with a load cell 2.16 kg, a time interval of 6 min, and a preheating time of 7 min. MFI is measured in triplicate and reported as mean ± SD in g/10 minutes.

Oxygen transmission rates of the films were determined by Oxygen Permeation Analyzer (Model 8501, Illinois, USA) following ASTM D3985. The film was cut into a circle shape with a diameter of 14 cm and conditioned at 50% RH and 25℃ for at least 48 h before measurements. Three specimens were tested for each sample. Oxygen permeability (OP) was calculated by using the Equation 1

$$OP = (OTR \times L)/\Delta P \quad (1)$$

Where OP is the oxygen permeability of films ($cm^3 \cdot mm \cdot day^{-1} \cdot m^{-2} \cdot atm^{-1}$). OTR is the oxygen transmission rate through a film ($cm^3 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$), L is the mean thickness (mm) and ΔP is the oxygen partial pressure difference between the two sides of the film (atm). The result will be recorded as mean ± SD.

Color determination of the samples is made using colorimetry (CQXE, Color Global Co., Ltd., Thailand). The instrument was calibrated with the standard black card and white tile. All samples were placed on the standard white and mounted at the reflectance port. The samples were measured by triplicate and record L* a* b* value. L* value indicates lightness (0 is black and 100 is white), a* value indicate red and green color (+a* is red color and –a* is green color), and b* value indicates yellow and blue color (+b* is yellow and –b* is blue color).

For the impact test, the method used is the Charpy impact test. This is a high-speed fracture test that measures the energy required to fracture a specimen under flexible conditions by transferring the impact energy to deflect a structure. The impact strength (J/m^2) is defined as the energy (impact energy) divided by the cross-sectional area of the sample, which has fractured.

Result and Discussion

The appearance of recycled Polyethylene terephthalate (rPET)

Virgin PET was referred to as control recycled and initialized with R0. Furthermore, the pellets resulting from the recycled were then re-dried at 160˚C for 6 h before re-extrude up to 6 cycles to simulate the multiple recycling process of PET. The appearance were showed in Fig. 1.

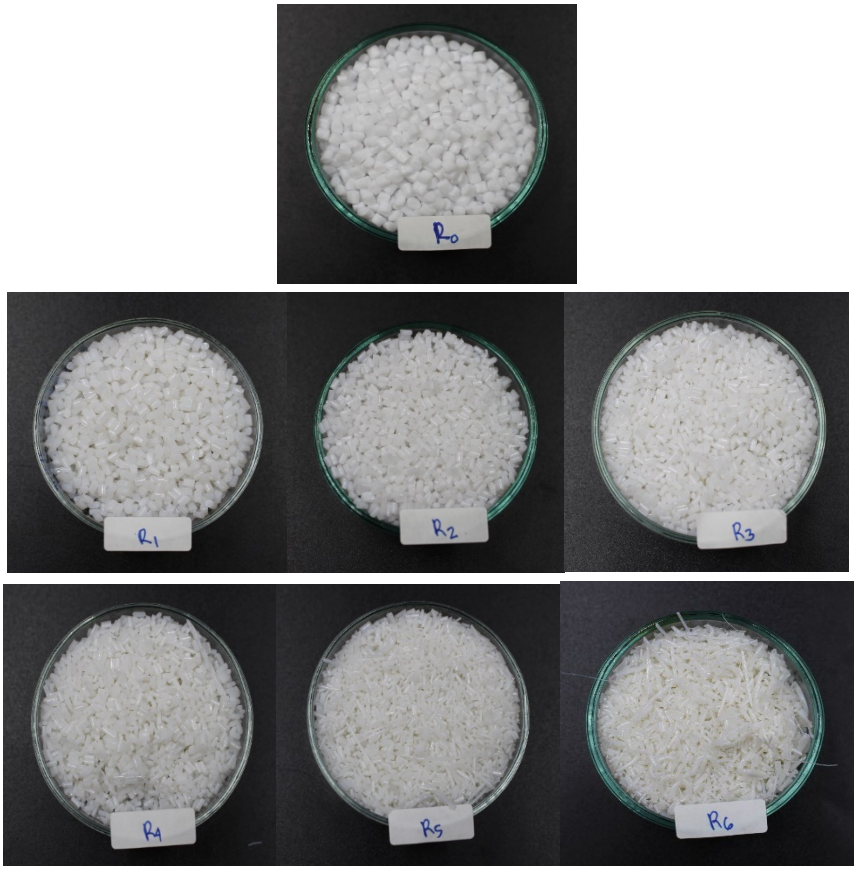


Fig. 1 Appearance of PET from virgin PET (R0) to the 1st cycle (R1) to the 6th cycle (R6)

Fig. 1 shows the virgin PET and rPET from the 1st cycle of extrusion to the 6th cycle of the extrusion. The appearance of the samples changed from the original virgin PET white to yellowish opaque along with the number of recycling processes. The pellet size during the recycling process also changes. After the recycle process from R0 to R1, the recycled PET particles change slowly, the size start to shrink but still uniform, this happens until the third cycle process. A significant change occurs when after the third cycle, the pellet size become non-uniform and getting smaller. In the R5 to R6 cycle the pellets are very small and some are tangled yarns.

According to D. Berg et al. (2018), one of the factors that make PET turn yellow is high temperatures during processing (260–300°C, 3–8 h) in the presence of oxygen. In this condition, the formation of the hydroxylated aromatic ring, quinones, and stilbene quinones is one of the things that makes PET turn yellow during heating at high temperatures. The polyester extrusion process is usually run in a nitrogen atmosphere and takes only a few minutes. Thus, thermo-yellowing should not occur if the extrusion process of PET is run carefully. Thermal degradation results in various types of end groups on the polymer chains. The initial step is cutting the ester linkage chain which results in a decrease in molecular weight either through the random cutting of the ester bond or through the end of the chain and an increase in the carboxyl end group. Every chain scission consumes one water molecule and creates one carboxyl end group and one hydroxyl end group. With the chain scission process, the polymer chain shortens (reduced molecular weight), which causes a significant reduction in mechanical properties (Awaja et al., 2005).

The color measurement of PET sheets was carried out by using the HunterLab CIELAB colorimeter. The measurement was converted by the instrument to L*, a*, and b* color scale value. L* value indicates lightness (0 is black and 100 is white), a* value indicate red and green color (+a* is red color and –a* is green color), and b* value indicates yellow and blue color (+b* is yellow and –b* is blue color). The yellow color appears when the fourth cycle to the sixth (R6) showed in Table 1.

Table 1 The color values of PET (L*, a*, b* according to CIE-L*a*b*) of rPET

Samples	L*	a*	b*
R0	38.30 ± 0.75	0.03 ± 0.07	-2.25 ± 0.10
R1	40.10 ± 0.88	-0.05 ± 0.03	-2.29 ± 0.12
R2	39.57 ± 0.31	0.01 ± 0.03	-1.54 ± 0.26
R3	39.25 ± 0.58	0.06 ± 0.03	-1.22 ± 0.05
R4	43.68 ± 2.65	0.02 ± 0.04	-0.86 ± 0.24
R5	42.16 ± 1.41	0.03 ± 0.10	-0.83 ± 0.42
R6	45.28 ± 3.66	-0.19 ± 0.03	-0.65± 0.27

The L* value is very important to provide information about the grayness of PET samples. The lower L* value indicated more grayness of samples. In the sample, the results show that the R0 sample which is the virgin PET sample (control sample) has a value of L* 38.30. The more cycle processes are carried out, the higher the L* value in the sample.

The variation of values showed in the a* value. Only samples R1 and R6 show negative a* results. The more negative a* indicates a slight green. Furthermore, for b* values, PET samples showed negative values in the range of -0.6 to -2.2. From the results of b*, it shows that, with the addition of cycles to rPET, the results are getting yellow. This is following what was mentioned by Packer et al. (1995). The yellowing of the PET is associated with thermal degradation. During the processing of PET above its melting temperature, thermal cleavage of the PET ester bonds results in shorter chains with the formation of acid and vinyl ester end groups. Bikiaris et al., (1995), also supports this claim by saying that repeated recycling produces more carboxyl end groups in PET, and causes more oxidation. Therefore, the larger rPET content in the sheet leads to an increase in the b* value. This is most likely caused by chain cutting reactions and subsequent morphological changes (La Mantia et al., 1994; Badia et al., 2009).

Similarly, Singh et al. (2011), studied sheets with varying percentages of virgin PET and rPET. It was found that the presence of rPET in sheets indicated a more green and yellow color in measurements with high b* values. Their inference was that during PET processing, the carboxyl end groups which are formed undergo oxidation and may be a reason for yellowing.

Density Measurements

The density of all resins were slightly difference (Fig. 2). Virgin PET has the highest density among the samples.

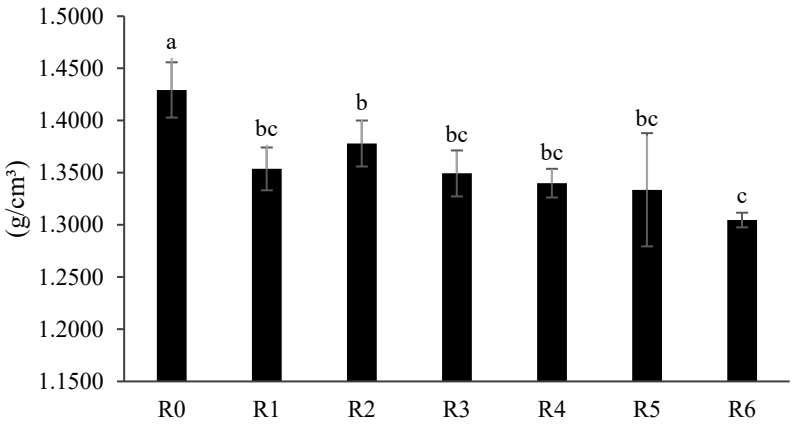


Fig 2. Density values of rPET

Fig. 2 shows that for the control sample (R0) the density value is 1.42 g/cm^3. Similarly, Mark (1985) reported that the density of PET is in the range of 1.41–1.43 g/cm^3. furthermore, in other samples, from R1until R6 the values of density slightly decrease 1.3 g/cm^3. During the processing (pelletizing) chain is broken (chain cutting) due to hydrolysis, thermal degradation and oxidation, and subsequent chain cutting as screw speed. The chain-cutting process results in a shorter chain that has more ends per unit volume than the long chain, so that the free volume is higher, and cause the density is lower (Venkatachalam et al., 2012; Al-Azzawi, 2015).

Melt flow index of recycled Polyethylene terephthalate

MFI of recycled polyethylene terephthalate was measured according to ASTM 1238-10. The measurement was perform using Melt Flow Indexer (MFI-203, Custom Scientific, USA) at temperature 285°C with a load cell of 2.16 kg. A high MFI value indicates good flow, small molecules, and low melt viscosity. The result showed in Table 2, that melt flowability of recycled polyethylene terephthalate decrease during the multiple processes of recycling. This means that by increasing the extrusion process on PET, the sample will melt faster and will have low viscosity. Determination of the viscosity of diluted solutions can provide information about the molecular characteristics of a particular polymer. When the viscosity data is correlated with other molecular parameters, it is possible to predict certain properties associated with molecular structure.

Table 2 Melt Flow Index of polyethylene terephthalate

Samples	g/10min
R0	44.1895 ± 2.69
R1	88.9686 ± 38.35
R2	105.7090 ± 28.35
R3	122.1349 ± 13.63
R4	174.1507 ± 51.97
R5	262.7979 ±126.40
R6	298.1572 ± 97.55

Table 2 showed that all samples have increased starting from the control sample (R0) which has a value of 44.1895 g/10 min, next for the R1 sample, has increased twice from the previous. Furthermore, the significant increase continues until sample R6. This showed that more of the recycling/extrusion process is carried out, the quality of the melt samples will increase. The same thing was stated in research by Spinacé (2000) that an increase in the number of processing cycles causes an increase in the degree of degradation as indicated by an increase in the concentration of the carboxyl end groups and the melt flow index. Mark and Houwink explained the relation between molecular weight and viscosity. The decrease in the molecular weight (chains break) leads to a reduction in viscosity i.e., reduction in the resistance to flow that causes an increase in the melt flow index.

Impact measurements recycled polyethylene terephthalate

The impact test was investigated on samples R0, R1, R2, R3, and R4. For samples R5 and R6, the test cannot be investigated because the sheet sizes of the two samples are small, showed in Table 3. The result shows that with the increasing of the extrusion process, the sample would be easier to break.

Table 3 Impact test value of recycled polyethylene terephthalate

Samples	Impact test value ($kJ/m^{2)}$
R0	$2.36 \times 10^{-2} \pm 0.002$
R1	$1.598 \times 10^{-2} \pm 0.945$
R2	$1.885 \times 10^{-2} \pm 0.820$
R3	$1.596 \times 10^{-2} \pm 0.809$
R4	$0.414 \times 10^{-3} \pm 0.297$
R5	-
R6	-

According to Askeland (1995), impact testing is usually used to evaluate the brittleness of material under high strain rates. The impact test is carried out on a material with a sudden strong blow, where the rate of strain is very fast so that the material can behave much more brittle than that observed under tensile stress. Meanwhile, the energy required to separate the sample per original cross-sectional area is the impact strength. Table 3 shows that the results of R0 to R4 have a very significant decrease in value.

Conclusion

PET is one of the most important polymers using in the packaging industry for food, beverages, and pharmaceutical products. In natural conditions, PET products experience slow decomposition so that the recycling process is considered the best and economical way to preserve PET as a resource and reduce the solid waste pollution produced after its use. Mechanical recycling, this method is a method commonly used for the PET recycling process, this process includes a series of simple, relatively inexpensive processes for grinding, drying, washing, and reprocessing waste. During PET processing, increasing the number of extrusion cycles reduced the processability and mechanical properties of PET. It shows that from the

result, increasing the number of extrusion cycles reduced the processability and mechanical properties of PET.

Acknowledgements

The authors sincerely thanks to Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University in supporting for this paper.

References

Al-Azzawi, F. 2015. Degradation Studies on Recycled Polyethylene Terephthalate (Doctoral dissertation, London Metropolitan University).

Al-Sabagh, A., et al. 2016. Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. 25: 53–64.

Awaja, F., Pavel, D.J.E.P.J. 2005. Recycling of PET. 41: 1453–1477.

Berg, D. 2018. Post-consumer Poly (ethylene Terephthalate)-Properties, Problems During Reprocessing, and Modification by Reactive Extrusion (Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek der RWTH Aachen).

Breyer, K., Regel, K., Michaeli, W. 1996. Reprocessing of post-consumer PET by reactive extrusion. Polymer Recycling (UK) 2: 251–255.

Buntinx, M., Willems, G., Knockaert, G., Adons, D., Yperman, J., Carleer, R., Peeters, R. 2014. Evaluation of the thickness and oxygen transmission rate before and after thermoforming mono-and multi-layer sheets into trays with variable depth. Polymers 6: 3019–3043.

Gupta, D., et al. 2005. Polymer nanocomposites and methods for their preparation, Google Patents

Jabarin, S., et al. 1984. Thermal stability of polyethylene terephthalate. 24: 1056–1063.

Jones, K.M.J.B., DW, Giles, GA: PET Packaging Technology (2002). PET materials and applications. 36–97.

La Mantia, F.P., et al. 1994. Recycling poly (ethyleneterephthalate). 45: 121–125.

López, M.D.M.C., Pernas, A.I.A., López, M.J.A., Latorre, A.L., Vilariño, J.L., Rodríguez, M. V.G. 2014. Assessing changes on poly (ethylene terephthalate) properties after recycling: Mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material. Materials chemistry and physics 147: 884–894.

Mancini, S.D., M. J. J. o. a. p. s. Zanin. 2000. Consecutive steps of PET recycling by injection: evaluation of the procedure and of the mechanical properties. 76: 266–275.

Painter, P.C., Coleman, M.M. 2008. Essentials of polymer science and engineering. DEStech Publications, Inc.

Venkatachalam, S., et al. 2012. Degradation and recyclability of poly (ethylene terephthalate). Polyester, InTech Rijeka, Croatia, pp. 75–98.

Comparing the effectiveness of incipient wetness and vacuum impregnation techniques for incorporating potassium permanganate into zeolite 5A

Ranbaranage Pramuda Manjith Silva, Amporn Sane*
Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: fagiams@ku.ac.th

Abstract

Zeolite 5A (Z5A) was loaded with potassium permanganate ($KMnO_4$) via incipient wetness impregnation (IWI) and vacuum impregnation (VI) techniques to compare the impregnation efficiency. Z5A was used as a porous matrix due to its microporous structure facilitating selective adsorption. $KMnO_4$ was chosen as an active compound because of its effective ethylene scavenging activity. Both impregnation techniques were performed using the same concentration of $KMnO_4$ (6%, w/v), $KMnO_4$:Z5A ratio (1:1, v/w), temperature (27°C), and time duration (15 min). IWI and VI experiments were carried out under ambient and vacuum (0.09 MPa) pressures, respectively. Loading capacity (LC) of $KMnO_4$ obtained from IWI and VI, determined by UV-Vis spectrophotometry, were in the ranges of 1.58–1.75% and 5.04–6.94%, respectively. The results suggest that vacuum force facilitates the removal of air present inside the Z5A pores and thus allows more $KMnO_4$ molecules to enter the pore channels. In addition, results obtained from scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopic analysis confirmed the presence of both potassium and manganese atoms in Z5A after impregnation with $KMnO_4$. Greater contents of potassium and manganese atoms were present in Z5A when impregnation of $KMnO_4$ was performed via VI technique, indicating that VI is more effective than IWI.

Keywords: Impregnation technique, $KMnO_4$, Loading content, Vacuum, Zeolite 5A

Introduction

Active packaging technology is one of the emerging areas in food packaging. The recent development in nanotechnology for active packaging embraces the modification of nanomaterials for packaging applications (Gaikwad et al., 2019). Nanoporous materials possess versatile performances and allow modifications to their internal pore structures to increase the adsorption efficiency. Impregnation is one of the modification techniques used to stabilize an active ingredient (solid, gas, liquid) by incorporating into a support matrix (porous solid). Zeolites, potential carriers for impregnation, are naturally occurring porous minerals composed of silicon, aluminum, and oxygen atoms as an aluminosilicate framework (SiO_4^{4-} and AlO_4^{5-}), held by shared O atoms as tetrahedrons (Dirim et al., 2001). This molecular network consists of empty spaces (voids) that are occupied by cations and water molecules. In this work, zeolite 5A (Z5A), a type A zeolite consisting of micropores (<2 nm) with a pore diameter range of 3–5 Å, was selected as nanoporous matrix to adsorb an active component. Due to the remarkable oxidation capability of potassium permanganate ($KMnO_4$), it has been widely used as a commercial ethylene adsorber. However, direct incorporation of $KMnO_4$ was not recommended due to the effect of color staining that occurred when in contact with products and packaging (Alvarez-Hernandez et al., 2018). To overcome this issue, $KMnO_4$ needs to be incorporated into a solid porous matrix to obtain an adsorption-oxidation system (Spricigo et al., 2017).

Generally, impregnation of active compounds (AC) into porous matrices aid the protection of AC from adverse environmental conditions. Examples of available impregnation techniques include incipient wetness impregnation (IWI) and vacuum impregnation (VI) (Deraz, 2018). Generally, in IWI, a solid support is mixed with an active compound solution and the mixture is subsequently dried to evaporate the excessive solvent. For VI technique, the impregnation takes place in a vacuum environment in order to remove the air trapped in the porous support, followed by drying in the same manners as IWI. In IWI, there is a deficiency in the persistent surface coverage of active ingredient with porous support, especially for microporous support materials whereas, the vacuum technique could overcome this by facilitating the movement of active components into those pore channels effectively with an aid of vacuum force (Maggi et al., 1998). Thus far, VI has not been employed for impregnating $KMnO_4$ into zeolite 5A. Therefore, this study was conducted in order to compare the effectiveness of impregnation techniques (i.e., IWI and VI) on impregnation of $KMnO_4$ into zeolite 5A.

Materials and Methods

Z5A was purchased from Thai Silicate Chemicals (Thailand). Potassium permanganate ($KMnO_4$, Analytical grade, 99.0% purity) was supplied by Keamus (Australia). Ethanol with 99.9% purity (Analytical grade) was obtained from Mërck (Germany).

Sample preparation

Prior to IWI and VI experiments, Z5A powder was dried in a hot air oven at 105ºC for 3 hr to remove the moisture and stored in a desiccator. In an impregnation experiment, an

aqueous solution of 6% (w/v) $KMnO_4$ was prepared by dissolving $KMnO_4$ crystals in distilled water and stirred vigorously via a magnetic stirrer for 30 min at ambient temperature (27ºC). Dried Z5A and $KMnO_4$ solution were used for IWI and VI experiments.

Incipient wetness impregnation (IWI) of $KMnO_4$ into zeolite 5A

In an IWI experiment, 100 mL of 6% (w/v) $KMnO_4$ solution was added into a vessel previously filled with 100 g of Z5A and the obtained mixture was stirred at 600 rpm for 15 min under atmospheric pressure at room temperature (27ºC) using equipment (Model DF-1L, Kori instrument, China) illustrated in Fig. 1. Then, the remaining $KMnO_4$ solution was filtered using Whatman filter papers (type 1, 150 mm), followed by washing the residue with 100 mL of distilled water to remove non-impregnated $KMnO_4$ from the Z5A surface. The solutions obtained from filtration and washing steps were combined in order to quantify the amount of unimpregnated $KMnO_4$. The sample was dried in a hot air oven at 50ºC for 3 hr. The $KMnO_4$ remaining in the solution was subjected to UV-Vis spectrophotometric analysis and the quantity of impregnated $KMnO_4$ was indirectly determined.

Vacuum impregnation (VI) of $KMnO_4$ into zeolite 5A

For VI experiments, the same equipment shown in Fig. 1 was used in combination with a vacuum system (Type N035.3AN.18, NEUBERGER, Germany). Impregnation of $KMnO_4$ in Z5A was carried out under the same conditions as IWI whilst vacuum pressure was held at 0.09 MPa throughout the experiment and then it was altered to ambient air pressure (0.1 MPa) after the impregnation, for 10 min. The remaining $KMnO_4$ solution was removed by filtering and the sample was washed with distilled water prior to drying in a hot air oven at 50ºC for 3 hr.

Determination of $KMnO_4$ loading content (LC)

The amount of $KMnO_4$ impregnated into Z5A was determined via an indirect method (Wills and Warton, 2004). The amount of $KMnO_4$ present in Z5A was calculated by determining the reduction of $KMnO_4$ content from the initial solution by UV-Vis spectrophotometry (model UV-2450, Shimadzu, Japan) at λ= 525 nm. The loading capacity (LC) of $KMnO_4$ in Z5A was calculated using Equation 1:

$$\%LC = \frac{\Delta w}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

where Δw = Mass of $KMnO_4$ impregnated into Z5A (g)
W_o = Total mass of sample (g)

Morphological and elemental analyses of Z5A impregnated with $KMnO_4$

The morphologies of Z5A impregnated with $KMnO_4$ were analyzed by a scanning electron microscope (SEM, QUANTA 450, FEI, Netherlands). The samples were sputter coated with gold before being characterized by SEM under 20,000X magnification and 20 kV. Moreover, an Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS, Oxford instruments, UK) was performed to determine the existence and distribution patterns of Al, Si, O, K and Mn atoms in Z5A loaded with $KMnO_4$.

Statistical analysis

The measurements of loading capacity of $KMnO_4$ were carried out in triplicate and the obtained data were analyzed for statistical mean. Statistical analyses were performed using the SPSS software (version 17, SPSS Inc.; Chicago, IL, USA) with a one-way analysis of variance (ANOVA). The significant difference at $p < 0.05$ was determined by Duncan and Tukey's B tests and the mean values were compared within the samples.

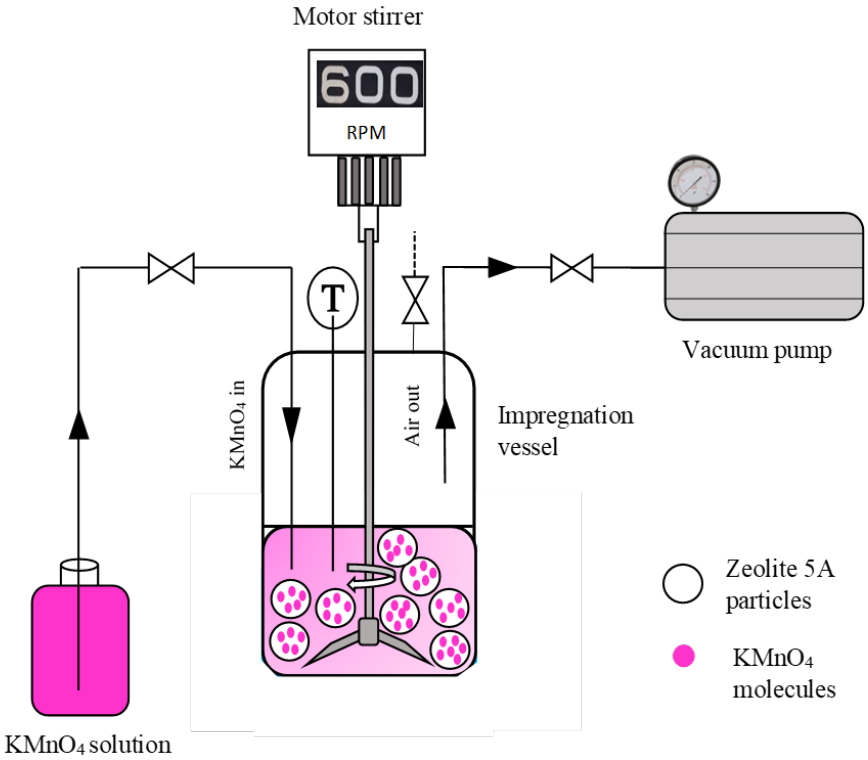


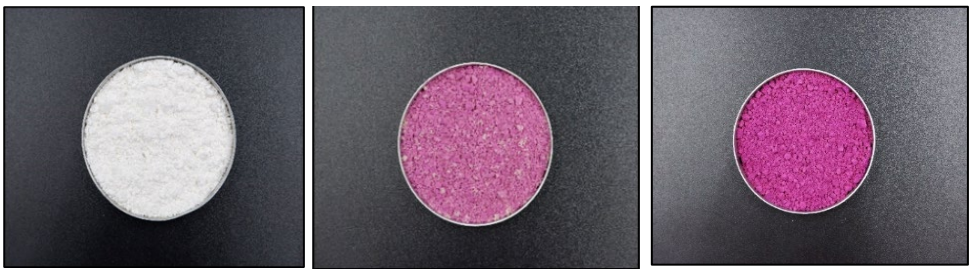
Fig. 1 Schematic diagram of equipment used for impregnating $KMnO_4$ into Z5A via IWI and VI techniques

Results and Discussion

Loading capacity of $KMnO_4$ in zeolite 5A

Two impregnation techniques, i.e. incipient wetness impregnation (IWI) and vacuum impregnation (VI) were performed systematically to compare the effectiveness of impregnation of $KMnO_4$ into zeolite 5A. The experiments were carried out using a constant concentration of $KMnO_4$ (6% w/v), impregnation time (15 min), and temperature (27ºC) (Yimmongkol et al., 2018; Saravanan et al., 2012). In addition, the ratios of $KMnO_4$ solution to zeolite 5A ($KMnO_4$:Z5A, v/w) used for impregnation were varied between 1:1 and 2:1. It was found that the color of Z5A powder changed from white to purple after impregnation with $KMnO_4$ via IWI and VI techniques (Fig. 2). Besides, VI resulted in more prominent purple color than IWI, possibly due to Z5A containing more $KMnO_4$ content. The loading capacity (LC) values of $KMnO_4$ obtained from IWI and VI were 1.58–1.75% and 5.04–6.94%, respectively (Fig. 3). The LC of $KMnO_4$ obtained from IWI in this work was in the same range with those obtained from impregnation of $KMnO_4$ into alumina and activated carbon reported by Hu et al. (2019),

Aprilliani et al. (2017), and Wills and Warton (2004) with the loading capacity ranging from 0.1 to 3.0%. The LC value obtained from IWI technique decreased from 1.75 to 1.58% when increasing the $KMnO_4$:Z5A ratio from 1:1 to 2:1. Similar trend was also observed when impregnation was performed with VI technique, as the LC decreased from 6.94 to 5.04% when increasing the $KMnO_4$:Z5A ratio from 1:1 to 2:1. This could be explained by the kinetic molecular theory (Daifullah et al., 2007). Since the diameter of H_2O molecules was smaller than that of $KMnO_4$ molecules, H_2O molecules could reach faster into the pore channels than $KMnO_4$. Increasing the $KMnO_4$:Z5A ratio from 1:1 to 2:1 could lead to more H_2O diffusing and occupying the pores, and then restricting the entry of $KMnO_4$ molecules (Daifullah et al., 2007). Compared to IWI, VI was at least twice more effective to impregnate $KMnO_4$ into zeolite 5A. This could be explained by that applied vacuum pressure in VI removes the air initially present in the zeolite pore channels and facilitate the entering of $KMnO_4$ solution into the pore channels.



(A) (B) (C)

Fig. 2 Images of initial Z5A powder (A) and $KMnO_4$-loaded Z5A powder prepared by IWI (B) and VI (C) techniques

Scanning Electron Microscopic (SEM) and Energy Dispersive Spectrophotometric (EDS) analyses

Z5A particles impregnated with $KMnO_4$ prepared via IWI and VI techniques using $KMnO_4$:Z5A ratio of 1:1 were characterized by SEM and EDS in order to confirm the presence of $KMnO_4$ in the Z5A. Fig. 4 illustrates SEM images of Z5A cubic particles with micron sizes before and after impregnation of $KMnO_4$ via IWI and VI techniques. The physical shape and dimensions of Z5A particles obtained from both impregnation techniques were similar. In addition, an EDS analysis was performed to exemplify the elemental mappings of $KMnO_4$-impregnated Z5A particles obtained from IWI and VI techniques (see Fig. 5). The distributions of potassium (K) and manganese (Mn) atoms are present in green and red colors, respectively. The presences of both K and Mn elements were more pronounced when Z5A was impregnated with VI technique (compare Figs. 5B and C, left) in agreement with the obtained EDS spectra and elemental compositions (Figs. 5B and C, right). The results obtained from elemental compositions also show the existences of K, Mn, Si, Al, and O, confirming the presences of both $KMnO_4$ and Z5A. In addition, the ratios of K:Si and Mn:Si representing the ratio of $KMnO_4$:Z5A increased when impregnation experiments were carried out via VI technique. These results consolidate the effectiveness of VI over IWI to impregnate $KMnO_4$ into Z5A.

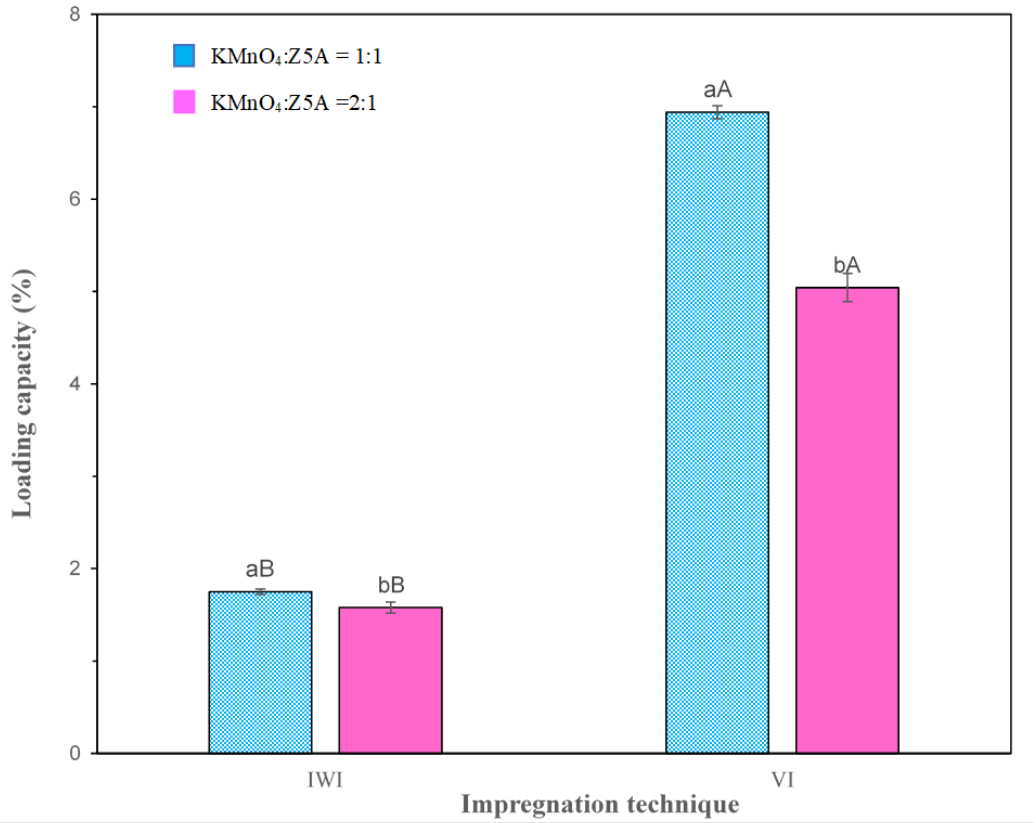
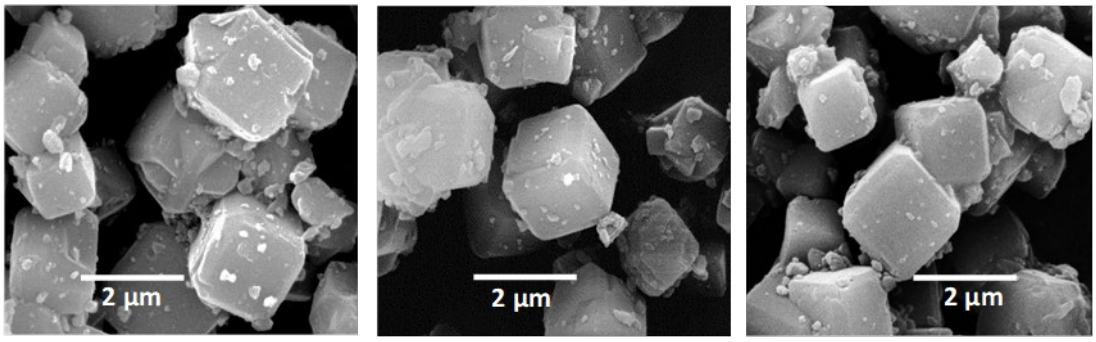


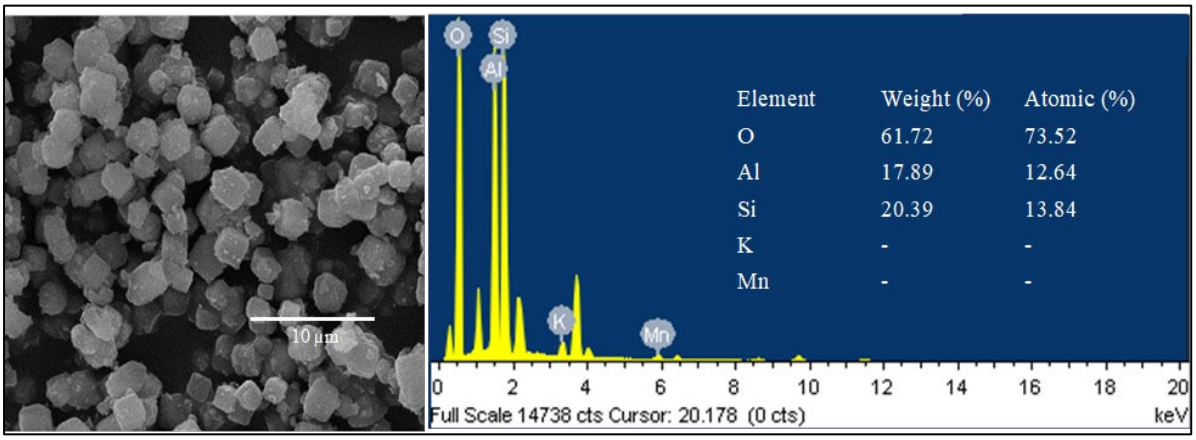
Fig. 3 Loading capacity of $KMnO_4$-loaded zeolite 5A obtained from IWI and VI techniques using the same concentration of $KMnO_4$ (6% w/v), impregnation time (15 min), and temperature (27ºC). The ratios of $KMnO_4$:Z5A were varied between 1:1 and 2:1 (v/w)



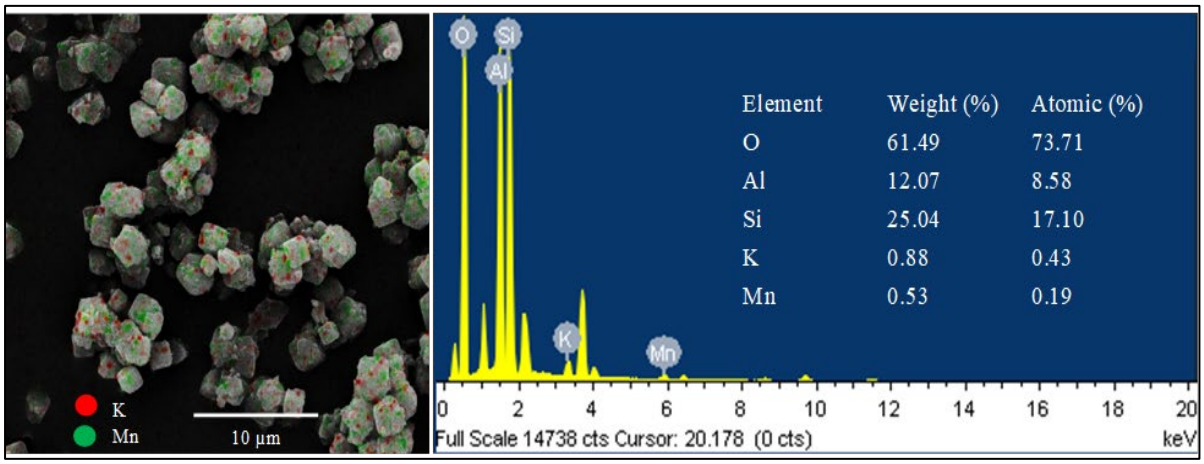
(A) (B) (C)

Fig. 4 SEM images of Z5A particles (A), $KMnO_4$ loaded Z5A particles prepared by IWI (B) and VI (C) techniques

(A)



(B)



(C)

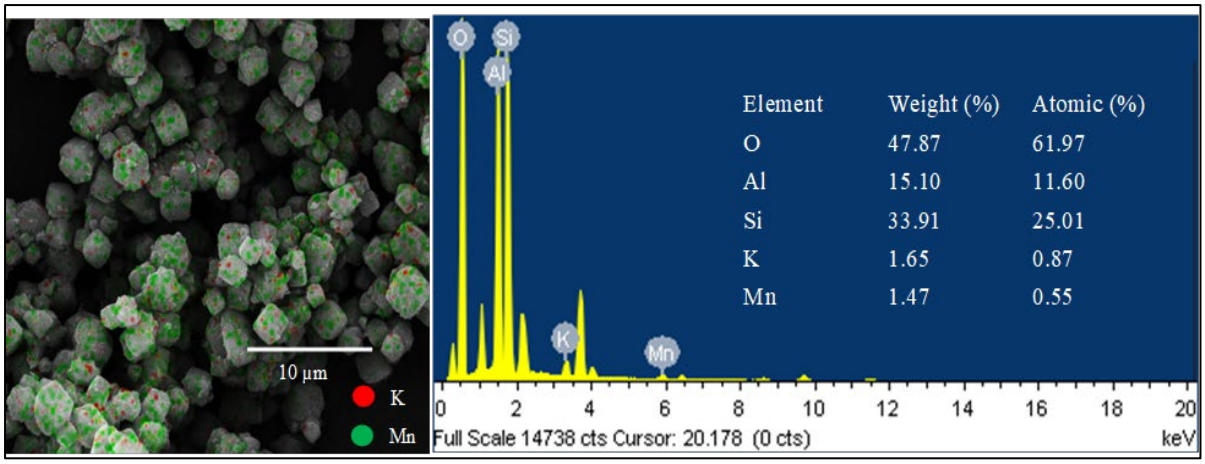


Fig. 5 SEM images with K and Mn elemental mappings (left) and EDS spectra with elemental compositions (right) of Z5A particles (A), $KMnO_4$ loaded Z5A particles prepared by IWI (B) and VI (C) technique

Conclusion

Z5A was successfully loaded with potassium permanganate ($KMnO_4$) via IWI and VI techniques using 6% w/v $KMnO_4$, 1:1 v/w $KMnO_4$:Z5A ratio, and 15 min loading duration at room temperature. LC of $KMnO_4$ obtained from IWI and VI were in the ranges of 1.58–1.75% and 5.04–6.94%, respectively. Moreover, increasing the $KMnO_4$:Z5A ratios led to a reduction of LC in both impregnation techniques. Results obtained from UV-Vis spectrophotometric and SEM-EDS analyses confirmed that VI was more effective technique to load $KMnO_4$ into Z5A due to the vacuum force facilitating the removal of air present inside the Z5A pores and thus allows more $KMnO_4$ molecules to enter the pore channels.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This work is supported in part by (i) Department of Packaging and Materials Technology, (ii) Faculty of Agro-Industry, and (iii) Kasetsart University through the AI scholarship program.

References

Alvarez-Hernandez, M.H., Martinez-Hernandez, G.B., Avaloz-Belmontes, F., Castillo-Campohermoso, M.A., Contreras-Esquivel, J.C., Artes-Hernandez, F. 2019. Potassium permanganate-based ethylene scavengers for fresh horticultural produce as an active packaging. Food Eng. Rev. 11: 159–183.

Daifullah, A.A., Yakout, S.M., Elreefy, S.A. 2007. Adsorption of fluoride in aqueous solutions using $KMnO_4$-modified activated carbon derived from steam pyrolysis of rice straw. J. hazard. Mater. 147: 633–643.

Deraz, N.M. 2018. The comparative jurisprudence of catalysts preparation methods: I. Precipitation and impregnation methods. J. Ind. Environ. Chem. 2: 19–21.

Dirim, S.N., Esin, A., Bayindirli, A. 2001. A new protective polyethylene-based film containing zeolites for the packaging of fruits and vegetables: Film preparation. Turkish Journal of engineering and environmental sciences 27: 1–10.

Gaikwad, K.K., Singh, S., Negi, Y.S. 2019. Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce. Environ. Chem. Lett. 18: 269–284.

Hu, B., Sun, D., Pu, H., Wei, Q. 2019. Recent advances in detecting and regulating ethylene concentrations for shelf-life extension and maturity control of fruit: A review. Trends Food Sci. Technol. 91: 66–82.

Maggi, R., Martens, J.A., Poncelet, G., Grange, P., Jacobs, P.A., Delmon, B. (Eds). 1998. Preparation of Catalysts VII, 1st ed. Elsevier. Louvain-la-Neuve, Belgium.

Saravanan, S., Suchitra, V., Rakesh, K., Julie, B. 2012. Influence of wax coating and indigenous potassium permanganate based ethylene absorbents on shelf life of banana cv. DWARF CAVENDISH. Int. J. Postharvest. Technol. Innov. 3: 129–133.

Spricigo, P.C., Foschini, M.M., Ribeiro, C., Correa, D.S., Ferreira, M.D. 2017. Nanoscaled platforms based on SiO_2 and Al_2O_3 impregnated with potassium permanganate use color changes to indicate ethylene removal. Food Bioproc. Tech. 10: 1622–1630.

Wills, R.B.H., Warton, M.A. 2004. Efficacy of potassium permanganate impregnated into alumina beads to reduce atmospheric ethylene. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 129: 433–438.

Yimmongkol, S., Pratumpong, P., Boonyuen, S., Pechyen, C. 2018. Preparation and evaluation of ethylene absorbers from zeolite A/$KMnO_4$ composite for monitoring of silk banana (Musa sapientum L.) ripening. Chiang Mai J. Sci. 45: 2152–2167.

การศึกษากลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียลเพื่อการออกแบบกลยุทธ์ทางการตลาดผลิตภัณฑ์นม

The study of millennials consumer segmentation for strategic marketing design of milk product

ดิวกาญจน์ กันตะโสพัตร์*, อัจฉรา เกษสุวรรณ

Dewakarn Kuntasophat*, Ajchara Kessuvan

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรม แรงจูงใจ วิถีการดำเนินชีวิต และคุณค่าที่ผู้บริโภคกลุ่มมิลเลนเนียลได้รับจากการบริโภคผลิตภัณฑ์นม เพื่อเป็นแนวทางกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์นมแนวคิดใหม่ตามลักษณะวิถีชีวิต (Lifestyle milk) ดำเนินการวิจัยเชิงสำรวจด้วยแบบสอบถามกับกลุ่มมิลเลนเนียลจำนวน 410 คน จากการวิเคราะห์วิถีการดำเนินชีวิตด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย และการจำแนกกลุ่มด้วยการวิเคราะห์กลุ่ม พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มผู้บริโภคได้เป็น 3 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่รักสุขภาพเลือกผลิตภัณฑ์นมจากคุณค่าโภชนาการมากกว่ารสชาติ 2) กลุ่มที่เลือกผลิตภัณฑ์นมจากรสชาติ และสนใจผลิตภัณฑ์แปลกใหม่ และ 3) กลุ่มที่เลือกผลิตภัณฑ์นมจากความนิยมทางสังคม จากผลวิเคราะห์แบบสอบถามผู้บริโภคกลุ่มที่เลือกผลิตภัณฑ์นมจากรสชาติและสนใจผลิตภัณฑ์แปลกใหม่เป็นกลุ่มที่ยอมรับผลิตภัณฑ์นมแนวคิดใหม่มากที่สุด ผลการวิจัยสามารถนำมาเป็นแนวทางออกแบบกลยุทธ์การตลาดเพื่อส่งเสริมให้กลุ่มเป้าหมายมาบริโภคผลิตภัณฑ์นมแนวคิดใหม่ที่สอดคล้องกับวิถีการดำเนินชีวิตและคุณค่าที่ได้รับ และพัฒนากลยุทธ์การสื่อสารทางการตลาดเพื่อสร้างความสัมพันธ์ต่อผู้บริโภคแต่ละกลุ่ม

คำสำคัญ: กลยุทธ์การตลาด, กลุ่มมิลเลนเนียล, การวิเคราะห์กลุ่ม, คุณค่า, ผลิตภัณฑ์นม

Abstract

The objective of this research was to study consumption behavior, motivation, lifestyle and perceived value of millennials consumer in order to design the marketing strategy for new lifestyle milk product. The questionnaire survey was conducted with 410 millennials consumers. Lifestyle variables were analyzed by factor analysis, and consumer segments were analyzed by cluster analysis. The results revealed that there were 3 segments; 1) Health and nutritional benefit concerned, 2) Flavor and novel product focused and 3) Trend and social influences concerned. Regarding data analysis, the convenience, flavor and novel product focused group indicated the highest acceptance rate for the new lifestyle milk product. The results from this research would become a guideline to design the marketing strategy for encouraging the target consumer to consume the new milk product that aligned with their lifestyles and value perceptions. Finally, the finding results could be used to develop an integrated marketing communication to appropriately induce customer engagement in each segment.

Keywords: cluster analysis, marketing strategy, milk product, millennials, perceived value

คำนำ

นมโคเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพดีและมีแร่ธาตุหลายชนิด อาทิ ไรโบฟลาวิน วิตามินบี 12 ฟอสฟอรัส และแคลเซียม ช่วยในการเจริญเติบโต เสริมสร้างความแข็งแรง (Hanna, 2019) นมโคมีประโยชน์ต่อคนทุกเพศทุกวัย โดยช่วงวัยเด็ก 3–12 ปีมีการบริโภคนมโคคิดเป็นสัดส่วนมากที่สุด ส่วนช่วงวัยอื่นๆ มีการบริโภคนมโคในปริมาณลดลงตามช่วงอายุที่เพิ่มขึ้น (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2562) หน่วยงานภาครัฐมีโครงการรณรงค์ให้คนไทยดื่มนมเพิ่มขึ้น เพื่อให้เป็นประโยชน์ด้านสุขภาพต่อผู้บริโภค และเป็นผลดีต่อเศรษฐกิจภายในประเทศ ปัจจุบันปริมาณการบริโภคนมของคนไทยเฉลี่ย 18 ลิตร/คน/ปี ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ (ข่าวออนไลน์ RYT9, 2562) โดยรัฐบาลตั้งเป้าหมายให้คนไทยบริโภคนม 25 ลิตร/คน/ปี ในปีพ.ศ.2565 สำหรับปริมาณความต้องการบริโภคนมภายในประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยร้อยละ 1.82 ต่อปี โดยในปี 2562 มีปริมาณการบริโภคนม 1,212,750 ตัน เพิ่มขึ้นจาก 1,191,294 ตัน ของปี 2561 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562)

ขณะที่ผู้บริโภคบางส่วนเริ่มมีการบริโภคนมโคลดลง โดยหันไปบริโภคเครื่องดื่มประเภทอื่น อาทิ นมถั่วเหลือง กาแฟ และนมเปรี้ยว (BLT Bangkok, 2562) ผู้บริโภคอีกกลุ่มหนึ่งที่มีมุมมองการบริโภคนมเปลี่ยนไปโดยมีการรับรู้ถึงคุณประโยชน์ของนมสำหรับวัยผู้ใหญ่จึงมีการบริโภคนมมากขึ้น (ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2560) ดังนั้นผลิตภัณฑ์นมโคจึงมีโอกาสขยายตลาดไปยังกลุ่มช่วงอายุอื่น ๆ นอกเหนือจากเด็ก โดยช่วงอายุที่มีโอกาสเพิ่มการบริโภคคือ มิลเลนเนียล ซึ่งเป็นกลุ่มคนที่เกิดช่วง พ.ศ. 2524–2539 ลักษณะของคนกลุ่มนี้มีความคล่องตัวด้านเทคโนโลยี ชอบมีสังคม ตัดสินใจบนข้อมูล มีความรู้ทางการเงิน เป็นกลุ่ม First jobber ที่มีรายได้เป็นของตนเอง มีอัตราการใช้จ่ายสูง และจะเป็นผู้บริโภคกลุ่มใหญ่ที่สำคัญในอนาคต (สุทธาภา และคณะ, 2557) นอกจากนี้กลุ่มมิลเลนเนียลเป็นผู้บริโภคที่ยอมรับและสามารถเข้าถึงผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ง่าย เนื่องจากเป็นช่วงวัยที่ใช้อินเตอร์เน็ตตลอดเวลา มีการหาข้อมูลเพื่อตัดสินใจซื้อสินค้าที่ดีและคุ้มค่าที่สุด มักเปิดเผยความคิดเห็นทำให้มีอิทธิพลต่ออุตสาหกรรมค้าปลีก ด้วยเหตุนี้กลุ่มมิลเลนเนียลจึงมีความสำคัญในทางการตลาด ยังมีความยินดีจ่ายให้กับการได้รับประสบการณ์แปลกใหม่ ออกกำลังกาย ดูแลตัวเองมากขึ้น และใส่ใจเลือกบริโภคอาหารที่ดีต่อสุขภาพ (Creative talk team, 2562) แต่ขณะเดียวกันผู้บริโภคมิลเลนเนียลยังนิยมดื่มเครื่องดื่มซึ่งมีปริมาณน้ำตาลสูงเพื่อความสดชื่นและความตื่นตัว (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2561) เนื่องจากการดำรงชีวิตที่เร่งรีบและมีความเครียดสูงในสังคมเมือง จึงมีความต้องการผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่ให้ทั้งความสดชื่น มีคุณประโยชน์และสะดวกในการบริโภค ผลิตภัณฑ์นมโคจึงเป็นเครื่องดื่มทางเลือกที่สามารถตอบสนองรูปแบบการดำเนินชีวิตของกลุ่มมิลเลนเนียลได้ ดังนั้น หากมีการศึกษาความต้องการด้านคุณค่าที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญและเข้าใจวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคมิลเลนเนียล เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์นมแนวคิดใหม่ที่ตอบสนองวิถีชีวิตของผู้บริโภคมิลเลนเนียล ก็จะเป็นประโยชน์ในการขยายตลาดเพื่อเพิ่มปริมาณการบริโภคผลิตภัณฑ์นมโค

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกกลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียลจากพฤติกรรมการบริโภคผลิตภัณฑ์นมโค คุณค่าที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญ แรงจูงใจ และวิถีการดำเนินชีวิต เพื่อเป็นแนวทางให้ธุรกิจผลิตภัณฑ์นมโคออกแบบและพัฒนากลยุทธ์การตลาดเพื่อส่งเสริมให้กลุ่มเป้าหมายมาบริโภคผลิตภัณฑ์นมแนวคิดใหม่ที่สอดคล้องกับวิถีการดำเนินชีวิตและคุณค่าที่ได้รับ ซึ่งมีโอกาสที่จะช่วยส่งเสริมการตลาดผลิตภัณฑ์นมโคสำหรับกลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียลให้เติบโตมากขึ้น และสนองตอบต่อนโยบายสนับสนุนการบริโภคนมโคของรัฐบาล

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการสำรวจโดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูล พัฒนาแบบสอบถามจากทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับพฤติกรรมผู้บริโภค (6W1H) คุณค่าที่ผู้บริโภคได้รับ (Perceived value) แรงจูงใจในการบริโภค (Motivation) และรูปแบบการดำเนินชีวิต (Lifestyle) ซึ่งแบบสอบถามมีทั้งหมด 7 ส่วน ได้แก่ พฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่ม คุณค่าที่ได้รับจากการบริโภคผลิตภัณฑ์นม แรงจูงใจในการเลือกดื่มผลิตภัณฑ์นม รูปแบบการดำเนินชีวิต การเข้าถึงสื่อ การยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่ และข้อมูลทางประชากรศาสตร์ของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยผลิตภัณฑ์นมในงานวิจัยนี้หมายถึงนมโคประเภทนมสด พาสเจอร์ไรส์ สเตอริไลซ์ ยูเอชที เมื่อรวบรวมข้อมูลแล้วจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติคือ IBM SPSS Statistics Version 25 และ Microsoft Excel Office 365 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

กลุ่มตัวอย่างและวิธีการเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้สุ่มตัวอย่างแบบไม่ใช้ความน่าจะเป็นด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างตามวิจารณญาณ (Judgment or purposive sampling) โดยการใช้แบบสอบถามในการสัมภาษณ์ผู้บริโภคแบบตัวต่อตัว (Face to Face Interview) ประชากรคือผู้บริโภคผลิตภัณฑ์นมที่อยู่ในกลุ่มมิลเลนเนียล (Millennials) หรือเป็นกลุ่มคนที่เกิดช่วง พ.ศ. 2524–2539 อาศัยอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล มีประสบการณ์บริโภคนมโค โดยกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีของ Churchill and Iacobucci (2002) ซึ่งกำหนดระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 จะได้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างขั้นต่ำจากการคำนวณคือ 342 คน ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 430 คน และตัดข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ออก 20 คน ดังนั้นข้อมูลจากแบบสอบถามที่สมบูรณ์และนำไปวิเคราะห์ผลทั้งหมดเท่ากับ 410 คน

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ดำเนินการทดสอบแบบสอบถาม (Pre-test) ก่อนการใช้งานจริงกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน เพื่อทดสอบความเชื่อถือได้ (Reliability) และทำการแก้ไขปรับปรุงแบบสอบถาม โดยคำนวนค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบัค (Cronbach's alpha coefficient) ของแบบสอบถามส่วนที่เป็นคำตอบแบบสเกล 5 ระดับ (5-point likert scale) คือ ส่วนคุณค่าที่ได้รับจากการบริโภคผลิตภัณฑ์นม ส่วนแรงจูงใจในการเลือกดื่มผลิตภัณฑ์นม และส่วนวิถีการดำเนินชีวิต ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต้องมีค่า 0.7 ขึ้นไปจึงจะถือว่าแบบสอบถามมีความเชื่อถือได้ (Malhotra, 2006)

2. วิเคราะห์ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ พฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่ม การเข้าถึงสื่อ การยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งเป็นการสอบถามความเห็นเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่เข้าสู่ตลาดด้วยแนวคิด นมแนวคิดใหม่ตามลักษณะวิถีชีวิต (Lifestyle milk) หมายถึงนมที่เข้ากับวิถีชีวิตของผู้บริโภค ออกแบบมาจากความต้องการด้านคุณค่า มีคุณลักษณะตรงกับที่ผู้บริโภคต้องการ ด้วยสถิติเชิงพรรณนาในรูปแบบ ความถี่ และร้อยละ

3. วิเคราะห์ข้อมูลคุณค่าที่ได้รับจากการบริโภคผลิตภัณฑ์นม แรงจูงใจในการเลือกดื่มผลิตภัณฑ์นม และรูปแบบการดำเนินชีวิตที่เป็นคำตอบสเกล 5 ระดับ (5-point likert scale) ด้วยสถิติเชิงพรรณนาในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4. จัดกลุ่มตัวแปรวิถีการดำเนินชีวิตที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในปัจจัยเดียวกัน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis)

5. จำแนกกลุ่มผู้บริโภคด้วยปัจจัยกลุ่มวิถีการดำเนินชีวิต คุณค่าที่ได้รับ แรงจูงใจในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์นม และพฤติกรรมการบริโภค โดยใช้วิธีการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster analysis) (กัลยา และฐิตา, 2563)

6. นำข้อมูลจากการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคมาพัฒนาแนวทางกลยุทธ์ทางการตลาดของผลิตภัณฑ์นมแนวคิดใหม่ต่อกลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียล

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางประชากรศาสตร์และพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มและผลิตภัณฑ์นม

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ของกลุ่มตัวอย่าง ผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 410 คน พบว่าส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 72.7) สถานะโสด (ร้อยละ 90.2) มีการศึกษาระดับปริญญาตรีหรือเทียบเท่า ประกอบอาชีพพนักงานบริษัทเอกชน (ร้อยละ 63.4) มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน 15,001–25,000 บาท (ร้อยละ 71.7) และมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องดื่มเฉลี่ยต่อสัปดาห์ 50–200 บาท (ร้อยละ 37.8)

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มและผลิตภัณฑ์นมโดยรวมพบว่า ผู้บริโภคเลือกบริโภคกาแฟและชามากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งคิดเป็นร้อยละ 45.9 นมและผลิตภัณฑ์นมเป็นอันดับ 2 คิดเป็นร้อยละ 22.4 ผลิตภัณฑ์นมประเภทพาสเจอร์ไรส์ สเตอริไลซ์ ยูเอชทีเป็นประเภทที่ผู้บริโภคนิยมมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 49.8 โดยซื้อจากร้านสะดวกซื้อด้วยความถี่สัปดาห์ละ 2–3 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 38.8 และบุคคลในครอบครัวมีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 38.5

ผลการวิเคราะห์คุณค่าที่ได้รับและแรงจูงใจในการบริโภค

จากการวิเคราะห์คุณค่าที่ผู้บริโภคได้รับจากการบริโภคผลิตภัณฑ์นม โดยคุณค่าที่ได้รับเป็นคำถามที่เป็นคำตอบแบบสเกล 5 ระดับ (5-point likert scale) ประกอบด้วย คุณค่าเชิงอรรถประโยชน์จำนวน 4 ข้อ คุณค่าเชิงอารมณ์จำนวน 5 ข้อ คุณค่าเชิงสัญลักษณ์จำนวน 4 ข้อ และคุณค่าเชิงต้นทุน จำนวน 5 ข้อ พบว่า เมื่อพิจารณาจากระดับคะแนนเฉลี่ย (Mean score) คุณค่าที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญ 3 อันดับแรกได้แก่ ผลิตภัณฑ์นมให้ประโยชน์คุณค่าทางโภชนาการสูง ดีต่อสุขภาพ (คะแนนเฉลี่ย 4.33) ผลิตภัณฑ์นมบริโภคได้สะดวก ไม่ต้องผ่านการปรุงหรือการเตรียมที่ยุ่งยาก (คะแนนเฉลี่ย 4.20) ดื่มผลิตภัณฑ์นมแล้วรู้สึกได้รับประโยชน์มากกว่าเครื่องดื่มอื่น (คะแนนเฉลี่ย 4.01) สำหรับผลการวิเคราะห์ข้อมูลแรงจูงใจที่จะทำให้บริโภคผลิตภัณฑ์นมของผู้บริโภค พบว่าแรงจูงใจที่สำคัญที่สุดคือ การบริโภคผลิตภัณฑ์นมเนื่องจากรสชาติ (คะแนนเฉลี่ย 4.09) การบริโภคผลิตภัณฑ์นมเนื่องจากทราบคุณประโยชน์ของนมโค (คะแนนเฉลี่ย 4.00) และจะรับประทานผลิตภัณฑ์นมที่ได้จากโคนมที่ไม่ใช้ฮอร์โมนและยาเลี้ยง (คะแนนเฉลี่ย 3.83) ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์วิถีการดำเนินชีวิตด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis)

ผลการวิเคราะห์วิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคจากคำถาม 14 ข้อโดยวิธีการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) ซึ่งดำเนินการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้ Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) พบว่า KMO มีค่า 0.817 ซึ่งมากกว่า 0.5 นั่นคือข้อมูลเหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัย จึงดำเนินการสกัดปัจจัย (Extraction) ด้วยวิธีการ Principal Component Analysis และหมุนแกน (Rotation) ด้วยวิธีการ Varimax สามารถจัดกลุ่มตัวแปรวิถีการดำเนินชีวิตทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ประกอบด้วยตัวแปร 6 ตัวแปร ได้แก่ วิถีการดำเนินชีวิตแบบเลือกทานอาหารที่ดีต่อสุขภาพ ใส่ใจสุขภาพของตัวเองและครอบครัว ให้ความสำคัญกับคุณภาพมากกว่าราคา อ่านฉลากก่อนซื้อสินค้า สนใจแหล่งที่มาของผลิตภัณฑ์ที่บริโภค ออกกำลังกายเป็นประจำ ดังนั้น จึงกำหนดให้ปัจจัยนี้มีชื่อว่า “วิถีการดำเนินชีวิตแบบใส่ใจสุขภาพ”

ปัจจัยที่ 2 ประกอบด้วยตัวแปร 5 ตัวแปร ได้แก่ วิถีการดำเนินชีวิตแบบชอบพบปะสังสรรค์กับเพื่อน ชอบท่องเที่ยว เล่นอินเตอร์เน็ตเป็นประจำ ชอบความรวดเร็ว สะดวกสบาย และชอบอ่านรีวิวสินค้าก่อนตัดสินใจเลือกซื้อ จึงกำหนดให้ปัจจัยนี้มีชื่อว่า “วิถีการดำเนินชีวิตแบบชอบเข้าสังคม ชอบความสะดวกสบาย”

ปัจจัยที่ 3 ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ วิถีการดำเนินชีวิตแบบสั่งซื้ออาหารผ่านช่องทางออนไลน์ ใช้จ่ายผ่านบัตรเครดิต และ mobile banking และชอบลองเมนูอาหารหรือร้านอาหารใหม่ๆ จึงกำหนดให้ปัจจัยนี้มีชื่อว่า “วิถีการดำเนินชีวิตแบบชอบความแปลกใหม่หรือวิถีใหม่”

ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มผู้บริโภคด้วยการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster analysis)

ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มผู้บริโภคผลิตภัณฑ์นมกลุ่มมิลเลนเนียลด้วยวิธีการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster analysis) พบว่า กลุ่มผู้บริโภคกลุ่มที่ 1 มีจำนวน 123 คน ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่มีวิถีการดำเนินชีวิตแบบใส่ใจสุขภาพ คำนึงถึงสุขภาพ มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องดื่มเฉลี่ยต่อสัปดาห์น้อยที่สุด 50–200 บาท มีการเลือกบริโภคกาแฟ และชาเป็นอันดับแรกร้อยละ 35.0 นมและผลิตภัณฑ์นมเป็นอันดับสองร้อยละ 26.0 โดยให้ความสำคัญกับคุณค่าในระดับมากเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์นมให้ประโยชน์คุณค่าทางโภชนาการสูง ดีต่อสุขภาพ ดื่มผลิตภัณฑ์นมแล้วรู้สึกได้รับประโยชน์มากกว่าเครื่องดื่มอื่น ราคาเหมาะสมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์นม ผลิตภัณฑ์นมให้คุณค่ามากกว่าเครื่องดื่มอื่นที่ราคาใกล้เคียงกัน การบริโภคสะดวกรวดเร็วไม่เสียเวลาทาน และมีแรงจูงใจด้านการทราบคุณประโยชน์จากนมโคมากกว่าด้านรสชาติมากที่สุด โดยมีโอกาสในการยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่ร้อยละ 71.5 ดังนั้นกลุ่มผู้บริโภคนี้คือ กลุ่มที่รักสุขภาพเลือกผลิตภัณฑ์นมจากคุณค่าโภชนาการมากกว่ารสชาติ (Healthy style)

กลุ่มผู้บริโภคกลุ่มที่ 2 มีจำนวน 147 คน ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่มีวิถีการดำเนินชีวิตแบบชอบความแปลกใหม่หรือวิถีใหม่ ส่วนมากมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องดื่มเฉลี่ยต่อสัปดาห์มากที่สุด คือ 201–350 บาท และ 501 บาทขึ้นไป มีการเลือกบริโภคกาแฟ และชาเป็นอันดับแรกร้อยละ 61.2 นมและผลิตภัณฑ์นมเป็นอันดับสองเช่นเดียวกับผู้บริโภคกลุ่มแรก แต่ให้ความสำคัญกับคุณค่าในระดับมากเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์นมให้ประโยชน์คุณค่าทางโภชนาการสูง ดีต่อสุขภาพ ดื่มผลิตภัณฑ์นมแล้วรู้สึกได้รับประโยชน์มากกว่าเครื่องดื่มอื่น ราคาเหมาะสมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์นม ผลิตภัณฑ์นมให้คุณค่ามากกว่าเครื่องดื่มอื่นที่ราคาใกล้เคียงกัน การบริโภคสะดวกรวดเร็วไม่เสียเวลาทาน และมีแรงจูงใจในการบริโภคนมด้านรสชาติมากที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น โดยมีโอกาสใน

การยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่ร้อยละ 75.5 ดังนั้นกลุ่มผู้บริโภคนี้คือ กลุ่มที่เลือกผลิตภัณฑ์นมจากรสชาติ และสนใจผลิตภัณฑ์แปลกใหม่ (Novelty style)

กลุ่มผู้บริโภคกลุ่มที่ 3 มีจำนวน 140 คน เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่มีวิถีการดำเนินชีวิตแบบชอบเข้าสังคม ชอบความสะดวกสบาย ให้ความสนใจกับกลุ่มบุคคลในสังคม เครื่องดื่มที่เลือกบริโภคในชีวิตประจำวันอันดับแรกคือ กาแฟ และชาร้อยละ 39.3 อันดับสองคือ โกโก้ และช็อคโกแลต มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องดื่มเฉลี่ยต่อสัปดาห์ 20–350 บาท ให้ความสำคัญกับคุณค่าในระดับมากเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์นมให้ประโยชน์คุณค่าทางโภชนาการสูง ดีต่อสุขภาพ ดื่มผลิตภัณฑ์นมแล้วรู้สึกได้รับประโยชน์มากกว่าเครื่องดื่มอื่น ราคาเหมาะสมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์นม ผลิตภัณฑ์นมให้คุณค่ามากกว่าเครื่องดื่มอื่นที่ราคาใกล้เคียงกัน การบริโภคสะดวกรวดเร็วไม่เสียเวลาทานในระดับปานกลางซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผู้บริโภคกลุ่มอื่น และมีแรงจูงใจในการบริโภคนมด้านรสชาติและการทราบคุณประโยชน์จากนมโคระดับปานกลาง มีโอกาสในการยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่ร้อยละ 65.0 ซึ่งเป็นกลุ่มที่จะยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่น้อยที่สุด ดังนั้น กลุ่มผู้บริโภคนี้คือ กลุ่มเลือกผลิตภัณฑ์นมจากความนิยมทางสังคม (Trendy style)

การพัฒนาแนวทางของกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์นม

สำหรับการพัฒนาแนวทางของกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์นมนั้น จะใช้ผลการวิเคราะห์กลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียลเป็นพื้นฐานในการพัฒนา โดยเป็นการออกแบบแนวทางของกลยุทธ์ทางการตลาดที่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่มเป้าหมาย (Differentiated Strategy) ให้เหมาะสมกับแต่ละส่วนตลาด (Segment) ดังนี้

ผู้บริโภคกลุ่มที่ 1 ออกแบบผลิตภัณฑ์เน้นเกี่ยวกับสุขภาพเพิ่มวิตามินหรือสารอาหารในผลิตภัณฑ์นมโดย การสื่อสารทางการตลาดควรแสดงให้เห็นคุณประโยชน์ของผลิตภัณฑ์นม หรือเป็นการให้ความรู้กับผู้บริโภคผ่านช่องทางออนไลน์ เช่น สื่อสังคมออนไลน์ และใช้สื่อออฟไลน์ เช่น ป้ายโปสเตอร์หรือโฆษณาทางวิทยุ ที่ผู้บริโภคกลุ่มนี้เข้าถึงได้ง่ายตามลักษณะวิถีชีวิต เช่น ร้านสะดวกซื้อ ร้านค้าเพื่อสุขภาพเพื่อแนะนำผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่รู้จัก

ผู้บริโภคกลุ่มที่ 2 ออกแบบผลิตภัณฑ์นมรสชาติใหม่หรือคุณภาพพรีเมี่ยมที่มีบรรจุภัณฑ์ดีต่อสิ่งแวดล้อม ใช้การสื่อสารทางการตลาดออนไลน์ที่เน้นเรื่องรสชาติแปลกใหม่ โฆษณาผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อแนะนำให้ผู้บริโภครู้จัก รวมถึงสร้างกระแสการใช้บรรจุภัณฑ์ที่ดีต่อสิ่งแวดล้อม จัดจำหน่ายและใช้บริการชำระเงินผ่านช่องทางออนไลน์สอดคล้องกับวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคกลุ่มนี้ เช่น เวปไซต์ หรือ E-marketplace

ผู้บริโภคกลุ่มที่ 3 ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัตถุดิบตามกระแสนิยม ออกแบบบรรจุภัณฑ์สร้างสรรค์ จำหน่ายสินค้าจำนวนจำกัดเพื่อเพิ่มความน่าสนใจและเป็นที่ต้องการ การสื่อสารทางการตลาดควรใช้ Influencer เพื่อโฆษณา แนะนำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความนิยมและเป็นที่รู้จักในตลาดผ่านช่องทางสื่อสังคมออนไลน์ต่างๆ เกิดการบอกต่อสินค้า เช่น เฟสบุ๊ก ทวิตเตอร์ เพื่อให้สอดคล้องกับวิถีการดำเนินชีวิต เช่น การอ่านรีวิวสินค้า ผลสรุปดังแสดงใน Table 1

นอกเหนือจากงานวิจัยนี้แล้วเพื่อประโยชน์ต่อการศึกษาถัดไปผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะว่าควรมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จริงเพื่อทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภคเพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้สมบูรณ์ที่สุด และควรทดสอบแนวคิดผลิตภัณฑ์และการสร้างเนื้อหาในการสื่อสาร (Content) ทางช่องทางออนไลน์ (A/B testing) เพื่อศึกษาผลลัพธ์ของกลยุทธ์การตลาดที่ออกแบบได้ และเพื่อหาวิธีสื่อสารทางการตลาดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

Table 1 Summary of differentiated strategy for each segment

Descriptions	Segment 1	Segment 2	Segment 3
Segment name	Healthy style	Novelty style	Trendy style
Lifestyle	Health- concerned Lifestyle	Innovative and New normal Lifestyle	Socialized and convenient Lifestyle
Objective	Educate and create awareness	Educate and create awareness	Create awareness and interest
Channel and Communication	Using offline channel (printed matter and radio) to promote product at convenience store and health-shop. Using online channel (Facebook and other social media) to educate consumer about nutritional value.	Using online channel to create eco-friendly trend. Using storytelling to promote about premium quality milk. Using E-marketplace (Shopee Lazada) for online selling. Creating CSR program related to story.	Using Influencer and micro influencer to promote product. Using social media (Facebook and other social media) to make viral internet content about trendy product. Creating social activity-related marketing campaign.
Product concept	Vitamin or nutrient added milk	New flavor milk or premium milk with eco-friendly packaging	New flavor milk with trendy ingredient (signature flavor) Creative packaging designs
Product example	 (A)	 (B)	 (C)

Fig.1 Vitamin added milk (A), Eco-friendly milk packaging (B), Design milk packaging Collection (C)

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียลอาศัยอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล จำนวน 410 คน ดำเนินการวิเคราะห์วิถีชีวิตของผู้บริโภคด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) จากนั้นวิเคราะห์การจัดกลุ่มผู้บริโภคผลิตภัณฑ์นมกลุ่มมิลเลนเนียลด้วยวิธีการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster Analysis) จากปัจจัยกลุ่มวิถีการดำเนินชีวิต คุณค่าที่ได้รับ แรงจูงใจในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์นม และพฤติกรรมการบริโภค สามารถจำแนก

กลุ่มผู้บริโภคมิลเลนเนียลได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่รักสุขภาพเลือกผลิตภัณฑ์นมจากคุณค่าโภชนาการมากกว่ารสชาติ (Healthy style) กลุ่มที่เลือกผลิตภัณฑ์นมจากรสชาติ และสนใจผลิตภัณฑ์แปลกใหม่ (Novelty style) และกลุ่มที่เลือกผลิตภัณฑ์นมจากความนิยมทางสังคม (Trendy style) และนำข้อมูลไปเป็นแนวทางออกแบบกลยุทธ์การตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์นมแนวคิดใหม่ตามลักษณะวิถีชีวิต (Lifestyle milk) โดยกลุ่ม Healthy style จะออกแบบแนวคิดผลิตภัณฑ์นมที่เน้นด้านคุณค่าเชิงอรรถประโยชน์หรือโภชนาการ เพิ่มวิตามินหรือสารอาหาร และใช้สื่อออนไลน์เพื่อให้ความรู้ สร้างการตระหนักเกี่ยวกับคุณค่าเชิงอรรถประโยชน์ สำหรับกลุ่ม Novelty style จะเป็นกลุ่มที่เลือกผลิตภัณฑ์นมจากรสชาติ และสนใจผลิตภัณฑ์แปลกใหม่จะออกแบบแนวคิดผลิตภัณฑ์นมเน้นเรื่องรสชาติแปลกใหม่หรือเน้นคุณภาพผลิตภัณฑ์ใช้บรรจุภัณฑ์ที่ดีต่อสิ่งแวดล้อม สร้างกระแสรักสิ่งแวดล้อมและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ผ่านช่องทางออนไลน์ สำหรับกลุ่ม Trendy style เน้นออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัตถุดิบตามกระแสนิยม ออกแบบบรรจุภัณฑ์สร้างสรรค์จำกัดจำนวนการจำหน่าย ใช้ Influencer สร้างกระแสความนิยมและความต้องการในตลาด ผลการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางของธุรกิจผลิตภัณฑ์นมเพื่อไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และออกแบบกลยุทธ์การตลาดที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค เพื่อผลักดันให้ผู้บริโภคกลุ่มมิลเลนเนียลหันมาบริโภคผลิตภัณฑ์นมมากขึ้น สามารถขยายตลาด และมีส่วนสนับสนุนนโยบายส่งเสริมให้คนไทยบริโภคผลิตภัณฑ์นมของรัฐบาล

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านสำหรับการเสียสละเวลาและให้ข้อมูลเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา, ฐิตา วานิชย์บัญชา. 2563. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล, พิมพ์ครั้งที่ 32. โรงพิมพ์สามลดา, กรุงเทพฯ.

ข่าวออนไลน์ RYT9. 2562. 10 องค์กรใหญ่จับมือก่อตั้ง “เครือข่าย-นมดีทุกวัย ดื่มได้ทุกวัน” เป็นครั้งแรก. https://www.ryt9.com/s/prg/2998049, 11 ธันวาคม 2563.

ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2560. ตลาดผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่มในประเทศไทย. http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewDomesticDetail.php?id=140, 5 มกราคม 2564.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 2561. เตือนเครื่องดื่มริมทางปริมาณน้ำตาลสูง. https://www.thaihealth.or.th/Content/46058-เตือนเครื่องดื่มริมทางปริมาณน้ำตาลสูง.html, 10 ธันวาคม 2563.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 2562. ดื่มนมตามช่วงวัยสำคัญไฉน. https://www.thaihealth.or.th/Content/49047-ดื่มนมตามช่วงวัยสำคัญไฉน.html.com, 10 ธันวาคม 2563.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2562. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2563. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กรุงเทพฯ.

สุทธาภา อมรวิวัฒน์, ธีรินทร์ รัตนภิญโญวงศ์, ทับขวัญ หอมจำปา, นิตนารา มินทะขิน, ศรีนรินทร์ เผ่าพงษ์ไพบูลย์, ณัฐชยา อารักษ์วิชานันท์. 2557. Insight กลยุทธ์มัดใจผู้บริโภค Gen Y. ธนาคารไทยพาณิชย์ จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

BLT bangkok. 2562. คนไทยดื่มนม 18 ลิตร/ปี ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยโลก. https://www.bltbangkok.com/news/4945/, 10 ธันวาคม 2563.

Churchill, G.A., D. lacobucci. 2002. Marketing Research Methodological Foundations. Harcourt, California.

Creative Talk Team. 2562. Generation Trend 2020 สรุปทุก Insight เข้าใจผู้บริโภคแต่ละ Gen. https://creativetalklive.com/insight-generations-trend-2020/, 11 ธันวาคม 2563.

Hanna, G.W., Krystyna, R., Waclaw, L., Maksymilian, C. 2019. Milk and dairy products and their nutritional contribution to the average polish diet. Nutrients 11: 1771.

Malhotra, N.K. 2006. Basic Marketing Research: A Decision-making Approach, 2nd ed. Pearson/Prentice Hall, New Jersey, USA.

การแบ่งกลุ่มพลังหญิงเพื่อการออกแบบการตลาดประสบการณ์การซื้ออาหารผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซ

Direct marketing strategic design towards She-Economy for foods purchasing through social commerce

ศุภิสรา เอี่ยมเอิบ*, อัจฉรา เกษสุวรรณ

Supisara Iamoeb*, Ajchara Kessuvan

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: supisara.iam@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกกลุ่มผู้บริโภคพลังหญิง (She-Economy) ในเขตกรุงเทพมหานครที่มีประสบการณ์ซื้อผลิตภัณฑ์อาหารผ่านช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ ได้แก่ เฟซบุ๊ก อินสตาแกรม ไลน์ โดยศึกษาเฉพาะผู้บริโภคเพศหญิงในด้านพฤติกรรม วิถีชีวิต คุณค่าที่ให้ความสำคัญ และทัศนคติบนพื้นฐานทฤษฎีการยอมรับและการใช้เทคโนโลยี (UTAUT) และหาตัวแทนกลุ่มเป้าหมายเพื่อออกแบบกลยุทธ์การตลาดทางตรงสำหรับธุรกิจอาหารบนช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มพบว่าผู้บริโภคมีวิถีชีวิตแบบใส่ใจสุขภาพ ตามกระแสและสนใจเทคโนโลยีสมัยใหม่ เมื่อจำแนกกลุ่มแต่ละช่วงวัยพบว่าแต่ละกลุ่มจะแตกต่างกันด้านประเภทของอาหาร ค่าใช้จ่าย สื่อสังคมออนไลน์ที่ใช้ คุณค่าและทัศนคติ โดยเบบี้บูมเมอร์และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์ให้ความสำคัญคุณค่าด้านสังคม และไม่กังวลเกี่ยวกับค่าขนส่งสินค้ามากเท่าเจเนอเรชั่นอื่น ขณะที่เจเนอเรชั่นวายให้ความสำคัญคุณค่าแบบมีเงื่อนไข ส่วนเจเนอเรชั่นซีให้ความสำคัญด้านอรรถประโยชน์และอารมณ์ ดังนั้น ผลการวิจัยจะสามารถนำมาเป็นแนวทางการดำเนินธุรกิจอาหาร สามารถออกแบบผังการเดินทางของผู้บริโภค สร้างประสบการณ์และการสื่อสารทางการตลาดต่อผู้บริโภคที่แตกต่างกันแต่ละกลุ่ม

คำสำคัญ: กลยุทธ์การสื่อสารทางการตลาด, กลุ่มพลังหญิง, การตลาดทางตรง, โซเชียลคอมเมิร์ซ

Abstract

The objective of this research was to segment the She-Economy consumers in Bangkok metropolitan who experienced food product purchasing from social commerce including Facebook, Instagram and Line. The demographic, behavior, lifestyle, value proposition and attitude toward food purchasing based on UTAUT theory were investigated in order to design the direct marketing strategy for food business on social commerce. Lifestyle variables were analyzed by factor analysis and found health concerned, trendy and technology savvy of consumer lifestyles. Based on segmentation by generation, it was found that each generation was different on the types of food product purchasing, expenses, favored social media and value perception. Baby boomer and generation X focused on social value and concerned for delivery cost relatively less than others. Generation Y gave an attention to conditional value such as buying seasonal product, while generation Z focused on functional and emotional value. The results would become a guideline for food business on social commerce to design the customer journey and touch points to create an engagement. Finally, the communication strategy through social media for each consumer segment could be specified.

Keywords: Communication strategy, direct marketing, She-Economy, social commerce

คำนำ

ปัจจุบันนี้มีการใช้งานอินเทอร์เน็ตกันอย่างแพร่หลาย ดังจะเห็นได้จากสถิติผู้ใช้อินเทอร์เน็ตของประเทศไทย ที่เพิ่มขึ้นจากปี 2552 ที่ผู้ใช้อินเทอร์เน็ตประมาณ 18.3 ล้านคน เป็นจำนวน 47.5 ล้านคนในปี 2562 คิดเป็นร้อยละ 150 ผลสำรวจในปี 2562 พบว่าคนไทยผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตใช้เวลาในการเล่นสื่อสังคมออนไลน์ เช่น เฟซบุ๊ก อินสตาแกรม ไลน์ ทวิตเตอร์ มากเป็นอันดับ 1 (กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม, 2563) และเป็นผลให้เกิดช่องทางการซื้อสินค้าที่เรียกว่าช่องทางออนไลน์ (Online) โดยยอดการใช้จ่ายออนไลน์ของคนไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี เนื่องจากผู้บริโภคได้รับความสะดวกสบายในการซื้อสินค้าและบริการ ไม่จำเป็นต้องเดินทางไปร้านค้า สามารถซื้อสินค้าและบริการได้ทุกเวลา ความรวดเร็วในการจัดส่งสินค้าและบริการ สินค้าและบริการบางประเภทมีจำหน่ายเฉพาะช่องทางออนไลน์เท่านั้น และสามารถประหยัดเงินจากการสามารถเปรียบเทียบราคาสินค้าและบริการได้อย่างรวดเร็ว หมวดหมู่ของสินค้าและบริการที่ได้รับความนิยมในการซื้อผ่านช่องทางออนไลน์ ได้แก่ เสื้อผ้า อาหาร เป็นต้น (บีแอลที, 2562) ปัจจุบันช่องทางการซื้อสินค้าออนไลน์ที่เป็นที่นิยม ได้แก่ โซเชียลคอมเมิร์ซ คือการจำหน่ายสินค้าผ่านทางสื่อสังคมออนไลน์ อาทิ เฟซบุ๊ก ไลน์และทวิตเตอร์ เป็นต้น เป็นสื่อสังคมออนไลน์ขนาดใหญ่สามารถเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายได้ในวงกว้าง การซื้อขายสินค้าในโซเชียลคอมเมิร์ซนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของการตลาดทางตรงที่ ประเทศไทยมีตลาดโซเชียลคอมเมิร์ซขนาดใหญ่ จำนวนธุรกิจซื้อขายผ่านเครือข่ายสังคมออนไลน์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยผู้บริโภคกับผู้บริโภคในการติดต่อระหว่างกัน เพื่อโฆษณา สร้างข่าวสาร และฟังความคิดเห็นผู้อื่นในการตัดสินใจเลือกซื้อสินค้าและบริการ การตลาดทางตรงผ่านเครือข่ายสังคมออนไลน์จึงเป็นปรากฏการณ์ใหม่ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและแพร่หลาย (พัชมณฑ์ และชัยวัฒน์, 2562)

ขณะที่ Laurel (2014) ได้ศึกษาพฤติกรรมการใช้จ่ายซื้อสินค้าและบริการของผู้หญิง พบว่าผู้หญิงเอเชียร้อยละ 43 มีตำแหน่งหน้าที่การงานอยู่ในระดับผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญในด้านวิชาชีพหมายความว่าอำนาจในการซื้อสินค้าและบริการของผู้หญิงจะเพิ่มมากขึ้นเป็นการขับเคลื่อนเศรษฐกิจด้วยพลังหญิง (SHE-Economy) โดยสินค้าที่เป็นสินค้าอุปโภค บริโภค ผู้หญิงจะเป็นผู้ตัดสินใจในการซื้อสินค้า และมีแนวโน้มในการซื้อสินค้าออนไลน์มากขึ้น หากเทียบกับผู้ชาย ผู้หญิงซื้อสินค้าและบริการทางออนไลน์มากกว่าถึงร้อยละ 67 สำหรับเหตุผลในการซื้อสินค้าและการบริการผ่านทางออนไลน์ ได้แก่ จะได้สินค้าในราคาที่ถูกกว่าการซื้อผ่านทางออฟไลน์ ประหยัดเวลาในการซื้อสินค้า มีสินค้าและบริการจำนวนมากให้เลือกจากหลายร้านค้า และสามารถซื้อสินค้าและการบริการจากต่างประเทศได้ สำหรับปัจจัยที่ผู้หญิงใช้พิจารณาในการเลือกซื้อสินค้าและการบริการผ่านทางออนไลน์ได้แก่ คุณภาพของสินค้า ราคา สินค้าที่เป็นของแท้ไม่ใช่ของละเมิดลิขสิทธิ์ ราคาค่าขนส่งสินค้า และความสะดวกในการซื้อ กลุ่มลูกค้าผู้หญิงเป็นกลุ่มสำคัญในการซื้อสินค้าและการบริการในทางออนไลน์ ดังนั้นกลุ่มผู้หญิงจึงเป็นกลุ่มลูกค้าที่น่าสนใจ

งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาพฤติกรรมและวิถีชีวิตของกลุ่มพลังหญิง (SHE-Economy) ประกอบกับทัศนคติและความคิดเห็นต่อคุณค่าที่ได้รับจากการซื้ออาหารผ่านช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ บนพื้นฐานของทฤษฎีการยอมรับและการใช้เทคโนโลยี (UTAUT) (Venkatesh et al., 2003) ของกลุ่มพลังหญิงแต่ละช่วงอายุที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างประเด็นหรือเงื่อนไขสำคัญในการสร้างประสบการณ์การซื้อสินค้าออนไลน์ให้คล้องกับผู้บริโภคแต่ละช่วงอายุ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้แบบสอบถามแบบมีโครงสร้าง (Structural questionnaire) โดยพัฒนาจากข้อมูลเบื้องต้นจากการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) ที่ได้จากการสำรวจ (Observation) การจำหน่ายอาหารในช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ และข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมและวิถีการดำเนินชีวิต การยอมรับและการใช้เทคโนโลยีของผู้บริโภค และคุณค่าที่ได้รับจากการซื้อสินค้าผ่านช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ โดยแบบสอบถาม ประกอบด้วยคำถาม 5 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ พฤติกรรมการซื้อสินค้าอาหารผ่านโซเชียลคอมเมิร์ซ วิถีการดำเนินชีวิต การให้ความสำคัญกับคุณค่าในด้านต่างๆ (Value basis)ในการซื้ออาหารผ่านโซเชียลคอมเมิร์ซ และทัศนคติของผู้บริโภคจากประสบการณ์ซื้ออาหารผ่านโซเชียลคอมเมิร์ซ เมื่อรวบรวมข้อมูลแล้วจะบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Office และวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics Version 25

กลุ่มตัวอย่างและการเก็บรวบรวมข้อมูล

1. เก็บรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัย วารสาร หนังสือ และฐานข้อมูลออนไลน์ที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลจากการสำรวจตลาด (Observation) ผู้ประกอบการที่จำหน่ายอาหารผ่านโซเชียลคอมเมิร์ซ จำนวน 20 ราย เพื่อนำมาวิเคราะห์เนื้อหา และเป็นแนวทางในการพัฒนาแบบสอบถามสำหรับการวิจัยเชิงสำรวจในขั้นตอนต่อไป
2. เก็บรวบรวมข้อมูลจากการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey) โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) กับผู้บริโภคเพศหญิง ที่มีประสบการณ์ในการซื้อสินค้าออนไลน์จากช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ จำนวน 300 คน แบ่งตามช่วงอายุเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ เบบี้บูมเมอร์ เจเนอเรชั่นเอ็กซ์ เจเนอเรชั่นวาย และเจเนอเรชั่นซี โดยการใช้แบบสอบถามในการสัมภาษณ์ผู้บริโภคแบบตัวต่อตัว (Face to face interview) และแบบสอบถามออนไลน์

การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของแบบสอบถาม

ตรวจสอบค่าความเชื่อถือได้ (Reliability test)ของแบบสอบถาม โดยการทำ Pre-test กับผู้บริโภคเป้าหมาย จำนวน 30 ราย และนำข้อมูลที่เป็นสเกลมาหาค่าสัมประสิทธิ์อัลฟาครอนบัค (Cronbach's Alpha Coefficient) จากทฤษฎีของ Nunnally and Bernstein (1994) ระบุว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ ค่าความเชื่อถือได้ที่มากกว่า 0.6 ขึ้นไป

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ข้อมูลทางประชากรศาสตร์และพฤติกรรมศาสตร์ของผู้บริโภคกลุ่มพลังหญิงแต่ละช่วงอายุ (Generation) ด้วยสถิติเชิงพรรณนาในรูปความถี่และร้อยละ
2. วิเคราะห์จัดกลุ่มตัวแปรวิถีการดำเนินชีวิตที่มีความสัมพันธ์กันโดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis) สกัดองค์ประกอบด้วยวิธี Principal Component Analysis และหมุนแกนด้วยวิธี Varimax

3. วิเคราะห์ตัวแปรด้านคุณค่าที่ให้ความสำคัญ (Value basis) ในการซื้ออาหารผ่านช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแตกต่างของแต่ละช่วงอายุด้วยการทดสอบค่าสถิติ Analysis of Variance (ANOVA)

4. นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อเป็นเงื่อนไขในการสร้างประสบการณ์การซื้อสินค้าออนไลน์โดยใช้แบบจำลอง 5A's (Kotler, 2016) ต่อกลุ่มผู้บริโภคพลังหญิงแต่ละกลุ่มต่อไป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางประชากรศาสตร์และพฤติกรรมศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ของผู้บริโภคเพศหญิงที่ซื้อสินค้าผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซ จำนวน 300 คน และแบ่งกลุ่มตามช่วงอายุพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามเป็นกลุ่มเบบี้บูมเมอร์ (56–76 ปี) จำนวนร้อยละ 20.30 กลุ่มเจเนอเรชั่นเอ็กซ์ (40–55 ปี) จำนวนร้อยละ 24.30 กลุ่มเจเนอเรชั่นวาย (24–39 ปี) จำนวนร้อยละ 27.70 และกลุ่มเจเนอเรชั่นซี (12–23 ปี) จำนวนร้อยละ 27.70 กลุ่มเบบี้บูมเมอร์ส่วนใหญ่รับราชการหรือรัฐวิสาหกิจ (ร้อยละ 70.49) เช่นเดียวกับเจเนอเรชั่นเอ็กซ์ (ร้อยละ 63.01) ส่วนเจเนอเรชั่นวายส่วนใหญ่ทำงานบริษัทเอกชน (ร้อยละ 36.14) และเจเนอเรชั่นซีเป็นนิสิตนักศึกษาทั้งหมด สำหรับแพลตฟอร์มโซเชียลมีเดียที่นิยมในกลุ่มเบบี้บูมเมอร์มากที่สุดได้แก่ ไลน์ รองลงมาคือ เฟซบุ๊ก เจเนอเรชั่นเอ็กซ์นิยมเฟซบุ๊ก มากที่สุดและลำดับถัดมาคือไลน์ เจเนอเรชั่นวายนิยมเฟซบุ๊กและอินสตราแกรม และเจเนอเนชั่นซีนิยมทวิตเตอร์มากที่สุด รองลงมาคือเฟซบุ๊ก ดังแสดงใน Table 1

เมื่อพิจารณาประสบการณ์ซื้ออาหารผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซของทุกช่วงอายุ พบว่า ผู้บริโภคทุกช่วงอายุมีประสบการณ์เฉลี่ยประมาณ 2 ปีสำหรับประเภทของอาหารที่นิยมซื้อผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซนั้น เบบี้บูมเมอร์และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์จะซื้ออาหารประเภทผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเป็นอันดับแรก รองลงมาได้แก่ อาหารสำเร็จรูปและอาหารสด อาหารแห้งและอาหารแช่แข็ง เจเนอเรชั่นวาย และเจเนอเรชั่นซีจะซื้อประเภทอาหาร 2 ลำดับแรกเหมือนกันได้แก่ อาหารสำเร็จรูป และผลิตภัณฑ์เบเกอรี่และสเปรด สำหรับเหตุผลที่ทำให้ซื้อสินค้าผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซ ผู้บริโภคทุกช่วงวัยมีความเห็นตรงกันว่าความสะดวกและรวดเร็ว มีความสำคัญเป็นอันดับแรก รองลงมาเบบี้บูมเมอร์ และเจเนอเรชั่นวายซื้ออาหารผ่านโซเชียลคอมเมิร์ซเพื่อต้องการทดลองบริโภค เจเนอเรชั่นเอ็กซ์เห็นว่าสามารถเปรียบเทียบราคาสินค้าได้ และเจเนอเรชั่นซีซื้อจากโซเชียลคอมเมิร์ซเพราะไม่สามารถหาซื้อจากทางหน้าร้านได้

เบบี้บูมเมอร์จะนิยมซื้อสินค้าจากช่องทางไลน์เป็นหลัก รองมาคือเฟซบุ๊ก ขณะที่เจเนอเรชั่นเอ็กซ์ เจเนอเรชั่นวาย และเจเนอเรชั่นซีจะซื้อในช่องทางเฟซบุ๊กเป็นหลัก ลำดับรองลงมาของเจเนอเรชั่นเอ็กซ์และเจเนอเรชั่นวายจะเป็นช่องทางไลน์ ส่วนเจเนอเรชั่นซีจะเป็นช่องทางทวิตเตอร์ สำหรับผู้ที่มีอิทธิพลต่อการซื้อสินค้าผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซนั้น ทุกช่วงวัยจะเลือกตนเองเป็นอันดับหนึ่ง รองลงมาของเบบี้บูมเมอร์และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์จะเป็นคนในครอบครัว ในขณะที่เจเนอเรชั่นวายจะเป็นผู้มีอิทธิพลบนสื่อโซเชียล และเจเนอเรชั่นซีคือเพื่อน ในด้านวัตถุประสงค์ของการซื้อสินค้านั้น ผู้บริโภคทุกช่วงอายุซื้อเพื่อนำไปบริโภคเอง ความถี่ในการซื้อไปบริโภคจะอยู่ที่ประมาณ 1-2 ครั้งต่อเดือน ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการซื้ออาหารต่อครั้งของเบบี้บูมเมอร์และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์คือมากกว่า

500 บาท เจเนอเรชั่นวายคือ 201–300 บาท และเจเนอเรชั่นซีคือ 100–200 บาท ส่วนลักษณะการซื้ออาหารนั้น ผู้บริโภคมากกว่าร้อยละ 50 ของทุกช่วงวัยจะเปลี่ยนแปลงยี่ห้อของอาหารในบางครั้งถ้ามีผลิตภัณฑ์ใหม่ออกสู่ตลาด

Table 1 The analysis of demographics among 4 generations

Demographics	Frequency (%)			
	Baby boomer	Generation X	Generation Y	Generation Z
1. Age	61 (20.30%)	73 (24.30%)	83 (27.70%)	83 (27.70%)
2. Occupation				
Student	0 (0.00%)	0 (0.00%)	6 (7.23%)	83 (100%)
Government / state enterprises officials	43 (70.49%)	46 (63.01%)	23 (27.71%)	0 (0.00%)
Private Company Employees	0 (0.00%)	10 (13.70%)	30 (36.14%)	0 (0.00%)
Entrepreneur / freelance	5 (8.20%)	9 (12.33%)	11 (13.25%)	0 (0.00%)
House wife / Retired	4 (6.56%)	5 (6.85%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)
Others	9 (14.75%)	3 (4.11%)	13 (15.67%)	0 (0.00%)
3. The most used social media				
Facebook	23 (37.70%)	34 (46.57%)	31 (37.35%)	18 (21.69%)
Twitter	0 (0.00%)	2 (2.74%)	10 (12.05%)	46 (55.42%)
Instagram	0 (0.00%)	2 (2.74%)	23 (27.71%)	11 (13.25%)
Tik Tok	0 (0.00%)	0 (0.00%)	1 (1.20%)	1 (1.20%)
YouTube	3 (4.92%)	3 (4.11%)	7 (8.44%)	4 (4.82%)
Line	35 (57.38%)	32 (43.84%)	11 (13.25%)	3 (3.62%)

ผลการวิเคราะห์วิถีการดำเนินชีวิตด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis)

ผลการวิเคราะห์วิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคจากคำถาม 10 ข้อโดยวิธีการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) เพื่อจัดกลุ่มหรือรวมกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในกลุ่มเดียวกัน (Mary and William , 2007) สามารถจัดกลุ่มตัวแปรวิถีการดำเนินชีวิตได้ทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 ประกอบด้วยตัวแปร 4 ตัวแปรจากคำถามได้แก่ ชอบสืบค้นข้อมูลจากหลายแหล่งก่อนตัดสินใจซื้อ เชื่อถือในชื่อเสียง/ตราสินค้าของผู้ผลิตอาหาร ชอบทดลองใช้เทคโนโลยีใหม่ และใช้จ่ายผ่านบัตรเครดิตและโมบายแบงก์กิ้งมากกว่าเงินสด จึงเป็นวิถีการดำเนินชีวิตแบบสนใจเทคโนโลยีใหม่ ปัจจัยที่ 2 ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ เป็นคนที่เลือกซื้ออาหารเพื่อสุขภาพ ให้ความสำคัญกับคุณภาพมากกว่าราคา และสนใจแหล่งที่มาของอาหารดังนั้น จึงเป็นวิถีการดำเนินชีวิตแบบใส่ใจสุขภาพ สำหรับปัจจัยที่ 3 ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ ชอบอ่านรีวิวอาหารก่อนการตัดสินใจซื้อ ชอบทดลองรับประทานอาหารชนิดใหม่ เป็นคนบริโภคตามกระแสสังคม จึงเป็นวิถีชีวิตแบบตามกระแสนิยม และเมื่อวิเคราะห์ผู้บริโภคแต่ละกลุ่มพบว่า กลุ่มเบบี้บูมเมอร์ส่วนใหญ่มีวิถีชีวิตแบบใส่ใจสุขภาพ เจเนอเรชั่นเอ็กซ์ส่วนใหญ่จะมีวิถีชีวิตแบบชอบทดลองใช้เทคโนโลยีใหม่ สำหรับเจเนอเรชั่นวายและเจเนอเรชั่นซี ส่วนใหญ่มีวิถีชีวิตคล้ายคลึงกันคือเป็นแบบตามกระแสนิยมหรือกระแสสังคม

ผลการวิเคราะห์ด้านคุณค่าที่ได้รับ (Value basis)

การวิเคราะห์ด้านการให้ความสำคัญกับคุณค่าที่ผู้บริโภคได้รับจากการซื้ออาหารผ่านช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซจากคำถามเกี่ยวกับคุณค่าด้านต่าง ๆ ได้แก่ คุณค่าเชิงอรรประโยชน์ คุณค่าด้านอารมณ์และประสบการณ์ คุณค่าด้านสังคม คุณค่าด้านต้นทุน คุณค่าด้านนวัตกรรม และคุณค่าแบบมีเงื่อนไข เป็นคำถามใช้สเกลแบบ 5-point likert scale โดยการหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนความสำคัญ และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญของคุณค่าแต่ละด้าน พบว่ากลุ่มเบบี้บูมเมอร์ และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์จะให้ความสำคัญกับคุณค่าด้านสังคมมากกว่าเจเนอเรชั่นอื่น ขณะที่เจเนอเรชั่นวายจะให้ความสำคัญกับคุณค่าแบบมีเงื่อนไขมากที่สุด โดยเฉพาะเกี่ยวกับการซื้ออาหารผ่านโซเชียลคอมเมิร์ซเนื่องจากมีจำหน่ายในบางสถานที่ไม่สามารถไปซื้อได้หรือไม่มีหน้าร้าน สำหรับเจเนอเรชั่นซี ให้ความสำคัญกับคุณค่าด้านอรรถประโยชน์ ได้แก่ อาหารที่จำหน่ายในช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซมีให้เลือกหลากหลายชนิดและยี่ห้ออาหารที่ซื้อมีคุณภาพดีเนื่องจากการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดี เป็นต้น ให้ความสำคัญกับคุณค่าด้านอารมณ์ ได้แก่ รู้สึกมีความสุขทุกครั้งที่ได้ซื้ออาหารผ่านช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ ตื่นเต้นในการรอคอยอาหารมาส่ง พึงพอใจในการซื้ออาหารที่ต้องจองคิวล่วงหน้าหรือมีจำนวนจำกัด และพึงพอใจที่บรรจุภัณฑ์อาหารที่ซื้อผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซมีความสวยงาม รายละเอียดดังแสดงใน Table 2

Table 2 The analysis of value propositions among 4 generations

Value propositions	Importance score (Mean ± S.D.)			
	Baby boomer	Generation X	Generation Y	Generation Z
Functional value - Foods on social commerce are available in a wide variety of brands and types. [ns]	3.96 ± 0.72	4.13±0.73	4.00±0.73	4.27±0.80
- Buying on social commerce provide good service.	3.79±0.69 [ab]	3.77±0.70 [ab]	3.70±0.64 [b]	3.99±0.76 [a]
Emotional value - You always feel happy when you buy foods through social commerce.	3.47±0.86 [b]	3.56±0.72 [b]	3.69±0.81 [ab]	3.98±0.74 [a]
- You are excited to wait for foods to deliver to you after purchasing via social commerce.	3.30±1.043 [c]	3.63±0.89 [bc]	3.87±0.91 [ab]	4.10±0.82 [a]
- You satisfied if purchased foods from social commerce with pre-booked or limited-edition. [ns]	3.09±1.06	3.32±0.97	3.50±1.08	3.72±1.17
Social value - Buying foods via social commerce is a symbol of modernity or trend. [ns]	4.14±7.9	3.97±0.67	3.93±0.83	3.91±0.71

Table 2 (continued).

Value propositions	Importance score (Mean ± S.D.)			
	Baby boomer	Generation X	Generation Y	Generation Z
Cost value				
- Buying foods via social commerce make you to save time finding information. [ns]	4.12±0.71	4.06±0.75	3.85±0.82	3.95±0.93
- You can easily compare food prices by purchasing through social commerce. [ns]	4.08±0.65	4.21±0.67	4.16±0.80	4.34±0.68
Innovation value				
- You find more innovative food products on social commerce than in general stores. [ns]	4.00±0.72	4.07±0.74	3.92±0.76	4.04±0.89
Conditional value				
- You buy foods via social commerce since they are sold in the certain locations that cannot visit.	3.80±0.74[b]	3.90±0.88[ab]	4.02±0.79[a]	3.95±0.70[a]
- You buy foods through social commerce since there is no store where you can buy.	3.80±0.87[b]	4.02±0.79[ab]	4.32±0.84[a]	4.24±0.68[ab]

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

การวิเคราะห์แผนผังการเดินทางของลูกค้า (Customer journey map)

ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลจากผลการสำรวจตลาดและแบบสอบถามมาวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางออกแบบแผนผังการเดินทางของลูกค้า โดยใช้แบบจำลอง 5A's (Kotler, 2016) ดังนี้



Fig. 1 Customer Journey Map model

ตัวแทนผู้บริโภค(Persona): ได้จากสัมภาษณ์เชิงลึกและการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองกลุ่มเบบี้บูมเมอร์ คือ พนักงานรัฐวิสาหกิจ อายุ 59 ปี เลือกรับประทานอาหารที่ดีต่อสุขภาพเสมอ ออกกำลังกายเป็นประจำ สำหรับกลุ่มเจเนเรชั่นเอ็กซ์คือ ข้าราชการอายุ 50 ปีเลือกรับประทานอาหารเพื่อสุขภาพเป็นประจำ กิจกรรมยามว่างคือการปลูกต้นไม้ ออกกำลังกายบ้าง เป็นผู้ที่ดูแลครอบครัวในด้านอาหาร เจเนอเรชั่นวายคือ พนักงานบริษัทเอกชน อายุ 26 ปี ไม่เลือกรับประทานอาหาร ออกกำลังกายเป็นครั้งคราว ชอบทดลองซื้อสินค้าที่เป็นที่นิยมในโซเชียลมีเดียเสมอ และเจเนเรชั่นซีคือนักศึกษามหาวิทยาลัย อายุ 20 ปี ไม่เลือกรับประทานอาหาร กิจกรรมยามว่าง เล่นโซเชียลมีเดีย และการเที่ยวกับกลุ่มเพื่อน มักจะติดตามข่าวสารผ่านโซเชียลมีเดียมากกว่าการดูโทรทัศน์

การตระหนัก (Awareness): การสร้างความตระหนักให้เบบี้บูมเมอร์สำหรับผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร ควรใช้ไลน์เนื่องจากใช้งานเป็นประจำในกลุ่มไลน์หลายกลุ่ม ส่วนเจเนอเรชั่นเอ็กซ์นั้น จะนิยมใช้เฟซบุ๊กในการสื่อสารและซื้อสินค้า มีโอกาสที่จะสนใจผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร เจเนอเรชั่นวายจะนิยมใช้เฟซบุ๊กและอินสตาแกรม มี

แนวโน้มที่จะสนใจผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เช่น ข้าวกล่อง และผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และกลุ่มเจเนอเรชั่นซีจะนิยมใช้ทวิตเตอร์และเฟซบุ๊ก มีโอกาสที่จะสนใจในอาหารสำเร็จรูป กลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และอาหารหรือขนมที่นำเข้าจากต่างประเทศ

การสนใจผลิตภัณฑ์ (Appeal): การสร้างความสนใจให้เบบี้บูมเมอร์ จะเป็นเรื่องการสร้าง contentให้ข้อมูลที่มาและส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เนื่องจากเป็นกลุ่มรักสุขภาพ ส่วนเจเนอเรชั่นเอ็กซ์ควรจะให้ข้อมูลผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด เนื่องจากนิยมหาข้อมูลก่อนการซื้อผลิตภัณฑ์เสมอทั้งด้านคุณประโยชน์และการเปรียบเทียบราคา สำหรับเจเนอเรชั่นวายควรใช้ผู้มีอิทธิพลทางสื่อเป็นผู้แนะนำสินค้าและสร้างเงื่อนไขในการซื้อ อาทิ ผลิตภัณฑ์มีจำนวนจำกัดต้องจองคิวล่วงหน้า ขณะที่เจเนอเรชั่นซีควรจะใช้วิธีการรีวิวผลิตภัณฑ์หรือกิจกรรมเพื่อนแนะนำเพื่อน

การสอบถามเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ (Ask): กลุ่มเบบี้บูมเมอร์จะสอบถามรายละเอียดผลิตภัณฑ์กับผู้ขายมากเพื่อสร้างความมั่นใจ ส่วนเจเนอเรชั่นเอ็กซ์จะหาข้อมูลเปรียบเทียบด้วยตนเอง แล้วสอบถามข้อมูลเพียงบางส่วนของผลิตภัณฑ์ เจเนอเรชั่นวายจะสอบถามข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่นิยมอยู่ในกระแสเนื่องจากบริโภคตามเทรนด์ สำหรับเจเนอเรชั่นซีจะสอบถามเกี่ยวกับตัวผลิตภัณฑ์ทั้งด้านรสชาติและราคาเพื่อประกอบการตัดสินใจ ดังนั้นจึงต้องออกแบบช่องทางการติดต่อให้สอดคล้องกับความต้องการของแต่ละกลุ่ม

การตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ (Act): การจัดส่งผลิตภัณฑ์และการส่งเสริมการตลาดมีความสำคัญต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค สำหรับเบบี้บูมเมอร์และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์จะเลือกช่องทางการจัดส่งสินค้าที่รวดเร็วเนื่องจากไม่กังวลเรื่องค่าจัดส่ง ส่วนเจเนอเรชั่นวายจะกังวลเรื่องค่าใช้จ่ายด้านการจัดส่ง ดังนั้นจึงควรให้ทางเลือกการจัดส่งหรือคิดค่าจัดส่งตามปริมาณการซื้อ ขณะที่เจเนอเรชั่นซีจะให้ความสำคัญเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายการสั่งสินค้าจะต้องคุ้มกับค่าส่งสินค้าและจะใส่ใจกับเรื่องคุณค่าทางอารมณ์ค่อนข้างสูง ดังนั้นกิจกรรมส่งเสริมการตลาดสำหรับกลุ่มนี้จะสามารถกระตุ้นการตัดสินใจซื้อได้อย่างมาก

การแนะนำหรือสนับสนุน (Advocate): เบบี้บูมเมอร์ส่วนใหญ่จะซื้ออาหารเพื่อบริโภคเองและคนในครอบครัว แต่ก็สามารถที่จะแนะนำผู้อื่น ส่วนเจเนอเรชั่นเอ็กซ์จะนิยมทดลองบริโภคผลิตภัณฑ์ หากผลิตภัณฑ์ดีก็พร้อมที่จะเป็นผู้แนะนำต่อไป เจเนอเรชั่นวายจะนิยมการแนะนำผลิตภัณฑ์ที่บริโภคในโซเชียลมีเดียอยู่เสมอตามกระแสนิยม และเจเนอเรชั่นซีมักจะรีวิวผลิตภัณฑ์ในเรื่องที่ให้ความสำคัญ โดยเฉพาะคุณค่าทางอารมณ์ การให้บริการของร้านค้า และรสชาติ พร้อมจะแนะนำผู้อื่นในการซื้อผลิตภัณฑ์ผ่านโซเชียลคอมเมิร์ซ ดังนั้นจึงควรมีช่องทางใช้ Micro influencer หรือผู้บริโภคผลิตภัณฑ์ทุกกลุ่มได้รีวิวแสดงความคิดเห็นเพื่อให้เกิดการแนะนำและบอกต่อ

สรุป

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรม วิถีชีวิต และการให้ความสำคัญกับคุณค่าด้านต่าง ๆ ในการซื้อผลิตภัณฑ์อาหารจากช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซของกลุ่มพลังหญิงทุกช่วงวัยในกรุงเทพมหานคร ผลการวิจัยพบว่าการซื้อผลิตภัณฑ์อาหารผ่านทางโซเชียลคอมเมิร์ซเป็นที่นิยมในกลุ่มพลังหญิงทุกช่วงวัยซึ่งแต่ละช่วงวัยจะมีสินค้าหลักที่เลือกซื้อแตกต่างกัน โดยเบบี้บูมเมอร์และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์จะเป็นกลุ่มที่นิยมซื้อผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร ขณะที่เจเนอเรชั่นวายและเจเนอเรชั่นซีนิยมอาหารสำเร็จรูปและเบเกอรี่และสเปรด ช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซที่นิยมซื้อ

สินค้าของแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกัน เบบี้บูมเมอร์และเจเนอเรชั่นเอ็กซ์ให้ความสำคัญกับคุณค่าทางด้านสังคมและมีความกังวลด้านค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้อยกว่าเจเนอเรชั่นวายและเจเนอเรชั่นซี ขณะที่เจเนอเรชั่นวายและเจเนอเรชั่นซีมีพฤติกรรมในการซื้ออาหารค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือนิยมซื้ออาหารสำเร็จรูปพร้อมรับประทาน และผลิตภัณฑ์เบเกอรี่และสเปรด โดยเจเนอเรชั่นวายจะให้ความสำคัญด้านคุณค่าแบบมีเงื่อนไข อาทิ ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายเฉพาะช่วงฤดูกาล หาซื้อไม่ได้จากหน้าร้านหรือไม่สามารถไปซื้อเองได้ ส่วนเจเนอเรชั่นซีนั้น จะให้ความสำคัญกับคุณค่าด้านอรรถประโยชน์และด้านอารมณ์มากที่สุด ผลการวิจัยเป็นแนวทางออกแบบแผนผังการเดินทางของลูกค้าและกลยุทธ์ทางการตลาดที่แตกต่างกันเพื่อให้เข้าถึงกลุ่มลูกค้าได้ตรงตามผลิตภัณฑ์และสร้างประสบการณ์ให้ลูกค้าได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่เสียสละเวลาอันมีค่าและให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูลเพื่อทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม. 2563. รายงานผลการสำรวจพฤติกรรมผู้ใช้อินเทอร์เน็ตในประเทศไทย ปี 2562, พิมพ์ครั้งที่1 กรุงเทพฯ.

บีแอลที. 2562. พฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ของคนไทย. https://www.bltbangkok.com/bangkok-update/4774/, 31 มกราคม 2564.

พัชมณฑ์ เทศขยัน, ชัยวัฒน์ อุตตมากร. 2562. ปัจจัยทางด้านความสัมพันธ์กับพฤติกรรมของผู้บริโภคที่มีผลต่อความตั้งใจเข้าเยี่ยมชมและซื้อสินค้าผ่านช่องทางโซเชียลคอมเมิร์ซ. วารสารวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ. 6: 166–170.

Kotler, P. 2016. Marketing 4.0 Moving from Traditional to Digital. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

Laurel, W. 2014. On the rise and online Female consumers in Asia. https://eiuperspectives.economist.com/marketing/rise-and-online/white-paper/rise-and-online-female-consumers-asia, 1 February 2021.

Mary Ann Coughlin, William Knight. 2007. Structural Equation Modeling for Institutional Researchers: Applications using SPSS and AMOS. http://web.stanford.edu/group/ssds/weblog/archives/2007/04, 1 February 2021.

Nunnally, J.C., Bernstein, I.H. 1994. Psychological Theory. MacGraw-Hill. New York, NY, USA.

Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B., Davis, F.D. 2003. User acceptance of information technology: Toward a unified view. MIS quarterly 425–478.

วิถีชีวิต คุณค่า และความตั้งใจซื้อข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์

Lifestyle, value and intention to buy carbon footprint labeled rice and rice products

นนทพัทธ์ เลิศวรไกร*, รวิพิมพ์ ฉวีสุข, อัจฉรา เกษสุวรรณ

Nontapat Lerdworakrai*, Ravipim Chaveesuk, Ajchara Kessuvan

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: nontapat.le@ku.th

บทคัดย่อ

ภายใต้ภาวะโลกร้อน ผู้บริโภคมีแนวโน้มสนใจสนับสนุนผลิตภัณฑ์เป็นที่มิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ศึกษาวิถีชีวิต คุณค่า และความตั้งใจซื้อข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 425 คน พบว่า ผู้บริโภค อายุ 17-73 ปี เห็นว่าภาวะโลกร้อนส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ต้องเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเพื่อช่วยลดภาวะโลกร้อน และสื่อออนไลน์มีความสำคัญกับการดำเนินชีวิตสูงมากกับ Generations Z และ Y การสร้างแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียล เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง วิถีชีวิต และคุณค่ากับความตั้งใจซื้อ พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระตุ้นความตั้งใจซื้อข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ได้แก่ วิถีชีวิตลดบริโภคเนื้อสัตว์ คุณค่าด้านอารมณ์เรื่อง การออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่สวยงาม และความรู้สึกแปลกใหม่ที่เห็นผลิตภัณฑ์วางขาย คุณค่าด้านผลกระทบทางสังคมในแง่การหลุดพ้นจากการเอาตัวเองเป็นจุดศูนย์กลางเพื่อที่ช่วยเหลือคนอื่น และสิ่งแวดล้อม และคุณค่าด้านการใช้งานในแง่ลดความเสี่ยงของภาวะโลกร้อน ปัจจัยเหล่านี้นำไปใช้กำหนดกลยุทธ์ให้ผู้บริโภคสนับสนุนผลิตภัณฑ์ข้าวที่ติดฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์

คำสำคัญ: ข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าว, ความตั้งใจซื้อ, ฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์, ช่วงอายุ, แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียล, ภาวะโลกร้อน

Abstract

Under global warming situation, consumers tend to be interested in promoting environmental friendly products. The aims of the research were to study lifestyle, value and consumer's intention to buy for rice and rice products with a carbon footprint label in the Bangkok Metropolitan from 425 consumers. The result showed that consumers, 17–73 years old, realized the effect of global warming on the environment and wanted to change their behaviors to help reduce the global warming effect. Their lifestyles were online oriented especially Generations Z and Y. A polynomial regression model was constructed to describe the relationship between lifestyle and value towards the intention to buy. Factors that stimulated buying intention of rice and rice products with a carbon footprint label included lifestyle on meat consumption reduction, emotional value of aesthetics in package design and a surprise to see products on shelf, social impact value of self-transcendence, functional value of reducing risk of global warming. These factors can later be used to formulate a strategy for changing consumer behavior to support carbon footprint labeled rice and rice products.

Keywords: buying intention, carbon footprint labels, generation, global warming, polynomial regression, rice and rice products

คำนำ

ภาวะโลกร้อนเกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เป็นต้น ก๊าซเหล่านี้มีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนจากผิวโลกแล้วคายรังสีความร้อนกลับลงมาส่งผลให้อุณหภูมิของผิวโลกร้อนขึ้นกว่าเดิม น้ำแข็งขั้วโลกละลาย ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตการเกษตรลดลง การใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง การเผาพื้นที่เพื่อการเกษตรกรรม การทำเกษตรกรรม และการจัดการของเสียตลอดโซ่อุปทานจัดเป็นกิจกรรมปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูง สำหรับประเทศไทยภาคพลังงานมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด และรองลงมาเป็นภาคการเกษตร (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) ซึ่งพบว่าในระบบการเกษตรทั้งหมด กระบวนผลิตข้าวตลอดห่วงโซ่อุปทานปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด ผลิตภัณฑ์ข้าวสารหอมมะลิบรรจุลงในถุง CPP/LLDPE ขนาด 5 กิโลกรัม ปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 38.7 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยขั้นตอนการปลูกข้าวเป็นขั้นตอนที่มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุงสุดมากกว่าร้อยละ 95 ของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์รวมในผลิตภัณฑ์ข้าวสาร (รัตนาวรรณ และคณะ, 2554) ซึ่งจากปัญหาเหล่านี้ทำให้เกิดกระแสเรียกร้องต่อภาคการผลิตให้แสดงความรับผิดชอบต่อปัญหาก๊าซเรือนกระจกของธุรกิจ รวมทั้งการรณรงค์ให้ผู้บริโภคเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคที่คำนึงถึงปัญหาภาวะโลกร้อนเพื่อขับเคลื่อนประเทศเข้าสู่เศรษฐกิจที่มีการปลดปล่อยคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Economy) องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ได้จัดทำฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ เพื่อสื่อสารกับผู้บริโภคถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากผลิตภัณฑ์ตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์เพื่อประกอบการตัดสินใจซื้อ ในขณะเดียวกันเป็นการกระตุ้นให้ผู้ผลิตลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามความต้องการของผู้บริโภค (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, ม.ป.ป.)

ฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์มีการใช้แพร่หลายในประเทศที่พัฒนาแล้ว Guenther (2012) พบว่า ผู้บริโภคในอังกฤษและญี่ปุ่นสนใจสิ่งแวดล้อมอยู่ในระดับสูงและต้องการที่จะให้มีการแสดงข้อมูลบนผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับความยั่งยืนเรื่องสิ่งแวดล้อม เช่น ฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ผลการศึกษาผู้บริโภคยุโรปตะวันตก (Feucht, 2017) และผู้บริโภคสหรัฐอเมริกา (Groening, 2015) มีความสอดคล้องกันว่า ฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์บนผลิตภัณฑ์สามารถเพิ่มการตัดสินใจซื้อสินค้าหรือบริการของผู้บริโภคได้ และผู้บริโภคต้องการให้แสดงข้อมูลบนฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์อย่างละเอียด เช่น ข้อมูลการผลิตตลอดห่วงโซ่อุปทาน ขั้นตอนที่สามารถปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ในระดับต่ำ ทั้งนี้ในกระบวนการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์และการบริการนั้น ผู้บริโภคจะชั่งน้ำหนักระหว่างคุณค่าที่รับรู้กับราคา ซึ่งองค์ประกอบของคุณค่าแบ่งได้เป็น 4 ด้าน Almquist (2016) ได้แก่ (1) คุณค่าด้านการใช้งาน เช่น ช่วยลดเวลา คุณภาพ และความหลากหลาย (2) คุณค่าอารมณ์ เช่น ช่วยลดความกังวลใจ สร้างความเบิกบานใจ การเยียวยาจิตใจ และสุนทรียภาพ (3) คุณค่าด้านการเปลี่ยนแปลงชีวิต เช่น ความหวัง และการสร้างแรงบันดาลใจ (4) คุณค่าด้านผลกระทบทางสังคม เช่น ความมุ่งมั่นที่จะช่วยเหลือคนอื่น สังคม และสิ่งแวดล้อม โดย Almquist (2016) สรุปว่าการจัดองค์ประกอบของคุณค่าที่เหมาะสมจะทำให้ธุรกิจสามารถสร้างโอกาสในตลาดเดิมหรือเข้าสู่ตลาดใหม่ เกิดความจงรักภักดีหรือเต็มใจทดลองในตราสินค้าสูงขึ้นและสร้างการเติบโตอย่างยั่งยืนให้กับธุรกิจ สำหรับอุตสาหกรรมอาหารและการบริการนั้นคุณค่าที่มีผลต่อความจงรักภักดีในตราสินค้าสูงสุด 5 ประการ ได้แก่ คุณภาพ ความหลากหลาย การตอบสนองทางประสาทสัมผัสที่ดี สุนทรียภาพ และการเยียวยาจิตใจ ส่วน Tolppanen and Kang (2020) พบว่า คุณค่าด้านสิ่งแวดล้อม (Bioshperic values) และคุณค่าด้านความเพลิดเพลินเชิงอารมณ์

(Hedonic values) เป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้ผู้บริโภคสนับสนุนการใช้ฉลากคาร์บอนเพื่อเป็นการรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับประเทศไทยนั้นผู้บริโภคในแต่ละช่วงอายุมีแนวโน้มในการหันมาสนใจในเรื่องสิ่งแวดล้อมและมีความรู้ความเข้าใจในฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์อยู่ในระดับปานกลาง (ชนาทิป, 2553) ทั้งนี้ผู้บริโภคในปัจจุบันมีวิถีชีวิตเชิงดิจิทัลมากขึ้น โดยวิถีชีวิตเชิงดิจิทัลประกอบด้วย การติดต่อสื่อสาร การซื้อสินค้าหรือใช้บริการต่าง ๆ สั่งอาหาร ทำธุรกรรม การเรียน ผ่านระบบดิจิทัลออนไลน์เพื่อความสะดวกสบายของผู้บริโภค (Hofmann, 2008)

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา วิถีชีวิตเกี่ยวกับภาวะโลกร้อนและเชิงดิจิทัล ระดับความสำคัญของคุณค่าที่มีผลต่อความตั้งใจซื้อข้าวสารและผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผู้บริโภค 4 ช่วงอายุ คือ Generation Z (อายุ 9-22 ปี), Generation Y (อายุ 23-38 ปี), Generation X (อายุ 39-54 ปี) และ Baby Boomer (อายุ 55-73 ปี) (สำนักงานบริหารและพัฒนาองค์ความรู้, 2020) ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และสร้างแบบจำลองทำนายความตั้งใจซื้อข้าวสารและผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปให้ผู้ประกอบการข้าวและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวใช้ในสื่อสารและกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดได้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เก็บข้อมูลจากการสังเกตการณ์ ในช่องทางการจัดจำหน่ายข้าวสารและผลิตภัณฑ์จากข้าว คือ ข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทาน ได้แก่ ร้านขายข้าวสาร ซุปเปอร์มาร์เก็ต ไฮเปอร์มาร์เก็ต และร้านสะดวกซื้อ เพื่อพัฒนาแบบสอบถาม ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล (1) ด้านประชากรศาสตร์ (2) วิถีชีวิตเกี่ยวกับภาวะโลกร้อนและเชิงดิจิทัล (ใช้สเกล 1-5) (3) พฤติกรรมการซื้อของผู้บริโภค (4) ความสำคัญของคุณค่า 4 ด้านคือ คุณค่าด้านการใช้งาน คุณค่าด้านอารมณ์ คุณค่าด้านการเปลี่ยนแปลงชีวิต และคุณค่าด้านผลกระทบทางสังคมที่มีต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค (ใช้สเกล 1–5) และ (5) ความตั้งใจซื้อของผู้บริโภค (ใช้สเกล 1–5)

2. เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามจากข้อ 1 โดยการสัมภาษณ์ผู้บริโภคแบบตัวต่อตัว (Face to Face Interview) สุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงและสุ่มตามความสะดวกจากผู้บริโภคที่มีประสบการณ์ซื้อข้าวสารหรือข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทาน ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 425 คน โดยคำนวณขนาดตัวอย่างจาก Cochran (1977)

3. ทดสอบแบบสอบถาม (Pre-test) กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบสอบถาม โดยคำนวนค่า Cronbach’s alpha coefficient (Malhotra, 2006) ต้องมีค่าอย่างน้อย 0.7 จากผลการทดสอบพบว่ามีค่ามากกว่า 0.7แสดงว่าแบบสอบถามที่ใช้มีความเชื่อถือได้

4. วิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์และพฤติกรรมในการซื้อข้าวสารและข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานของผู้บริโภคทั้งหมด โดยใช้ความถี่และร้อยละ

5. เปรียบเทียบวิถีชีวิตเกี่ยวกับภาวะโลกร้อนและเชิงดิจิทัล ความสำคัญในด้านคุณค่าของผู้บริโภคที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อและความตั้งใจจะซื้อผลิตภัณฑ์ใน 4 ช่วงอายุ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6. เปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอย 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยเชิงพหุ และแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียล เพื่อจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น ได้แก่ ข้อมูลด้านวิถีชีวิต และระดับความสำคัญ

ด้านคุณค่าของผู้บริโภคกับตัวแปรตาม ได้แก่ ความตั้งใจซื้อข้าวสารและข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์

6.1 สร้างและทวนสอบแบบจำลองทำนายความตั้งใจซื้อข้าวสารและข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ด้วยวิธี 5-fold cross validation โดยนำข้อมูล 425 ค่า มาแบ่งเป็น 5 กลุ่ม สร้างแบบจำลองชุดที่ 1 ใช้ข้อมูลกลุ่มที่ 1–3 เป็นชุดเรียนรู้ ข้อมูลกลุ่มที่ 4–5 เป็นชุดทดสอบและทวนสอบตามลำดับ ต่อมาสร้างแบบจำลองชุดที่ 2 ใช้ ข้อมูลกลุ่มที่ 3–5 เป็นชุดเรียนรู้ และข้อมูลกลุ่มที่ 1 และ 2 เป็นชุดทดสอบและทวนสอบ ตามลำดับ สร้างแบบจำลองชุดที่ 3 ใช้ข้อมูลกลุ่มที่ 5, 1 และ 2 เป็นชุดเรียนรู้ และข้อมูลกลุ่มที่ 3 และ 4 เป็นชุดทดสอบ และทวนสอบ ตามลำดับ ทำจนครบ 5 รอบ ในการสร้างแบบจำลองนั้นใช้วิธีการเลือกตัวแปรเข้าแบบจำลอง 4 วิธีคือ ใส่ทั้งหมด (Enter) เพิ่มตัวแปรเข้าทีละตัว (Forward) ใส่ตัวแปรทั้งหมดและคัดออกทีละตัว (Backward) และใส่เข้าและคัดออกต่อเนื่องไป (Stepwise) และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายของทุกชุดข้อมูลด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) และร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percent Error, MAPE) โดยคัดเลือกพารามิเตอร์ของแบบจำลองการถดถอยจากข้อมูลชุดทดสอบที่ให้ความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด และใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทวนสอบในการบ่งชี้ความสามารถในการใช้งานทั่วไป

6.2 ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง (Neter et al., 1990) ดังนี้

6.2.1. ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติด้วยวิธี Kolmogorov – Smirnor ซึ่งต้องไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก

6.2.2. ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าความแปรปรวนคงที่ด้วย Levene’s test ซึ่งต้องไม่ปฏิเสธจากสมมติฐานหลัก

6.2.3. ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน โดยพิจารณาจากค่า Durbin-Watson ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5–2.5

6.2.4. ตรวจสอบการมีข้อมูลผิดปกติ โดยใช้ค่า Standardized residuals หากมีค่าสมบูรณ์มากกว่า 3 แสดงว่ามีข้อมูลที่ผิดปกติ

6.2.5. ตัวแปรต้นแต่ละตัวต้องไม่มีสหสัมพันธ์ร่วมกัน ตรวจสอบโดยใช้ค่า Variance Inflation Factor (VIF) ถ้าค่า VIF มากกว่า 10 แสดงว่ามีปัญหาของสหสัมพันธ์ร่วม

6.3 นำแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการทำนายความตั้งใจซื้อมาใช้ในการระบุปัจจัยที่มีความสำคัญในการทำนายความตั้งใจซื้อ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานของตัวแปรต้น โดยตัวแปรต้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานสูง จัดเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความตั้งใจซื้อในระดับสูง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์และพฤติกรรมการซื้อข้าว

ผู้บริโภคกลุ่มตัวอย่างที่มีประสบการณ์ซื้อข้าวสารหรือข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทาน ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง อายุ 17–73 ปี สถานะภาพโสด มีการศึกษาอยู่ในระดับ

ปริญญาตรี เป็นพนักงานบริษัทเอกชน มีรายได้ 15,000–30,000 บาท ที่พักอาศัยเป็นบ้านเดี่ยว โดยผู้บริโภคซื้อข้าวสารอย่างเดียว ร้อยละ 37.2 ซื้อข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานอย่างเดียว ร้อยละ 26.8 และซื้อทั้งข้าวสารและข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทาน ร้อยละ 36.0 สำหรับผู้บริโภคที่ซื้อข้าวสารส่วนใหญ่จะซื้อเดือนละครั้ง ที่ไฮเปอร์มาร์เก็ต เช่น โลตัส บิ๊กซี แมคโคร ด้วยราคาเฉลี่ย 200 บาทขึ้นไป ผู้ที่มีอิทธิพลในการซื้อคือ บุคคลในครอบครัว และเหตุผลที่สำคัญในการเลือกซื้อคือ เนื้อสัมผัสของข้าว (นุ่ม เหนียว แข็งร่วน) และคุณค่าทางโภชนาการ และสำหรับผู้บริโภคที่ซื้อข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทาน ซื้อ 1–2 ครั้งต่อสัปดาห์ ที่ร้านสะดวกซื้อด้วยราคาเฉลี่ย 30–60 บาท ตัดสินใจซื้อด้วยตนเอง และเหตุผลที่สำคัญในการเลือกซื้อคือ สะดวก รวดเร็ว และประหยัดเวลา

การวิเคราะห์วิถีชีวิตเกี่ยวกับภาวะโลกร้อนและเชิงดิจิทัลและความสำคัญด้านคุณค่าของผู้บริโภค

การเปรียบเทียบวิถีชีวิตเกี่ยวกับภาวะโลกร้อนระหว่างผู้บริโภค 4 ช่วงอายุ พบว่า ผู้บริโภคทุกช่วงอายุใส่ใจในปัญหาโลกร้อนและเต็มใจที่จะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเพื่อช่วยลดภาวะโลกร้อนในระดับสูง (คะแนนเฉลี่ย 4.09-4.24) Baby Boomer นิยมซื้อผลิตภัณฑ์ที่ติดฉลากที่ช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม จะสนใจเข้าร่วมกิจกรรมที่รณรงค์สิ่งแวดล้อม และบริโภคเนื้อสัตว์น้อยลง ส่วน Generation X บริโภคเนื้อสัตว์น้อยลง และนิยมซื้อผลิตภัณฑ์ที่ติดฉลากที่ช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ Generations Z และ Y นิยมใช้ถุงผ้าแทนถุงพลาสติกสูงกว่ากลุ่มที่มีอายุสูงกว่า (Table 1)

Table 1 Comparison of global warming related lifestyle among 4 generations

Lifestyle	Matching Level (Mean±SD)			
	Gen Z	Gen Y	Gen X	Baby Boomer
1. Use a tote bag instead of a plastic bag.	3.88±0.99^{a}	3.88±0.88^{a}	3.73±0.96^{ab}	3.52±1.01^{b}
2. Reduce meat consumption.	2.24±1.16^{b}	2.38±1.04^{b}	2.89±0.90^{a}	2.86±0.83^{a}
3. Shop for environment friendly labeled products.	2.95±1.09^{b}	3.03±0.93^{b}	3.15±0.99^{ab}	3.41±0.89^{a}
4. Participate in environmental campaigns.	3.44±1.16^{b}	3.31±0.99^{b}	3.45±0.92^{b}	3.77±0.82^{a}

Note: Means in the same row followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

จากการเปรียบเทียบวิถีชีวิตเชิงดิจิทัลของผู้บริโภค 4 ช่วงอายุ พบว่า Generations Z และ Y มีวิถีชีวิตเชิงดิจิทัลในทุกด้านสูงกว่า Generation X ส่วน Baby Boomer มีวิถีชีวิตเชิงดิจิทัลต่ำที่สุด (Table 2)

Table 2 Comparison of digital related lifestyle among 4 generations

Lifestyle	Matching Level (Mean±SD)			
	Gen Z	Gen Y	Gen X	Baby Boomer
1. Play social media regularly.	4.38±1.00^{a}	4.44±0.71^{a}	3.57±0.91^{b}	2.78±0.92^{c}
2. Like to order products online.	3.82±1.14^{a}	3.99±0.93^{a}	3.26±1.02^{b}	2.21±1.01^{c}
3. Choose to spend digital wallet instead of cash.	3.66±1.27^{a}	3.75±1.09^{a}	2.99±0.98^{b}	2.12±0.97^{c}

Lifestyle	Matching Level (Mean±SD)			
	Gen Z	Gen Y	Gen X	Baby Boomer
4. Order food through delivery.	3.34±1.40[a]	3.52±1.08[a]	2.79±1.05[b]	1.97±0.98[c]
5. Search through online channels.	4.30±0.93[a]	4.37±0.73[a]	3.81±1.03[b]	2.78±1.19[c]
6. Receive more news from online channels.	4.26±0.97[a]	4.16±0.83[a]	3.78±0.99[b]	3.16±1.01[c]
7. Express opinions through online media.	3.88±1.06[a]	3.62±1.06[a]	3.31±1.06[b]	2.81±1.08[c]
8. Using social media is important in life.	4.46±0.87[a]	4.27±0.77[a]	3.84±0.84[b]	3.39±1.07[c]

Note: Means in the same row followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

ผลการเปรียบเทียบระดับความสำคัญของคุณค่าหลักทั้ง 4 ด้าน (การใช้งาน อารมณ์ การเปลี่ยนแปลงชีวิต และผลกระทบทางสังคม) ที่มีต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ข้าวสาร และข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผู้บริโภคใน 4 ช่วงอายุ พบว่า ผู้บริโภคในทุกช่วงอายุให้ความสำคัญกับคุณค่าการเปลี่ยนแปลงชีวิตสูงที่สุด รองลงมาคือ คุณค่าด้านผลกระทบทางสังคมและให้ความสำคัญด้านคุณค่าการใช้งานต่ำที่สุด โดยรวมแล้วผู้บริโภค Generations Z และ Y ให้ความสำคัญกับคุณค่าในทุกด้านสูงกว่าผู้บริโภคที่มีอายุสูงกว่า (Table 3)

Table 3 Comparison of value's importance level perceived from consuming carbon footprint labeled rice products among 4 generations

Value of carbon footprint labeled product	Importance Level (Mean±SD)			
	Gen Z	Gen Y	Gen X	Baby Boomer
1. Functional value	3.40±1.03[a]	3.20±1.00[ab]	3.17±0.95[ab]	3.05±0.90[b]
2. Emotional value	3.47±1.00[a]	3.32±0.95[b]	3.28±0.83[b]	3.21±0.90[b]
3. Life changing value	3.78±0.99[a]	3.67±0.83[ab]	3.59±0.85[b]	3.39±0.87[c]
4. Social impact value	3.65±0.78	3.35±0.95	3.44±0.91	3.32±0.87

Note: Means in the same row followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

เมื่อจัดลำดับความสำคัญด้วยค่าเฉลี่ยของคุณค่าย่อยที่มีต่อความตั้งใจซื้อผลิตภัณฑ์ (Table 4) พบว่า Generations Z และ Y ให้ความสำคัญด้านคุณค่าการเปลี่ยนแปลงชีวิต 2 ประการในระดับสูงสุดคือ การมอบความหวังและทัศนคติในแง่บวกเกี่ยวกับภาวะโลกร้อน และความภาคภูมิใจในตนเองที่ได้ช่วยเหลือสิ่งแวดล้อม ตามมาด้วยคุณค่าด้านการใช้งานคือ สามารถลดความเสี่ยงของภาวะโลกร้อนได้ ขณะที่ Generation X ให้ความสำคัญความสำคัญด้านคุณค่าการเปลี่ยนแปลงชีวิตสูงที่สุดเช่นกันได้แก่ การมอบความหวังและทัศนคติในแง่บวกเกี่ยวกับภาวะโลกร้อน รองลงมาคือคุณค่าทางด้านอารมณ์ได้แก่ความรู้สึกแปลกใหม่ที่เห็นผลิตภัณฑ์วางขาย และคุณค่าด้านการใช้งานได้แก่ สามารถลดความเสี่ยงของภาวะโลกร้อนได้ ส่วน Baby Boomer ให้ความสำคัญด้านคุณค่าทางด้านอารมณ์สูงที่สุดได้แก่ ทำให้ลดความกังวลใจและมั่นใจเกี่ยวกับสถานการณ์ภาวะโลกร้อน รองลงมา

คือคุณค่าด้านการเปลี่ยนแปลงชีวิตได้แก่ ความภาคภูมิใจในตนเองที่ได้ช่วยเหลือสิ่งแวดล้อมกับการมอบความหวังและทัศนคติในแง่บวกเกี่ยวกับภาวะโลกร้อน

Table 4 Ranking of value importance level perceived from consuming carbon footprint labeled product among 4 generations

Rank	Gen Z	Gen Y	Gen X	Baby Boomer
1	Provide hope to global warming. (Life Changing, 3.82)	Provide hope to global warming. (Life Changing, 3.69)	Provide hope to global warming. (Life Changing, 3.65)	Reduces anxiety about global warming. (Emotional, 3.41)
2	Contributed to self-actualization. (Life Changing, 3.74)	Contributed to self-actualization. (Life Changing, 3.66)	Surprise to see product on shelf. (Emotional, 3.56)	Contributed to self-actualization. (Life Changing, 3.40)
3	Contributed to reduces risk of global warming. (Function, 3.72)	Contributed to reduces risk of global warming. (Function, 3.52)	Contributed to reduces risk of global warming. (Function, 3.54)	Provide hope to global warming. (Life Changing, 3.38)
4	Contributed to self-transcendence. (Social Impact, 3.65)	Surprise to see product on shelf. (Emotional, 3.48)	Contributed to self-actualization. (Life Changing, 3.53)	Contributed to reduces risk of global warming. (Function, 3.34)
5	Reduce anxiety about global warming. (Emotional, 3.59)	Reduce anxiety about global warming. (Emotional, 3.46)	Contributed to self-transcendence (Social Impact, 3.44)	Contributed to self-transcendence. (Social Impact, 3.32)

Note: Parenthesis contains a value element and its mean importance level.

ความตั้งใจจะซื้อผลิตภัณฑ์ข้าวสารและข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์

ผลการเปรียบเทียบความตั้งใจซื้อผลิตภัณฑ์ข้าวสารและข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผู้บริโภค 4 ช่วงอายุ พบว่า Generation Z มีความตั้งใจซื้อผลิตภัณฑ์สูงที่สุด รองลงมาคือ Generation Y และ X ส่วน Baby Boomer มีความตั้งใจซื้อผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด (Table 5)

Table 5 Comparison of buying intention level among 4 generations

Factor	Buying Intention Level (Mean±SD)			
	Gen Z	Gen Y	Gen X	Baby Boomer
1. Buying intention	3.88 ± 0.88^{a}	3.63 ± 0.83^{b}	3.48 ± 0.92^{bc}	3.28 ± 0.90^{c}

Note: Means in the same row followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

การสร้างแบบจำลองการถดถอยทำนายความตั้งใจซื้อ

ผลเปรียบเทียบแบบจำลองถดถอย 2 วิธี พบว่า แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียล แบบขั้นบันได (Stepwise) เป็นวิธีที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) และร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) สำหรับข้อมูลในชุดทดสอบ ชุดเรียนรู้ และชุดทวนสอบ ต่ำกว่าแบบจำลองถดถอยเชิงพหุ (Table 6)

Table 6 Comparison of regression models, accuracy across all dataset

Regression model	MAE (Likert Scale)			MAPE (%)			Reliability
	Train set	Test set	Validate set	Train set	Test set	Validate set	
Multiple	0.50	0.48	0.47	15.94	16.08	16.89	R^2 = 49; Reliable
Polynomial	0.30	0.40	0.25	9.75	11.33	8.30	R^2 = 82; Reliable

การระบุปัจจัยที่ส่งผลกระตุ้นต่อความตั้งใจซื้อ

ผลการนำแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียล แบบขั้นบันได ซึ่งมีความถูกต้องในการทำนายค่าความตั้งใจซื้อสูงสุดมาระบุปัจจัยที่ส่งผลกระตุ้นต่อความตั้งใจซื้อพบว่า การมีวิถีชีวิตลดการบริโภคเนื้อสัตว์ การให้ความสำคัญกับคุณค่าด้านอารมณ์เรื่อง การออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่สวยงาม และความรู้สึกแปลกใหม่ที่เห็นผลิตภัณฑ์วางขาย คุณค่าด้านผลกระทบทางสังคมในแง่การหลุดพ้นจากการเอาตัวเองเป็นจุดศูนย์กลางเพื่อที่ช่วยเหลือคนอื่นและสิ่งแวดล้อม และคุณค่าด้านการใช้งานในแง่สามารถลดความเสี่ยงของภาวะโลกร้อน จะกระตุ้นความตั้งใจซื้อให้สูงขึ้นได้ (Table 7)

Table 7 Identification of key factors affecting intention to buy from polynomial regression model

Factor	Coefficient
Interaction between reduce meat consumption and aesthetics in package design.	+ 0.274
Contributed to self-transcendence.	+ 0.256
Interaction between contributed to reduce risk of global warming and surprise to see product on shelf.	+ 0.253

สรุป

ผู้บริโภค Generations Z และ Y จัดเป็นผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายเนื่องจากมีความตั้งใจซื้อข้าวสารและข้าวกล่องปรุงสุกพร้อมรับประทานที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในระดับสูง โดยผู้บริโภคกลุ่มนี้เชี่ยวชาญการดำรงชีวิตแบบดิจิทัลในทุกด้าน ให้ความสำคัญกับคุณค่าด้านการเปลี่ยนแปลงชีวิตมากที่สุด โดยเฉพาะเรื่องการมอบความหวังและทัศนคติในเชิงบวกเกี่ยวกับภาวะโลกร้อน และความภาคภูมิใจในตนเองที่ได้ช่วยเหลือสิ่งแวดล้อม ตามด้วยคุณค่าด้านการใช้งานคือ สามารถลดความเสี่ยงของภาวะโลกร้อนได้ นอกจากนี้พบว่าความตั้งใจซื้อของผู้บริโภคโดยรวมจะถูกกระตุ้นจากการมีบรรจุภัณฑ์ที่สวยงาม ความรู้สึกแปลกใหม่ที่เห็นผลิตภัณฑ์วางขาย การซื้อผลิตภัณฑ์นี้เสมือนการหลุดพ้นจากการเอาตัวเองเป็นจุดศูนย์กลางเพื่อที่ช่วยเหลือคนอื่นและสิ่งแวดล้อม และช่วยลดความเสี่ยงของภาวะโลกร้อน ดังนั้นการสื่อสารถึงผู้บริโภคกลุ่มนี้ในเรื่องความรู้ความเข้าใจในประโยชน์ของฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ควรใช้ช่องทางออนไลน์ผ่าน Social media ได้แก่ Facebook, Twitter และ Instagram เป็นต้น และสามารถกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผู้ประกอบการโดยมีเป้าหมายที่ผู้บริโภค Generations Z และ Y ดังนี้ (1) ออกแบบบรรจุภัณฑ์ให้มีสุนทรียภาพความงามและบ่งบอกถึงการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวงจรชีวิตของบรรจุภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์ติดฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อบ่งบอกว่าสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งคือมีการลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ได้ (2) เน้นการสื่อสารช่องทางออนไลน์ให้ผู้บริโภครับรู้ถึงตัวตนและความแปลกใหม่ของผลิตภัณฑ์โดยใช้ Content สนับสนุนผลิตภัณฑ์ที่มีฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อสร้างความหวังในการลดความเสี่ยงเรื่องภาวะโลก

ร้อน รวมถึงสร้างความภาคภูมิใจต่อตนเองที่ได้ช่วยเหลือสิ่งแวดล้อม (3) จัดทำกิจกรรมให้ผู้บริโภคได้มีส่วนร่วม เช่น แชร์รูปถ่ายคู่กับผลิตภัณฑ์โพสต์ลงทาง Social media พร้อมติดแฮชแท็กของกิจกรรม เพื่อรับถุงผ้าลดโลกร้อนที่ออกแบบมาอย่างมีสุนทรียภาพ (4) ใช้กลยุทธ์การจัดจำหน่ายแบบผสมผสานทั้งออฟไลน์และออนไลน์ โดยมุ่งเน้นทางทิศทางออนไลน์มากขึ้น และเสริมการใช้ Digital wallet เพื่อเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านในการให้ข้อมูล และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59

เอกสารอ้างอิง

ชนาทิป อ่อนหวาน. 2553. ความรู้ความเข้าใจและทัศนคติที่มผลต่อแนวโน้มพฤติกรรมการซื้อสินค้าที่มีฉลากคาร์บอนของผู้บริโภค ในเขตกรงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

รัตนาวรรณ มั่งคั่ง, แชบเบียร์ กีวาลา, งามทิพย์ ภู่วโรดม, สิรินทรเทพ เต้าประยูร. 2553. การวิเคราะห์และจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ข้าวสำหรับการติดฉลากคาร์บอนเพื่อสนับสนุนเศรษฐกิจ คาร์บอนต่ำ ในการบรรเทาภาวะโลกร้อน. รายงานโครงการวิจัยเสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. การคาดการณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในทุกสาขาเศรษฐกิจ. รายงานแผนปฏิบัติการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564 – 2573

สำนักงานบริหารและพัฒนาองค์ความรู้. 2562. เจาะเทรนด์โลก 2020. แหล่งที่มา https://web.tcdc.or.th/th/Articles/Detail/Trend-2020-Positive-Power, 30 เมษายน 2563.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [อบก.]. ม.ป.ป. คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/products_is/products_is.pnc, 30 เมษายน 2563.

Almquist, E., Senior, J., Bloch, N. 2016. The Elements of Value. Harvard Business Review.

Cochran, W.G. 1977. Sampling Techniques, 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc. New York, USA.

Feucht, Y., Zander, K. 2017. Consumers' Attitudes on Carbon Footprint Labelling: Results of the Susdiet Project. Thünen Working Papers 78, Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries.

Groening, C., Inman, J.J., Ross Jr, W.T.J.I.J.o.E.P., Making, D. 2015. The role of carbon emissions in consumer purchase decisions. International Journal of Environmental Policy and Decision Making 1: 261–296.

Guenther, M., Saunders C.M., Tait, P.R.J.C.M. 2012. Carbon labeling and consumer attitudes. Carbon Management Journal. 3: 445–455.

Hofmann, G., Thomas, G.J.I.M. 2008. Digital lifestyle 2020. IEEE MultiMedia 15: 4–7.

Malhotra, N.K. 2006. Basic Marketing Research: A Decision-making Approach, 2nd ed. Pearson/Prentice Hall, New Jersey, USA.

Neter, J., Wasserman, W., Hunter, M.H. 1990. Applied Linear Statistical Models. McGraw-Hill Education.

Tolppanen, S., Kang, J.J.J.o.C.P. 2020. The effect of values on carbon footprint and attitudes towards pro-environmental behavior. Journal of Cleaner Production. 124524.

The impact of lifestyle, value proposition, and brand origin toward purchase intention of Indonesian matcha latte among Muslim consumers in Bangkok metropolitan

Fitri Nur Jannati[a,*], Ajchara Kessuvan[a], Agung Putra Pamungkas[b]
[a]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[b]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agricultural Technology, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281, Indonesia.
*Corresponding author. E-mail address: fitrinur.j@ku.th

Abstract

This research aimed to study the Thai market potential for imported Indonesian matcha latte by conducting consumer research of Muslim consumers living in the Bangkok metropolitan. Data collection was carried out through a questionnaire survey of 316 Muslim respondents. Most respondents were students and company employees, 19–36 years old. Factor analysis was performed to categorize lifestyle variables into 5 factors: health concerned, thoughtful, explorative, socialized, and serene. Multiple regression analysis was used to analyze the effects of lifestyles, value propositions, and brand origin on Muslim consumer's intention to purchase Indonesian matcha latte. The results indicated that a socialized lifestyle and the emotional value of fresh, as well as the Indonesian brand image of having high-quality tea products, having a reliable halal certification, and concerning social welfare, gave positive effects on purchase intention of Indonesian matcha latte. The results would become a guideline for developing a marketing strategy to launch the imported Indonesian matcha latte products in Thailand market. It could be concluded that the value of trendy-fresh drinks and trustworthy brand image are needed to be addressed to attract Muslim consumers.

Keywords: Brand origin, Lifestyle, Matcha latte, Muslim consumer, Purchase intention

Introduction

Tea is one of the most consumed beverages around the world beyond water (Namita et al., 2012). Global tea consumption and production are projected to keep rising, driven by robust demand in developing and emerging countries. This will create income distribution opportunities in rural areas and improve food security in tea-producing countries (FAO, 2020). Currently, many tea industries have obtained advanced technology in production, not only the packaged-tea powder but also instant and ready-to-drink tea (Oktaviana et al., 2017). According to FAO (2018), Indonesia ranks 4th place in the world production of green tea. The tea industry in Indonesia significantly contributes to the national economy (Supartono et al., 2015). Despite its importance to the economy, the tea sector in Indonesia has been facing several problems such as low farm prices, weak extension services, limited market channels, difficult access to get loans, and low capability of farmer organization. A previous study on the Indonesian tea industry has mentioned that value-added was the most influential factor to provide better opportunities in commercializing tea products (Yuliando et al., 2015).

As the Indonesian tea industry expects to expand its business around the region, Thailand is one of the most attractive export markets. The beverage market in Thailand is expected to grow during the period 2019–2021, but the rate of growth will likely be fairly low (Yongpisanphob, 2019). Mongkol (2014) reveals that the younger generations in Thailand have become more sophisticated in consumer choices of beverages, and the urban consumers have focused on the health benefits (Oke et al., 2016). For the growing market opportunities in Thailand and sufficient tea production capacity in Indonesia, it is possible to export the tea beverage, particularly matcha latte from Indonesia to Thailand. However, a challenge for any new business is adapting to the fast-changing needs of the customers. To keep sustaining in the market, the food and beverage industry should adapt to consumer trends changing.

Value creation for customers is a critical task for marketers, particularly when developing new products or starting new businesses (Smith and Colgate, 2014). Brands represent consumers' perceptions and feelings about a product and its performance. The lifestyle concept can help marketers understand changing consumer values and how they affect buying behavior (Kotler et al., 2012). Muslims are the second-largest population in Thailand. In 2018 Thai Muslims aged 13 years and over account for more than 2.8 million populations (NSO, 2019). Therefore, to be successful in the potential market, Indonesian producers need to understand Muslims in Thailand about their lifestyle, the perceived value proposition of matcha latte, and brand origin image. A truly-understanding of factors affecting the consumers' purchase intention is a critical foundation to develop an effective marketing strategy. This research will examine the effects of lifestyle, value proposition, and brand origin image among Muslim consumers' in Thailand toward purchase intention of Indonesian matcha latte.

Material and Methods

Research instrumental development

The self-administered questionnaire was used as a research instrument in the study. The question items were developed based on the marketing theory, literature reviews of the prior research, and the in-depth interviews with 10 Thai Muslim consumers who experienced

drinking matcha latte. The questionnaire was initially drafted in English and translated into Thai using back translation methodology to assure the content validity. The final version of the English and Thai questionnaire was prepared to facilitate both Thai Muslim consumers and foreign Muslim consumers in Bangkok Metropolitan. The questionnaire was divided into five sections which were; 1) consumer demographics and consumption behaviors 2) consumer lifestyles 3) perceived value proposition 4) perceived image of Indonesian brand, and 5) purchase intention towards Indonesian matcha latte.

Sampling and data collection

The survey research using a structured-questionnaire was conducted by face-to-face interviews with 316 respondents. Purposive sampling was used in this study to focus on particular characteristics of Muslim consumers who ware experienced consuming matcha latte. The sample was taken in Bangkok Metropolitan. A pre-test of the questionnaire was carried out with 30 respondents to measure the reliability of the questionnaire using Cronbach's alpha coefficient. The alpha coefficient of .70 or higher was considered "acceptable" in social science research (Malhotra and Peterson, 2006). The value of .951 had been obtained and thus the questionnaire was reliable.

Data analysis

The data was analyzed by IBM SPSS Statistics version 24 with descriptive statistics, factor analysis, and multiple regression analysis. Descriptive statistics were used to elaborate demographics and consumption behaviors of consumers. Factor analysis was used to categorize the lifestyle variables into fewer numbers of factors. Finally, multiple regression analysis was performed to examine the effects of consumers' lifestyle, perceived value proposition, and perceived brand image toward the purchase intention of Indonesian matcha latte.

Results and Discussion

The demographics and consumption behaviors

The demographics and consumption behavior of 316 respondents were presented in Table 1. The majority of respondents, approximately 91%, were domiciled in Bangkok while others were staying in Nonthaburi, Nakhon Pathom, Samut Sakhon, Samut Prakan, and Pathum Thani. For Thai Muslim consumers, their locations were determined based on current residence. For foreign Muslim consumers, they should have lived in Bangkok metropolitan for at least 1 year. In general, more than half of the total respondents were female (58%). Most respondents were generation Y aging 24–40 years old (57%). Generation Y was the fastest-growing segment of the workforce, the most adaptive to change, ready to experiment with new technologies, and a high level of purchasing power in 2020 (Efrat, 2014). Regarding the occupation, major respondents were university students (66%), company employees (12%), and government and public enterprise officials (11%), respectively. Approximately a half of the total respondents obtained less than THB 15,000 monthly income.

Most respondents preferred buying matcha latte products in a cup (83%) followed by bottled ready-to-drink (12%) and instant matcha latte powder in sachet (5%). They were likely to buy matcha latte at a coffee shop/coffee stall either dine-in or take away (70%) and

convenience store (20%). They generally bought matcha latte originated from Thailand and Japan, accounted for 70% and 20%, respectively.

Table 1 Demographics and consumption behaviors

Attributes of demographics	Frequency	Percentage (%)	Attributes of consumption behaviors	Frequency	Percentage (%)
Gender			How to serve		
Male	133	42	In a cup	262	83
Female	183	58	Bottled ready to drink	37	12
			Instant matcha latte	17	5
Age			Place to buy		
17-23 years old	95	30	Coffee shop/coffee stall	222	70
24-40 years old	180	57	Convenience store	63	20
>40 years old	41	13	Hypermarket	12	4
			Supermarket	12	4
			Online channel	4	1
			Souvenir shop	2	1
Occupation			Origin of matcha latte		
University student	209	66	Thailand	213	54
Company employee	38	12	Japan	118	30
Government/public	35	11	Indonesia	27	7
enterprise official			China	13	3
Businessman	9	3	Vietnam	7	2
Housewife/retired	9	3	India	6	2
Others	16	5	Turkey	3	1
			Sri Lanka	2	1
			Do not know	5	1
Income					
≤ THB 15,000	152	48			
THB 15,000-	114	36			
25,000	47	15			
THB 25,001-	3	1			
40,000					
> THB 40,000					

The categorization of lifestyle variables by factor analysis

From the questionnaire, the 24 lifestyle variables were measured on a 5-point Likert scale. Factor analysis was performed to categorize the lifestyle variables into fewer numbers of factors. The variables showing a high level of correlation would be grouped into the corresponding factor. The result of factor analysis indicated that 24 lifestyle variables could be reduced into 5 factors: Health-concerned, Thoughtful, Explorative, Socialized, and Serene, as shown in Table 2.

Table 2 Lifestyle factors

Lifestyle factors	Variables
1. Health concern	- I always try to find time to exercise. - I am a hardworking person. - Before purchasing a beverage, I collect information related to the beverage product that I want to buy. - I concern about health. - I am careful of what I eat to keep myself healthy. - I think halal certification from any country is the same.
2. Thoughtful	- A halal label is a must for beverage product. - I enjoy trying international beverage product. - I like paying attention to product advertisements on social media rather than mass media. - I consider the brand of the product when buying a beverage. - I am willing to pay for more quality.
3. Explorative	- I like to spend a lot of time with friends. - I like to surf the internet. - I like nature while traveling on vacation. - If beverage products don't have a halal label, I could choose by its ingredient on the label.
4. Socialized	- I am a social trendsetter by creating something new. - I am a mood swing person. - I usually buy specialty beverage for my family and friend. - Friends or relatives influence my purchasing decision. - People come to me more often than I come to them to find out information about a brand.
5. Serene	- I prefer staying at home rather than going outdoors. - I have a pet and do gardening. - I like something that anti-mainstream. - I prefer to drink more natural beverage.

Factors affecting the purchase intention on the Indonesian matcha latte

In this section, the multiple regression analysis had been used to examine the antecedents of consumer's intention to purchase Indonesian matcha latte. The independent variables (Xs) were consumer's lifestyle (5 factors), perceived value proposition (20 variables), and perceived brand image (13 variables), while the dependent variable (Y) was the purchase intention. All of the independent variables were measured by using 5-points Likert scale range from 1 "strongly disagree" to 5 "strongly agree", while the dependent variable scales from 1 "definitely no intention at all" to 5 "definitely high intention". Based on the literature reviews, the following hypotheses were formulated for this study:

H1: The purchase intention on Indonesian matcha latte was related to consumers' lifestyle.

H2: The purchase intention on Indonesian matcha latte was related to the perceived value proposition.

H3: The purchase intention on Indonesian matcha latte was related to the perceived brand image.

Regarding the multiple regression analysis, the r squared value obtained was 53.4% with a significant value (*p*-value) of 0.000, which was satisfied. For the social science research,

the value of r squared around 50% was sufficient (Moksony, F. & Heged, R., 1990). Five basic assumptions in multiple regression had been successfully fulfilled which were: 1) the data was normally distributed, 2) no correlations between error terms evidenced by a 1.939 Durbin-Watson value, 3) no outlier since all standardized residual values were less than 4, 4) the data had a constant variance, and 5) no multicollinearity evidenced by all VIF value was less than10. Therefore, all assumptions were valid.

Fig. 1 displayed the results of the hypotheses testing model of the relationships between the independent variables (consumer's lifestyle, perceived value proposition, Indonesian brand image) and the dependent variable (purchase intention). The significant values at 95% confidence interval (P-value < 0.05) and directions were presented.

The result of multiple regression analysis indicated 7 significant relationships. In conclusion, three hypotheses were supported. The number in parenthesis indicated the coefficient value for each independent variable, while the number in the square bracket was the significant value (P-value). For H1, the socialized lifestyle positively affected the purchase intention of the Indonesian matcha latte. The Muslim consumers who were trendy, socially focused, outgoing, and being influenced by others had high potential for purchasing the Indonesian matcha latte. For H2, fresh taste experienced value positively influenced the intention to purchase. It could be concluded that the functional value of the fresh taste of the matcha latte would become the unique value proposition to satisfy the need of Muslim consumers. However, both the emotional value of high-class personality and the perceived price of matcha latte showed negative impacts on the purchase intention. Consumers who had an intention to purchase Indonesian matcha latte did not come from the high-class society and they think the price was quite expensive. For H3, the belief in Indonesian brand image including high-quality tea-based products, reliable halal certification, and concerning social welfare would drive the purchase intention on the Indonesian matcha latte.

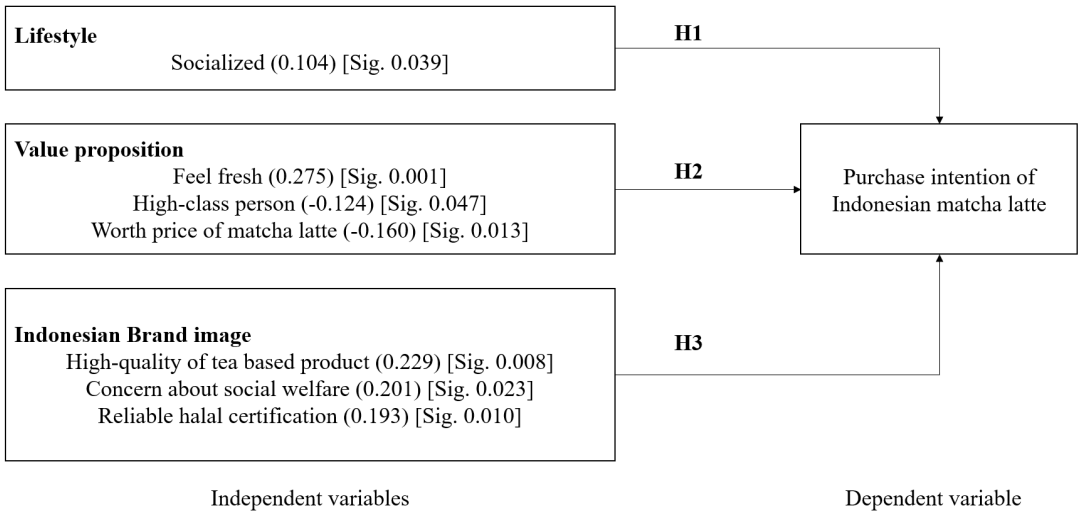


Fig. 1 The hypothesis testing model

Research implications

The research findings had given managerial implications to the Indonesian matcha latte business. These findings would become a guideline for developing a marketing strategy to encourage the decision to purchase Indonesian matcha latte among Muslim consumers in Thailand. The results from this study indicated that the purchase intention of Indonesian matcha latte would increase from the understanding of Muslim consumer's socialized lifestyle, the emotional value of fresh taste, brand image of high-quality product, the brand image of reliable halal certification, and brand image of social welfare concerned. The managerial implications that had been drawn from this study ware proposed as illustrated in Table 3.

Table 3 Managerial implications

Components	Implications	Actors
Consumer preference to buy matcha latte at a coffee shop in cup	- Target the coffee shop owner as potential customers - Pack the matcha latte in bulk size	- Indonesian Matcha latte business (marketing, R&D, and production department)
Socialized lifestyle	- Create a social activities-related marketing campaign - Use brand ambassador and reference groups such as Youtuber, blogger, and social media influencers - Use Word of Mouth and Web of Mouth communication strategy	- Indonesian Matcha latte business (marketing department) - Distributor and trader in Thailand
The emotional value of feeling a fresh taste	- Design a product concept of a refreshing drink of matcha latte - Packaging design with green color and tea leaves image - Design a brand position aligned with a product concept	- Matcha latte business (marketing and R&D department)
The brand image of high-quality tea-based products	- Strengthen the brand image and create a perception of Indonesian matcha latte - Develop the unique value proposition related to quality - Quality assurance for standardization	- Matcha latte business (marketing, R&D, and quality department) - Farmers
The brand image of reliable halal certification	- Using traceability system on the product label - Provide information about the Indonesian Ulema Council (MUI) to ensure reliability	- Matcha latte business (production and regulatory affairs department) - Government (MUI)
The brand image of social welfare concerned	- Implement Corporate Social Responsibility (CSR) program about social welfare - Create awareness on the social welfare concerns of brand position	- Matcha latte business (marketing and management)

Regression analysis was only one statistical technique. It provided a valuable tool for measuring and estimating the cause-and-effect relationship among variables. The regression analysis had considerably simpler when compared to some of the other algorithms. Despite its usefulness, the technique of regression analysis suffered from the limitation to fit complex datasets properly. In most real-life, the relationship between the variables of the dataset was not linear and hence a straight line could not fit the data properly. Marketing strategy development could not rely on only the regression results. Further researches were needed that considering more factors and using other statistical techniques. Therefore, a more comprehensive marketing strategy could be designed.

Conclusion

Muslim consumers generally preferred to buy matcha latte at coffee shop/coffee stall either dine-in or take away. The more socialized the consumers' lifestyle, the more intention to purchase matcha latte. The emotional value of fresh drink also drives more intention to buy. The Indonesian brand image of having high-quality tea products, having a reliable halal certification, and concerning social welfare were antecedents of purchase intention. Thus, the value of trendy-fresh drinks, developing the right product concept regarding its value, strengthening a trustworthy brand image, and establishing cooperation with Thai matcha latte businesses ware needed to be addressed to attract Muslim consumers in Thailand.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgment

Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

References

Efrat, Z. 2014. World's Top Global Mega Trends to 2020 and Implications to Business, Society and Cultures. Powerpoint Slides. http://www. bar-oriyan. com/Portals/0/mega% 20trands% 20exec% 20summary% 20v3, 20(1), 3 December 2020.

Food and Agriculture Organization (FAO). 2018. Committee on Commodity Problems, Intergovernmental Group of Tea. http://www.fao.org/3/BU642en/bu642en.pdf, 2 May 2020.

Kotler, P., Armstrong, G., Ang, S.H., Leong, S.M., Tan, C.T., Ho-Ming, O. 2012. Principles of Marketing: an Asian Perspective. 3rd ed. Pearson Education South Asia. Singapore.

Malhotra, N.K., Peterson, M. 2006. Basic marketing research: A decision-making approach. Prentice hall. New Jersey, USA.

Moksony, F., Heged, R. 1990. Small is beautiful. The use and interpretation of R2 in social research. Szociológiai Szemle. Special issue: 130–138.

Mongkol, K. 2014. Integrated marketing communication to increase brand equity: the case of a thai beverage company. International Journal of Trade, Economics and Finance 5: 445–448. doi:10.7763/ijtef.2014.V5.413.

Namita, P., Mukesh, R., Vijay, K.J. 2012. Camellia sinensis (green tea): A review. Global journal of pharmacology 6: 52–59. doi: 10.12691/ajfn-2-5-2.

National Statistical Office (NSO). 2019. Statistical Yearbook Thailand 2019. http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/pubs/e-book/SYB-2562/files/assets/basic-html/index.html#1, 3 May 2020.

Oke, A.O., Kamolshotiros, P., Popoola, O.Y., Ajagbe, A.M., Olujobi, J.O. 2016. Consumer behavior towards decision making and loyalty to particular brands. International Review of Management and Marketing 6: 43–52.

Oktaviana, N., Masyhuri, M., Hartono, S. 2017. Competitiveness of tea exports in Asean: A constant market share analysis. Ilmu Pertanian (Agricultural Science) 1: 088. doi: 10.22146/IPAS.10662.

Smith, J.B., Colgate, M. 2014. Customer value creation: A practical framework. Journal of Marketing Theory and Practice 15: 7–23. doi:10.2753/mtp1069-6679150101.

Supartono, W., Sukartiko, A.C., Yuliando, H., Kristanti, N.E. 2015. Possibility of some indigenous spices as flavor agent of green tea. Agriculture and Agricultural Science Procedia 3: 62–66. doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.014.

Yongpisanphob, W. 2019. Thailand Industry Oulook 2019-21: Beverage Industry. https://www.krungsri.com/bank/getmedia/94a68184-ab67-4b62-9f28-caf1ee688796/IO_Beverage_190503_EN_EX.aspx, 21 July 2020.

Yuliando, H., Erma, K.N., Cahyo, S.A., Supartono, W. 2015. The strengthening factors of tea farmer cooperative: Case of Indonesian tea industry. Agriculture and Agricultural Science Procedia 3: 143–148. doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.028.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
Subject: Agro-Industry

ภาคโปสเตอร์
Poster Presentation

คุณสมบัติของสีผสมอาหารจากดอกคำฝอย

Properties of safflower food colorant

ปฏิมาภรณ์ พลแสน[a], อรุษา เชาวนลิขิต[a]*, พรภัสสร จุฬาลักษณานุกูล[b]

Patimaporn Ponsan[a], Arusa Chaovanalikit[a]*, Pornpassorn Chulalaksananukul[b]

[a]คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

[b]ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[a]Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok 26120, Thailand.

[b]Department of food technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: arusa@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด 2 ชนิด (น้ำ และ เอทานอลเข้มข้น 50%) และอัตราส่วนการสกัด (1:5 และ 1:10) ที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติทางกายภาพและปริมาณสารฟลาโวนอยด์ของผงสีดอกคำฝอย รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของผงสีดอกคำฝอยระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 45 วันที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ผงสีดอกคำฝอยมีความชื้น 4.09–7.00% และมีปริมาณฟลาโวนอยด์ 1,056.4–2,577.4 mg/100g ผงสีที่สกัดได้จะมีสีเหลืองมีค่า Hue angle อยู่ระหว่าง 78.24–85.00 โดยผงสีที่สกัดด้วยน้ำในอัตราส่วน 1:5 จะสกัดสารฟลาโวนอยด์ได้มากที่สุด เมื่อเก็บผงสีเป็นเวลา 45 วันที่อุณหภูมิห้องพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณฟลาโวนอยด์ของผงสีลดลง

คำสำคัญ: การสกัด, ค่าสี, ดอกคำฝอย, ปริมาณฟลาโวนอยด์, สีผสมอาหาร

Abstract

This research studied the effect of two extraction solvents (water and 50% ethanol) and the different extraction ratio (1:5 and 1:10)on raw material and extraction solvent on physical properties and flavonoid content of the extracted safflower powders as well as change of the powders during storage at room temperature for 45 days. The moisture contents and flavonoids contents of the powder were 4.09–7.00% and 1,056.4–2,577.4 mg/100g, respectively. The colorant gave a yellow color and the hue angle of the colorant was 78.24–85.00. The highest flavonoid content was found in the powder extracted by water in the extraction ratio of 1:5. Color differences value (ΔE) of all samples were increased while the flavonoids content were decreased after 45-day storage at room temperature.

Keywords: color value, extraction, flavonoid content, food colorant, safflower

คำนำ

สีเป็นลักษณะที่แสดงคุณภาพของสินค้า และทำให้ผู้บริโภคตัดสินใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้สีสังเคราะห์ในผลิตภัณฑ์เนื่องจากสีสังเคราะห์มีความคงตัวสูง อย่างไรก็ตามการใช้สีสังเคราะห์ในระยะเวลานานจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของผู้บริโภค (Stevenson et al., 2007) สีสังเคราะห์ในกลุ่มสีเหลือง เช่น tartrazine และ sunset yellow FCF มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตในสัตว์ทดลอง โดยพบว่าหนูกินอาหารที่มีสีสังเคราะห์ทั้งสองตัวที่ความเข้มข้นสีละ 5% เป็นเวลา 14 วัน จะมีการเจริญเติบโตช้ากว่าปกติ ขนร่วง และตายถึง 50% (Ershoff et al., 1977) ดังนั้นการพัฒนารงควัตถุธรรมชาติจะเป็นทางเลือกที่ดีและปลอดภัย

ดอกคำฝอย (*Carthamus tinctorius* Linn) เป็นดอกไม้จากพืชล้มลุก และจัดเป็นสมุนไพรที่ใช้ในตำรับยาพื้นบ้าน (สุดารัตน์, 2552) ดอกคำฝอยมีสารรงควัตถุสีเหลือง จากสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี เช่น สาร hydroxysafflor yellow A, safflor yellow B, safflomin C, isosafflomin C, pre-carthamine, anhydrosafflor yellow B และ carthamidin และมีรงควัตถุสีแดงไม่ละลายน้ำ เช่น Carthamin ซึ่ง Carthamin เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยา oxidation ของ pre-carthamine (Cho et al., 2000; Kazuma et al, 2000) นอกจากนี้มีรายงานสารประกอบฟีนอลิกที่พบในดอกคำฝอย เช่น epigallocatechin, gallocatechin อนุพันธ์ของ 4-hydroxybenzhydrazide 2-amino-3,4-dimetylbenzoic acid, naringin, ferulic acid, chlorogenic acid (Yu et al., 2013) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของตัวทำละลายในการสกัด 2 ชนิดได้แก่น้ำและเอทานอลเข้มข้น 50% และผลของอัตราส่วนการสกัด 2 ระดับ (1:5 และ 1:10) ต่อคุณสมบัติของผงสีที่ผลิตจากกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 45 วัน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ดอกคำฝอยแห้งซื้อมาจากบริษัทโกลบอล เจเนติกส์ จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร บรรจุในถุงพลาสติกและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือนก่อนนำไปสกัดสี

การสกัดดอกคำฝอย

การสกัดโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายทำโดยชั่งดอกคำฝอยแห้งและเติมน้ำในอัตราส่วน 1:5 (w/v) หรือ 1:10 (w/v) จากนั้นต้มของผสมที่ได้ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 45 นาที แล้วกรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกกากและนำสารสกัดสีที่ได้ไปผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย (การสกัดทั้งสองอัตราส่วนทำซ้ำ 3 ครั้ง)

การสกัดดอกคำฝอยโดยใช้เอทานอลเข้มข้น 50% เป็นตัวทำละลายทำโดยชั่งดอกคำฝอยและเติมเอทานอลเข้มข้น50% ในอัตราส่วน 1:5 (w/v) หรือ 1:10 (w/v) จากนั้นทิ้งของผสมไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วกรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกกาก นำสารสกัดไประเหยเอทานอลด้วยเครื่อง Hot plate stirrer (HP-EGO 1500, EGO,Germany) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที และนำสารสกัดที่ได้ไปผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย (การสกัดทั้งสองอัตราส่วนทำซ้ำ 3 ครั้ง)

กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

เติม Maltodextrin DE10 (Chemipan Coporation Co., Ltd, Thailand) ลงไปในสารสกัดสีที่ได้ในสัดส่วน 17% (w/v) (เทียบเท่า 20 ºBrix) จากนั้นตัวอย่างจะถูกทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer, SDE-5 EURO Serial NO.962, Euro Best Technology Co., Lt., Thailand) โดยกำหนดอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 150 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลมร้อนขาออก 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของตัวอย่าง 3.5 มิลลิลิตรต่อนาที และ อัตราการไหลของอากาศ 150 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ผงสีดอกคำฝอยบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์แบบสุญญากาศแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 45 วัน และนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (วันที่ 0, 7, 14, 28 และ 45 วัน)

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

ร้อยละผลผลิตที่ได้ (%yield) = (น้ำหนักของผงสีดอกคำฝอย/น้ำหนักของดอกคำฝอยแห้ง) X 100

ปริมาณความชื้น -วิเคราะห์ปริมาณความชื้นโดยใช้เครื่องวัดความชื้นแบบรังสีอินฟาเรด (MA 150, Sartorius, Germany)

ค่าสี (ค่า L*, a*, b* , Chroma, Hue angle และคำนวณค่า ΔE) -วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดสี Colorflex EZ spectrophotometer (Color Flex EZ, Hunter lab, USA) ที่ระบบ CIE ที่ illuminant D65 mode 45 องศา/0 องศา โดยวัดค่า L*, a*, b*, Chroma, Hue angle และคำนวนค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของผงสีดอกคำฝอยที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0, 7, 14, 28 และ 45 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

ค่าการละลาย - วัดด้วยวิธีมาตรฐานของ มผช. 168/2556

การวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (Total Flavonoids content) (ดัดแปลงจากวิธี ของ Zhishen et al., 1999)

ละลายผงสีดอกคำฝอยที่ได้ 15 กรัมในน้ำ 100 มล. และผสมสารละลายที่ได้ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตรกับน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมไนไทรท์เข้มข้น 5% (w/v) ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตร และทิ้งไว้ 6 นาที จากนั้นเติมสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์เข้มข้น 10% (w/v) ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตรและทิ้งไว้ 6 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4% ปริมาตร 2 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรสุดท้ายให้เป็น 5 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งไว้อีก 15 นาทีที่อุณหภูมิห้อง นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 510 นาโนเมตรด้วยเครื่อง UV Spectrometer (Unico S-2150UV Model S-2150UV 2150 Series, Unico,USA) คำนวณค่าเทียบกับกราฟมาตรฐานและแสดงผลออกมาเป็นมิลลิกรัมสมมูลของ quercetin ต่อ 100 กรัมของสารสกัด (mg QE/100g crude extract)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ค่าเฉลี่ย, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ๆ, ผลกระทบของชนิดของตัวทำละลายและอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อตัวทำละลายต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (วิเคราะห์ด้วย Two-way ANOVA), การเปลี่ยนแปลงของปริมาณ ฟลาโวนอยด์ และสีของผงสีที่สกัดตัวทำละลาย 2 ชนิดและอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบกับตัวทำละลายระหว่างการเก็บรักษา (วิเคราะห์ด้วย Three-way ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ย(ใช้วิธี

วิเคราะห์ Tukey's A Test) โดยใช้ โปรแกรม SPSS (รุ่น 26.0 , IBM ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายและอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและตัวทำละลายต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงสีดอกคำฝอยพบว่า ผลผลิตของผงสีที่ได้อยู่ระหว่าง 46.79-96.18% ผงสีมีความชื้น 4.09-7.00% และมีอัตราการละลายถึง 99% ตัวทำละลายและอัตราส่วนการสกัดมีผลต่อร้อยละผลผลิตและความชื้นของผงสีดอกคำฝอยอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Table 1) ผงสีที่สกัดด้วยน้ำจะให้ร้อยละผลผลิตมากกว่าผงสีที่สกัดด้วยเอทานอล โดยเฉพาะผงสีที่สกัดด้วยน้ำในอัตราส่วนการสกัด 1:10 ให้ผลผลิตมากที่สุดเนื่องจากในกระบวนการผลิตต้องมีการปรับ Brix ก่อนเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย และในการทดลองจะเติมมอลโตเด็กซ์ทริน 17% (w/v ของสารสกัด) ดังนั้นผงสีที่สกัดด้วยน้ำ (1:10) มีปริมาณตั้งต้นของสารสกัดสูงจึงเติมมอลโตเด็กซ์ทรินเป็นปริมาณมากกว่าสูตรอื่น และส่งผลให้ผลผลิตที่ได้มีปริมาณสูง

ดอกคำฝอยมีรงควัตถุสีเหลือง (carthamidin) ที่สามารถละลายได้ดีในน้ำ (water soluble) ปริมาณ 29.59% และรงควัตถุสีแดง (carthamine) ที่ไม่ละลายน้ำ (water insoluble) ปริมาณ 0.77% (Machewad et al., 2012) ซึ่งทั้ง carthamidin และ carthamine จัดเป็นกลุ่มของ ฟลาโวนอยด์ (Kazuma et al., 2000) โดยเฉพาะ carthamine เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยา oxidation ของ pre-carthamine ที่เป็นหนึ่งในรงควัตถุสีเหลืองของดอกคำฝอย (Cho et al., 2000; Kazuma et al., 2000)

จาก Table 2 และ 3 แสดง ผงสีดอกคำฝอยที่ผลิตจากการสกัดโดยใช้น้ำหรือสกัดโดยเอทานอลเข้มข้น 50% ให้ผงสีเหลือง ซึ่งสีเหลืองธรรมชาติที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสีของรงควัตถุกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่ไม่ละลายน้ำ ในขณะที่ผงสีเหลืองจากดอกคำฝอยจะละลายน้ำได้ดี ซึ่งค่า Hue angle ของผงสีอยู่ระหว่าง 78.24-85.00 ค่า L*, b* และ Hue angle ของผงสีทั้งหมดมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผงที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำในอัตราส่วน 1:5 จะได้ผงสีเหลืองเข้มที่มีค่า L=53.44, b* = 48.38, ค่า Chroma =49.42 ในระดับต่ำสุด ในขณะที่มีค่า a*=10.10

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า อัตราส่วนการสกัดมีผลต่อปริมาณฟลาโวนอยด์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Table 3) ปริมาณฟลาโวนอยด์ของผงสีดอกคำฝอยของผงสีที่สกัดได้อยู่ระหว่าง 1056.41- 2,577.41 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม สอดคล้องกับ Ji et al. (2018) ที่รายงานปริมาณสารฟลาโวนอยด์ของดอกคำฝอยอยู่ที่ 2,060 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของดอกคำฝอย ผงสีดอกคำฝอยที่สกัดโดยน้ำจะมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์สูงว่าการสกัดโดยเอทานอล 1.3-1.7 เท่า และการใช้อัตราส่วน 1:5 จะสามารถสกัดปริมาณสารฟลาโวนอยด์ได้สูง คาดว่าเกิดจากสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในดอกคำฝอยจะละลายในน้ำได้ดีกว่าเอทานอล มีรายงานว่า ดอกคำฝอยมีสารรงควัตถุสีเหลืองจากสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ประมาณ 20-30% เช่น สาร hydroxysafflor yellow A, safflor yellow B, safflomin C, isosafflomin C, pre-carthamine, anhydrosafflor yellow B และ สาร Carthamidin และมีสารประกอบฟีนอลิก อื่น ๆ เช่น epigallocatechin, gallocatechin อนุพันธ์ของ 4-hydroxybenzhydrazide 2-amino-3,4-dimetylbenzoic acid, naringin, ferulic acid, chlorogenic acid (Cho et al., 2000; Kazuma et al., 2000; Yu et al., 2013)

เมื่อเก็บรักษาผงสีเป็นเวลา 45 วันพบว่า ระยะเวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสี(ΔE) และปริมาณฟลาโวนอยด์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Fig. 1 และ Fig.2) โดยการเปลี่ยนแปลงของสีของผงสีที่สกัดด้วยน้ำ (1:5) มีการเปลี่ยนแปลงมากถึง 40 เท่า ตามด้วยผงสีที่สกัดด้วยเอทานอล(1:5) มีเปลี่ยนแปลงถึง 26 เท่า ผงสีที่สกัดด้วยน้ำในอัตราส่วน (1:10) เปลี่ยนแปลงถึง 20 เท่า และผงสีที่สกัดด้วยเอทานอล (1:10) มีเปลี่ยนแปลงถึง 13 เท่า ซึ่งการสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณฟลาโวนอยด์ ซึ่งการสลายตัวของฟลาโวนอยด์อาจเกิดจากการเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Sandra et al., 2018) อย่างไรก็ตามจาก Fig.2 ปริมาณฟลาโวนอยด์ของผงสีที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำ (1:5) ยังมีค่าสูงสุดตลอดการเก็บรักษา 45 วัน อีกทั้งการลดลงของปริมาณฟลาโวนอยด์ของผงที่สกัดด้วยเอทานอล (17-23%) ค่อนข้างใกล้เคียงกับผงสีที่สกัดด้วยน้ำ (21–23%) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Shin and Yoo (2012) ที่พบว่า สีจากดอกคำฝอยโดยเฉพาะสีเหลืองมีความคงตัว เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

Table 1 The effect of the extraction ratio of dried safflower and extraction solvent on Yield, Moisture and Solubility percentage of safflower colorant

Solvent	Extraction ratio	Yield (%)	Moisture (%)	Solubility (%)
Water	1:5	47.66±3.39^{c}	4.09±0.21^{c}	98.74±0.21^{a}
	1:10	96.18±1.24^{a}	4.92±0.28^{c}	99.39±0.12^{b}
Ethanol 50%	1:5	46.79±2.08^{c}	6.00±0.35^{b}	99.42±0.15^{b}
	1:10	63.80±0.63^{b}	7.00±0.68^{a}	99.45±0.14^{b}

* $^{a-c}$ Values (mean± SD) in the same column with different superscripted letters are significantly different ($p < 0.05$)

Table 2 The effect of the extraction ratio of dried safflower and extraction solvent on L* a* b* value of safflower colorant

Solvent	Extraction ratio	The appearance of color powder	L*	a*	b*
Water	1:5		53.44±1.32^{d}	10.10±0.22^{a}	48.38±1.10^{d}
	1:10		61.27±1.10^{c}	7.13±0.11^{b}	52.48±0.18^{c}
Ethanol 50%	1:5		65.90±0.16^{b}	7.51±0.05^{b}	61.02±0.43^{b}
	1:10		71.84±0.03^{a}	5.46±0.27^{c}	62.30±0.07^{a}

* $^{a-d}$ Values (mean± SD) in the same column with different superscripted letters are significantly different ($p < 0.05$)

Table 3 The effect of the extraction ratio of dried safflower and extraction solvent on Hue angle, Chroma and Flavonoid content of safflower colorant

Solvent	Extraction ratio	Hue angle	Chroma	Flavonoid content (mg QE/100g powder)
Water	1:5	78.24±0.51^{d}	49.42±1.02^{c}	2577.41±4.95^{a}
	1:10	82.27±0.14^{c}	52.95±0.17^{b}	1850.14±4.24^{c}
Ethanol 50%	1:5	82.98±0.90^{b}	61.49±0.42^{a}	1911.62±6.36^{b}
	1:10	85.00±0.25^{a}	62.54±0.06^{a}	1056.41±1.41^{d}

* $^{a-d}$ Values (mean± SD) in the same column with different superscripted letters are significantly different ($p < 0.05$)

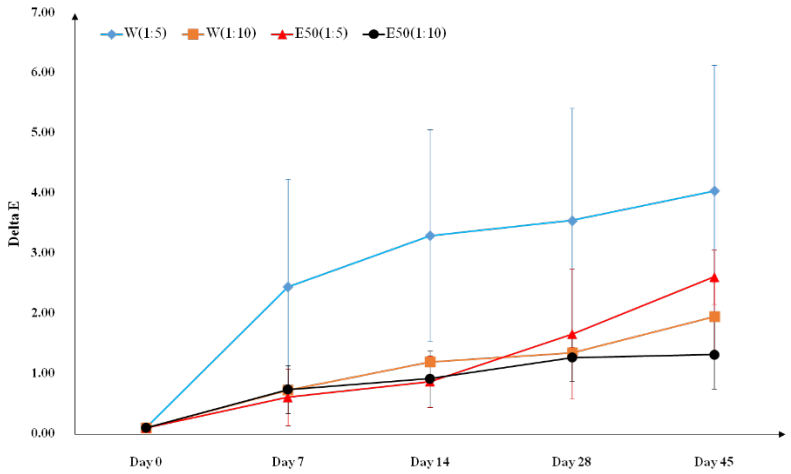


Fig. 1 Color differences value (ΔE) of safflower powder at room temperature for 45 day

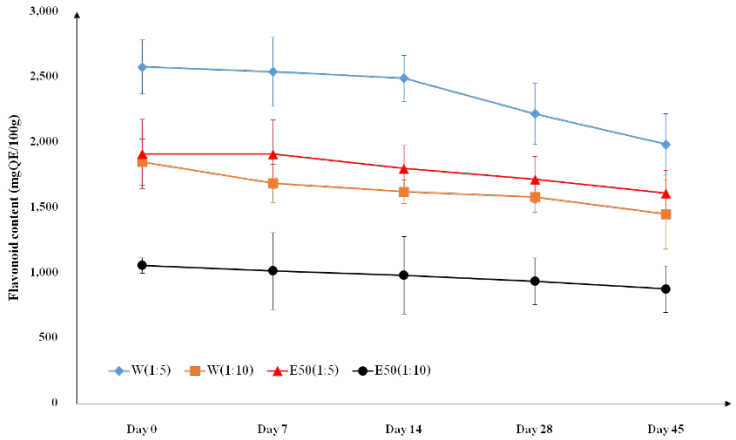


Fig. 2 Flavonoid Content (mg QE/100g crude extract) of safflower powder at room temperature for 45 day

สรุป

การสกัดผงสีจากดอกคำฝอยด้วยน้ำและเอทานอลเข้มข้น 50% จะให้ผงสีที่มีสีเหลือง มีค่า Hue angle อยู่ระหว่าง 78.24–85.00 มีความชื้น 4.09–7.00% มีอัตราการละลาย 98.74–99.45% โดยผงสีที่สกัดด้วยน้ำ (1:5) จะมีสีเหลืองเข้ม โดยมีค่า L=53.44 และ มีปริมาณฟลาโวนอยด์ =2,577 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม เมื่อเก็บรักษาผงสีไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 วัน พบว่าปริมาณฟลาโวนอยด์ลดลงในผงสี ระหว่าง 17–23% ทำให้การเปลี่ยนแปลงของสีมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟลาโวนอยด์ของผงสีที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำ (1:5) ยังมีค่าสูงสุดตลอดการเก็บรักษา 45 วัน ซึ่งการลดลงของสารฟลาโวนอยด์การสลายตัวของฟลาโวนอยด์อาจเกิดจากการเกิดจากปฏิกิริยา ออกซิเดชั่น (Sandra et al., 2018) ดังนั้นการศึกษาการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณของสารประกอบฟลาโวนอยด์ในผงสีดอกคำฝอย โดยเฉพาะการสกัดด้วยน้ำจะทำให้สามารถพัฒนาสีผสมอาหารจากดอกคำฝอยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

สุดารัตน์ หอมหวล. 2552. ฐานข้อมูลเรื่องยาและสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. http://www. thaicrudedrug.com/main.php, 2.ธันวาคม 2563.

Cho, M.H., Paik, Y.S., Hahn, T.R., 2000. Enzymatic conversion of precarthamin to carthamin by a purified enzyme from the yellow petals of safflower. Journal of Agricultual Food Chemisty 48: 3917–3921.

Ershoff, B.H. 1977. Effects of diet on growth and survival of rats fed toxic levels of tartrazine (FD & C Yellow No. 5) and sunset yellow FCF (FD & C Yellow No. 6). Journal of Nutrition 107: 822–8.

Ji, Y., Guo, S., Wang, B., Yu, M. 2018. Extraction and determination of flavonoids in *Carthamus tinctorius*. Open Chemistry 16: 1129–1133.

Kazuma, K., Takahashi, T., Sato, K., Takeuchi, H., Matsumoto, T., Okuno, T. 2000. Quinochalcones and flavonoids from fresh florets in different cultivars of *Carthamus tinctorius* L. Bioscience, Biotechnology and Biocehmistry 64: 1588–1599.

Lou, S., Hsu, Y., Ho, C. 2014. Flavonoid compositions and antioxidant activity of calamondin extracts prepared using different solvents. Journal of Food and Drug Analysis 22: 290–295.

Machewad, G.M., Ghatge, P., Chappalwar, V., Jadhav, B., Chappalwar A. 2012. Studies on extraction of safflower pigments and its utilization in ice Cream. Journal of Food Processing Technology 3: 1–3.

Sandra, E.M., Medina, H.I., Costa, Geison M., Aragón, Marcela. 2018. Optimization of flavonoid extraction from *Passiflora quadrangularis* leaves with sedative activity and evaluation of its stability under stress conditions. Revista Brasileira de Farmacognosia 28: 610–617.

Shin, Y., Yoo, D.I. 2012. Storage stability and color reproducibility of yello and red dyes extracted from *Carthamus tinctorius* L. Textile Colration and Finishing 24: 165–172.

Stevenson, J. 2007. Major study indicates a link between hyperactivity in children and certain food additives. https://www.southampton.ac.uk/news/2007/09/hyperactivity-in-children-and-food-additives.page,13 June 2019.

Sun, C., Wu, Z., Wang, Z., Zhang, H. 2015. Effect of ethanol/water solvents on phenolic profiles and antioxidant properties of beijing propolis extracts. Evidence-based complementary and alternative medicine http://dx.doi.org/10.1155/2015/595393.

Tran, T.T.A., Nguyen, H.V.H. 2018. Effects of spray-drying temperatures and carriers on physical and antioxidant properties of lemongrass leaf extract powder. Beverages 84 (4). http://doi.org/10.3390/beverages4040084

Yu, Seok-Yeong, Lee, Young-Jun, Kim, Jong-Dai, Kang, Suk-Nam, Lee, Seong-Kap, Jang, Jung-Young, Lee, Hyu-Ku, Lim, Jeong-Ho, Lee, Ok-Hwan. 2013. Phenolic composition, antioxidant activity and anti-adipogenic effect of hot wat extract from safflower *(Carthamus Tinctorius L.*). seed. Nutrients 5(12): 4894–4907.

Zemour, K., Labdelli, A., Adda, A., Dellal, A., Talou, T., Merah, O. 2019. Phenol content and antioxidant and antiaging activity of safflower seed oil (*Carthamus Tinctorius* L.). Cosmetics 6: 1–11.

Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W. 1999. The Determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry 6: 555–559.

Overall migration of water-hyacinth and areca leaf plates for single-use food containers

Busarin Chongcharoenyanon*, Atiya Prateep Na Thalang, Nutthida Chalodech, Titaphorn Tansiri
Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: busarin.cho@ku.th

Abstract

This research focused on the overall migration of chemical substances from water hyacinth leaf plate and areca leaf plate. These food containers have been commercialized to substitute the single-use plastic plates. However, information about the overall migration related to the safety and organoleptic properties of the contained food is limited. The migration testing was conducted as stated in Commission Regulation (EU) No. 10/2011 with food simulants, 10% ethanol, 3% acetic acid, and isooctane, under the worst foreseeable conditions of use at 70 °C for 2 hours (OM3). The compression testing was performed to indicate the containment function. The results of migration testing of all samples were higher than the overall migration limit, 10 mg/dm^2. Isooctane, simulant of oily foods, severely extracted the components of samples resulting in the highest overall migration. The lowest overall migration was observed for the samples extracted by 3% acetic acid, representing the acidic foods. The result of the compression testing showed a great decrease in load after being used, referring to the loss of containment integrity. The sample should be used as single-use food containers in milder conditions for the safety of consumers.

Keywords: Areca leaf, Food contact material, Migration, Safety, Water hyacinth

Introduction

Nowadays, restaurant operators and consumers are concerned about single-use plastic waste which causes environmental problems. The food containers from single-use plastic such as plastic boxes, plates, and cups have short usage time, but they persistently remain in both terrestrial and marine environments. Therefore, alternative materials such as biodegradable materials are developed. The containers obtained from the processing of plant components such as water hyacinth and areca leaves are available in the market.

Water hyacinth has broad, thick, glossy ovate leaves. The leaves are usually 10 - 20 cm across and float above the water surface on long bulbous stalks. It grows rapidly and produces dense mats that can clog water bodies (Jones et al., 2018). However, it is widely used for phytoremediation, pollution reduction by plants. Many studies show that water hyacinth can remove heavy metal from wastewater and river (Gupta, 1980; Chunkao et al., 2012). It is also a good source of biomass for biofuels (Arefin et al., 2021). Many countries in tropical areas use water hyacinth as handicraft materials (Chunkao et al., 2012; Rakotoarisoa et al., 2016). Recently, water hyacinth leave became material for a food container in Thailand. It is an alternative material to reduce single-use plastic waste.

Areca leaf plate is made of areca sheath. It has good tensile strength and slow biodegradation. With high cellulose content, it is used as pulp for paper production, decorative veneer panel, and picture mounts (Kalita et al., 2008). Lately, due to technological innovations, it has become possible to put leaf sheaths for better use for manufacturing leaf plates, bowls, and spoons of different dimensions. These products are biodegradable and eco-friendly. Areca leaf plates are gaining demand especially in many states in India where plastic-based goods are banned (Patil et al., 2019).

Not only the biodegradability but also the function as food containers of natural materials products are attractive to the consumer. However, from the safety aspect, most of the products have not been evaluated for chemical migration, a phenomenon in which chemical substances from the food contact materials are transferred to food. According to Article 3, General requirements in the Regulation (EC) No. 1935/2004 on materials and articles intended to come into contact with food states that all food contact materials, under normal or foreseeable conditions of use, do not transfer their constituents to food in quantities which could: (a) endanger human health; or (b) bring about an unacceptable change in the composition of the food, or (c) bring about a deterioration in the organoleptic characteristics thereof. So, the food container should be examined to verify the compliance with the mentioned regulation (The European Parliament and the Council of the European Union, 2004).

This research focused on the migration testing of food containers from biodegradable materials. The overall migration of chemical substances from the food containers can reflect the quality of the contained food in terms of safety and organoleptic characteristics. Two types of biodegradable products that were commercialized in Thailand were selected, water hyacinth leaf plate and areca leaf plate. The safety of the samples was assessed by the overall migration testing. The migration testing was conducted as stated in Commission Regulation (EU) No. 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. The food simulants were chosen to cover the condition of use with aqueous, acidic, and oily foods. The overall migration condition 3 (OM3), at 70°C for 2 hr, was set to simulate the worst foreseeable

condition of use of the products. The OM3 represents the intended condition of use for the single-use food containers which was any contact conditions that include heating up to 70°C for up to 2 hr, or up to 100°C for up to 15 minutes, which are not followed by long term room or refrigerated temperature storage. Compression testing of the samples after subjecting to food simulants was performed to determine the structural integrity of bio-based plates.

Materials and Methods

Sample materials

Biodegradable food container samples commercialized in Thailand were selected. Water hyacinth leaf plate and areca leaf plate were directly purchased from a local producer in Ayutthaya province and Loei province, respectively. The obtained containers were used as received. The water hyacinth leaf plate composed of a sandwich-like-structure, the most outer and the most inner layers were the fresh whole leaves, and the middle layer was the dried pulp of chopped water hyacinth leaves and banana stems. All the layers were adhered together by glue made from cassava starch. Heat and pressure from the leaf plate making machine is applied to the structure to form the plate. The areca leaf plate is made of a single layer of the sheath. The leaf plate making machine is also used for the processing of the plates. The samples were kept at room temperature in plastic bags to avoid environmental contamination before the experiment.

Migration test

The overall migration testing was conducted according to the Commission Regulation (EU) No. 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. Although the samples were made of natural material, the condition of use as the food containers generally resembles the single-use plastics. So, the safety assessment protocol for plastic food containers mentioned in the Commission Regulation (EU) No. 10/2011 was applied. Three types of food simulant were selected as described in Table 1. The chemical substances from the sample materials were extracted by the food simulants at the overall migration condition 3 (OM3), at 70°C for 2 hr. In the case of food simulant D2 substitute, isooctane, the corresponding conventional condition for the substitute tests was 40°C for 30 min (European Committee for Standardization, 2002).

After extraction, an aliquot of extracted simulant was evaporated to until dried and the remained extractable substances, i.e., migrants were weighted. Food simulants were filled in the beakers to perform blank samples. All experiments were done in triplicate. The results of the migration were reported as the average quantity of migrants in milligrams per square decimeter of the sample (mg/dm^2).

The Commission Regulation (EU) No.10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food is applied for this research. Although the subject samples were natural materials, the actual condition of use resembles the single-use-plastic. Besides, there is no generally accepted regulation to control the safety of natural materials as food contact materials. So, the Commission Regulation (EU) No. 10/2011 which regulates the safety of plastic and biobased plastic is a reasonable approach.

Table 1 Food simulant for migration testing

Food simulant	Abbreviation	General assignment of food simulants to foods
Ethanol 10 % (v/v)	Food simulant A	Foods that have a hydrophilic character and are able to extract hydrophilic substances that have a pH above 4.5.
Acetic acid 3 % (w/v)	Food simulant B	Foods that have a hydrophilic character and are able to extract hydrophilic substances that have a pH below 4.5.
Isooctane	Food simulant D2 substitute	Foods that have a lipophilic character and are able to extract lipophilic substances that contain free fats at the surface

Source: The European Commission, 2011

Compression test

A compression test was performed by a compression tester, model 17-76 (Testing machine. Inc.) to indicate the loss of integrity of the container. The samples were prepared by contacting the food simulants in the same conditions with the overall migration testing. This preparation represented the actual usage of the food containers. The samples without the preparation were the control samples. All samples were tested by the column crush testing mode.

Results and Discussion

Overall migration

The intended application of the natural plate matched the overall migration condition 3 (OM3) with 3 types of food simulant. The overall migrations of water hyacinth leaf plates were in the range of 72.333 to 228.7273 mg/dm^2. While areca leaf plates gave the lower migration in the range of 23.1555 to 34.0770 mg/dm^2 (Fig. 1). The obtained overall migration of all samples was higher than the overall migration limit at 10 mg/dm^2 which did not comply with the Commission Regulation EU No. 10/2011. The overall migration of hyacinth leaf plates was higher than the one of areca leaf plates for all types of food simulants. The solubilities of components in each type of samples were the main factor that effect the overall migration in the same condition. The extracted components were the chemical substances from the leaves and the materials that were applied during the processing. In the case of the hyacinth leaf plates, the main extracted component was cassava starch glue.

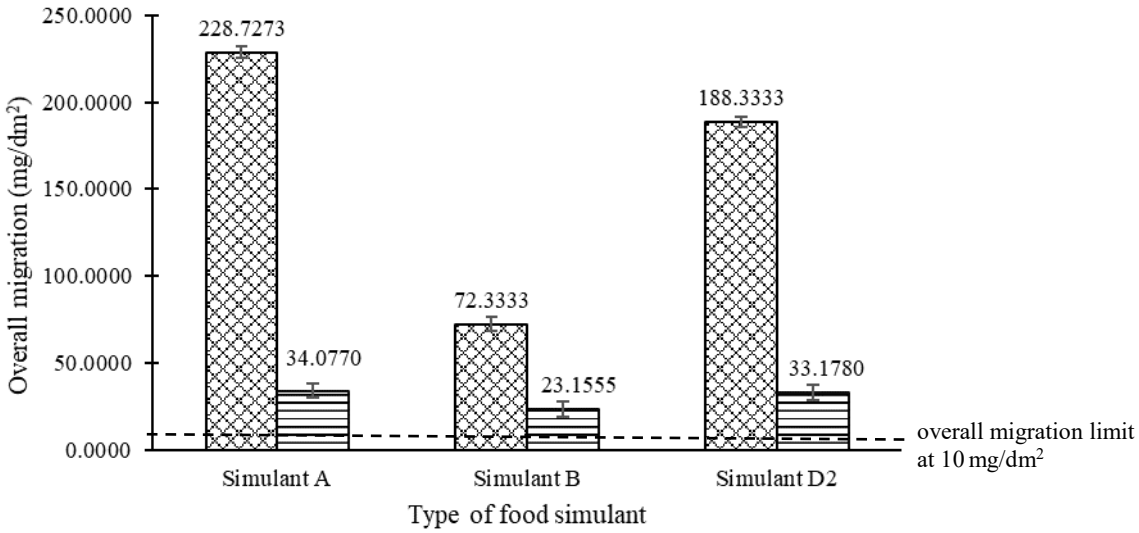


Fig. 1 Overall migration of chemical substances from water hyacinth leaf plate; ▨ and areca leaf plate; ▤ .

The sample tested with simulant A, 10% ethanol, gave the highest value of the overall migration. The values indicated the most incompatible to the foods that have a hydrophilic character and are able to extract hydrophilic substances that have a pH above 4.5. These foods including fresh vegetables, fresh fish, fresh crustaceans, the meat of all zoological species (including poultry and game), fried potatoes, pizza, sauce, etc. While the samples tested with isooctane gave the second most value of overall migration. Isooctane, simulant D2 simulate the foods that have a lipophilic character and can extract lipophilic substances that contain free fats at the surface such as fruit, vegetables and meat preserved in an oily medium, nuts in paste or cream form, animals and vegetable fats and oils, mayonnaise, coconut-based sauces, etc. The most promising application was the condition with simulant B, 3% acetic acid, which represents foods that have a hydrophilic character and are able to extract hydrophilic substances that have a pH below 4.5. These foods are soft drinks, juice, fruit and vegetable puree, coffee, beer, vinegar, etc. However, the physical appearance of both Hyacinth and Areca leaf plates were more distorted when subjected to 3% acetic acid solution, compared to 10% ethanol solution due to the severity of simulants. The appearance of hyacinth leaf plates and areca leaf plates with and without extraction showed in Fig. 2 and Fig. 3, respectively.



Fig. 2 Appearance of hyacinth leaf plates. I: without extraction, II: with simulant A, 10% ethanol, III: with simulant B, 3% acetic acid, IV: with simulant D2, isooctane.



Fig. 3 Appearance of areca leaf plates. I: without extraction, II: with simulant A, 10% ethanol, III: with simulant B, 3% acetic acid, IV: with simulant D2, isooctane.

Compression testing

A compression test was performed to demonstrate the containment function of the natural food container. The samples after the actual use simulation deformed. The deformation can be seen by the physical appearance. The compression testing result (Fig. 4) expressed in maximum load (N) was a parameter to indicate the strength reduction. In control samples, without extraction, the sample of water hyacinth leaf plates and areca leaf plates showed the highest maximum load at 70.07 ± 3.66 N and 382.00 ± 6.24 N, respectively. In general, areca leaf plates are harder than water hyacinth leaf plates due to the nature of the material. However, the strength of samples after contacted with simulant A were reduced to the same level. The strength of the samples after contact with Simulant B, 3% acetic acid was the least among all samples, i.e., simulant B was the most destructive solution to use with these food contact materials. All of the samples absorbed the food simulant which caused materials to soften and reduce the strength of the structure. This phenomenon imitated the actual use of the container.

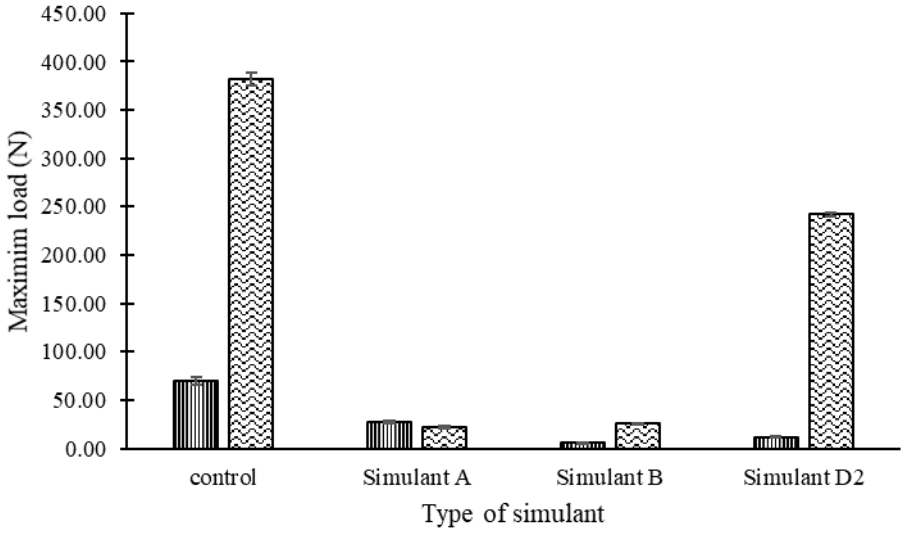


Fig. 4 Maximum load of water hyacinth leaf plates; and areca leaf plates; .

Conclusion

Migration test was conducted on water hyacinth leaf and areca leaf plate to evaluate the safety as food contact material. Simulant A, B and D2 simulated the actual usage with foods

of water hyacinth leaf and areca leaf plates by penetrated and extracted the material components. The obtained overall migration of all samples was higher than the overall migration limit at 10 mg/dm^2 which did not comply with the Commission Regulation EU No. 10/2011. The overall migration of hyacinth leaf plates was higher than the one of areca leaf plates for all types of food simulants. The appearance and strength during and after contact with food simulant were dramatically reduced, indicated the reduction of integrity as a food container. The results of this research will make the manufacturer and the user aware of the safety of natural food containers. The sample should be used in milder conditions. The appropriate condition of use should be further investigated to promote the use of environmentally friendly food contact materials.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

References

Arefin, M.A., Rashid, F., Islam, A. 2021. A review of biofuel production from floating aquatic plants: an emerging source of bio-renewable energy. Biofuels, Bioprod. Bioref. https://doi.org/10.1002/bbb.2180

Chunkao, K., Nimpee, C., Duangmal, K. 2012. The King's initiatives using water hyacinth to remove heavy metals and plant nutrients from wastewater through Bueng Makkasan in Bangkok, Thailand. Ecol. Eng. 39: 40–52. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.09.006

European Committee for Standardization. 2002. Materials and articles in contact with foodstuffs — Plastics — Part 1: Guide to the selection of conditions and test methods for overall migration BS EN 1186-1:2002. doi.org/10.3403/02571183

Gupta, G. 1980. Use of Water Hyacinths in wastewater treatment (A Brief Literature Review). J. Environ. Health. 43: 80-82. http://www.jstor.org/stable/44537520, 19 January 2021.

Jones, J.L., Jenkins, R.O., Haris, P.I. 2018. Extending the geographic reach of the water hyacinth plant in removal of heavy metals from a temperate Northern Hemisphere river. Sci. Rep. 8, 11071. doi.org/10.1038/s41598-018-29387-6

Kalita, P., Dixit, U.S., Mahanta, P., Saha, U.K. 2008. A novel energy efficient machine for plate manufacturing from areca palm leaf sheath. J. Sci. Ind. Res. 67: 807–811.

Patil K.K.R., Chinnappa, B., Manjunatha, G.R., Sowmya, H.S. 2019. Eco-friendly Arecanut leaf sheath products: An economic analysis. Indian J. Ecol. 46: 431–436.

Rakotoarisoa, T.F., Richter, T., Rakotondramanana, H., Mantilla-contreras, J. 2016. Turning a problem into profit: Using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for making handicrafts at Lake Alaotra, Madagascar. Econ. Bot. 70: 365–379.

Poovarodom, N. 2007. Food Packaging. S.P.M. Printing Company Limited, Bangkok, Thailand. [in Thai]

Poovarodom, N. 2015. Food Contact Material: Safety and Regulations. Afro Ape Company Limited, Bangkok, Thailand. [in Thai]

The European Commission. 2011. Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. OJ L. 12: 1–89

The European Parliament and the Council of the European Union. 2004. Regulation (EC) No 1935/2004 of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004 on materials and articles intended to come into contact with food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/EEC. OJ L. 338: 4–17

Nutritional values, physical properties and antioxidant property of okara flour in comparison to wheat flour and rice flour

Wasinee Somrit, Uthaiwan Suttisansanee, Chaowanee Chupeerach, Rungrat Chamchan, Chanakan Khemthong, Nattira On-nom*
Institute of Nutrition, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: nattira.onn@mahidol.ac.th

Abstract

Okara (soybean residue) is a by-product from soymilk industry which is a rich source of dietary fiber, protein, and phytochemicals. The aim of this study was to determine the nutritional values, physical properties, antioxidant activities, and bioactive compound of okara flour (OF) by comparing with wheat flour (WF) and rice flour (RF). The results showed that the water activity and moisture content of OF was significant different ($p < 0.05$) with WF and RF. The color of OF has the highest redness and yellowness values whereas RF has the highest lightness value. Water solubility index of OF was higher than RF but lower than WF, while water absorption index of OF was the highest value. The pasting properties of OF were lower than WF and RF. Moreover, the nutritional values of OF were 455.34 kcal, 24.03 g protein, 16.26 g fat, 53.23 g carbohydrate and 53.23 g dietary fiber per 100 g which were significantly higher than WF and RF except carbohydrate. Furthermore, OF presented significantly higher total phenolic contents, total flavonoid contents and antioxidant activities than WF and RF. Therefore, OF could be a potential source of protein and fiber used to enrich nutritional values and functional benefits of food products.

Keywords: Antioxidant activities, Fiber content, Flours, Soybean residue, Total phenolic content

Introduction

Soybean residue (okara) is the by-product produced during soybean (*Glycine max* L.) processing of soymilk (Colletti et al., 2020). It has been widely used especially in Asian countries with high soybean consumption. One kilogram of soybean yields 1.1-1.2 kg of okara. Due to high moisture content, large amount of okara has been discarded as waste. Okara is a waste product and usually used as an animal feed in farm, dumped in landfills, or even burnt that results in pollution problem. However, okara considers as a rich source of nutrients such as 9-10% moisture, 22% proteins, 55% fiber, 1.5% ash, and 13–15% fats and oils. (Vong and Liu, 2016). Moreover, okara contains a chemical compound which play a role in physiological and therapeutic function especially antioxidant activity. Okara also presents a function related in health benefits. Yin et al. (2019) reported that okara can help improve blood glucose in type 2 diabetes because it contains high dietary fiber which results in slow down postprandial blood glucose. In addition, several studies showed that high fiber and protein in okara helps reduce cholesterol and hyperlipidemia, prevent cardiovascular disease, improve metabolic syndrome, and increase intestinal functions.

Baked product is normally made with vary flours such as wheat flour (WF) and rice flour (RF). However, the increasing consumer demand for nutritious, health food has made the food industries examine their own resources to discover and take advantage of functional ingredients. Several studies showed the useful of okara flour (OF) in baked product which results in an improving of nutritional profile and health-promoting. However, the comparison of WF, RF and OF on nutritional values, physical properties and antioxidant property have not been studied. Thus, the objective of this study was to determine and compare the nutritional values, physical properties, antioxidant activities, and bioactive compound of WF, RF and OF in order to obtain the information on the potential ingredients for future food product development.

Materials and Methods

Materials

Okara was obtained as a by-product of soymilk production (*Glycine max* L.) from soymilk shop. Raw ingredients including wheat flour (United Flour Mill Public Co., Ltd.) and rice flour (CHO HENG RICE vermicelli factory Co., Ltd.) were purchased from supermarket in Salaya, Nakhon Pathom. All chemicals and reagents used in this study were purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA).

Preparation of okara flour

Okara flour (OF) was prepared according Nile et al. (2020) and Guimarães et al. (2018) with some modification. Wet okara was dried in cabinet dryer at 65 ± 5°C for 24 hr or until moisture content at 8% by dry weigh. Dried okara was grinded and sieved through 80 mesh screen. The OF was packed in aluminum foil bag and stored at -20ºC for further study.

Determination of physical qualities

Water activity

The water activity (a_w) of flours were measured using a water activity analyzer (model ms 1, Novasina, Switzerland) at room temperature (25 ± 1°C). The sample was packed in the equilibrium chamber and placed inside the analyzer for 20 min then water activity of the sample was record.

Water solubility index (WSI) and Water absorption index (WAI)

The water absorption index was determined as according to Anderson et al. (1999) with some modification. Briefly, mixing 1.25 g of flours and 20 ml of distill water together in 50 ml centrifuge tube. Then, the sample was placed in water bath at 30°C for 30 min and centrifuged at 3000xg for 10 min at 25°C. The supernatant was decanted into petri dish of known weight and dried at 105°C until steady weight to obtain the data for WSI calculation. The sediments remained in the centrifugal tube were weighed and the data obtained were calculated for WAI determination. WSI and WAI were calculated in Equation 1 and 2:

$$\text{WSI (\%)} = \frac{\text{weight of dried supernatant}}{\text{weight of dried sample}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{WAI } \left(\frac{\text{g}}{\text{g}}\right) = \frac{\text{weight of sediment}}{\text{weight of dried sample}} \quad (2)$$

Color measurement

The color parameters of flour were measured by using Hunter Lab Digital Colorimeter. The CIE color values were recorded as L*, a* and b* where L* values range from black (0) to white (100), a* values range from green (-60) to red (+60), and b* values range from blue (-60) to yellow (+60).

Pasting properties

The rapid visco-analyzer (RVA) was used to determine pasting properties according to Barrera et al. (2013). Powder sample of 2.5 g was weighed in RVA canisters followed by addition of 25 ml of water. The idle temperature was set at 50°C and the following 12.5 min test profile was run:(1) held at 50°C for1.0 min, (2) linearly ramped up to 95°C in 3.8 min, (3) held at 95°C for 25 min, (4) linearly ramped down to 50°C in 3.8 min and (5) held at 50°C for 1.4 min. Peak viscosity (PV), breakdown (BD), final viscosity (FV), setback (SB) and peak time (PT) were determined.

Nutritional values

The nutritional values were determined according to AOAC (2016) including of carbohydrate, protein, fat, total dietary fiber (soluble dietary fiber and insoluble dietary fiber) and moisture content. The calorie content was calculated based on the contents of protein, fat and carbohydrate.

Total phenolic contents, total flavonoid content and antioxidant activities

Approximately 0.5 g of sample was mixed with (10 mL) 40% (v/v) aqueous ethanol. After thoroughly mixing (1 min) with Vortex mixer, the mixture was heated in the water bath for 2 hr at 50°C. The residue was extracted after it was re-mixed and centrifuged at 4600 rpm for 15 min at 4°C. The clear supernatant was separated for the analysis of total phenolic contents (TPCs) using the Folin-Ciocalteu colorimetric method (Ainsworth and Gillespie, 2007) and the results were expressed in µg gallic acid equivalents per gram dry weight of the sample (µg GAE/g DW). The total flavonoid contents (TFCs) were analyzed using the aluminium chloride colorimetric method (Sen et al., 2013) and the results was expressed as µg of quercetin equivalent per gram of dry weight of sample (µg QE/g DW). Moreover, the antioxidant activity was determined using the DPPH-radical scavenging assay (Fukumoto and Mazza, 2000), ORAC (oxygen radical absorbance capacity) assay (Ou et al., 2001) and FRAP assays (Benzie and Strain, 1996). The results were expressed as µmol Trolox equivalents per 100 g dry weight of sample (µmol TE/ 100g DW) for DPPH, while the results of ORAC and FRAP assays were expressed as µmol Trolox equivalents per g dry weight of sample (µmol TE/g DW).

Statistical analysis

Experimental data was performed in triplicates and analyze using computer software (IBM SPSS statistics version 19.0 IBM, Chicago, Illinois, USA). One-way Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test were performed to compare mean value. The significance differences all tests were considered at $p < 0.05$.

Result and Discussion

Physical qualities

Table 1 and 2 showed the physical qualities of OF, RF and WF. Water activity of RF and WF was significantly higher than OF ($p < 0.05$). However, water activity of all flours were lower than 0.7 which can prevent yeast and mold growth (Rawat and Darappa, 2015). Water absorption measures the amount of water absorbed by starch that can be used as an index of gelatinization (Anderson et al., 1969). The greater the WAI, the greater the number of available hydroxyl groups to form hydrogen bonds with water (Clerici and El-Dash, 2008). RF and WF presented the significantly higher WAI than OF. High WAI is suitable for soups, meat products and baking products which help retaining moisture in the structure of products. Different flour types showed different WSI values. RF showed the lowest WSI among all flour types while WF showed the highest WSI. Yu et al. (2012) concluded that WSI depends on the nature of the major composition of flour. For color measurement, OF had the lowest L* which indicated that it was darker in color than RF and WF. The a* and b* values of OF were the highest thus, OF has more red tint and yellowish tone than RF and WF. The RVA pasting properties of all flours were shown in Table 2. RF had the highest peak viscosity (PV), trough (TV), breakdown (BD), final viscosity (FV) and setback (SB) than OF and WF. The results indicated that the higher amount of protein reduced the pasting properties of flour. This is due to the existence and interaction of protein (Dautant et al., 2007). The PV often correlate with final product qualities.

Flour with the higher PV reported to produce the acceptable textural quality (Otegbayo et al., 2006). In addition, the lower SB in OF is an indication of starch stability (Awolu, 2018).

Table 1 Physical properties of okara flour (OF), rice flour (RF), and wheat flour (WF)

Physical properties	Flours		
	OF	RF	WF
Water activity (A_w)	0.38 ± 0.004[b]	0.48 ± 0.003[a]	0.48 ± 0.005[a]
WSI (%)	2.25 ± 0.28[b]	1.58 ± 0.52[c]	2.98 ± 0.64[a]
WAI (g/g)	8.29 ± 0.16[a]	2.04 ± 0.17[b]	1.89 ± 0.21[b]
Color			
L*	82.61 ± 0.23[c]	89.22 ± 0.22[a]	86.52 ± 0.18[b]
a*	1.32 ± 0.03[a]	-0.34 ± 0.01[c]	0.24 ± 0.01[b]
b*	12.59 ± 0.15[a]	3.45 ± 0.03[c]	7.24 ± 0.06[b]

[a,b,c] different letters mean statistically significant difference ($p < 0.05$) in the same row. All data were represented as mean ± SD.

Table 2 Pasting properties of okara flour (OF), rice flour (RF), and wheat flour (WF)

Pasting properties	Flours		
	OF	RF	WF
Peak viscosity (RVU)	269.00 ± 27.20[b]	553.11 ± 21.06[a]	305.02 ± 10.55[b]
Trough (RVU)	178.64 ± 18.01[b]	408.64 ± 22.85[a]	180.83 ± 2.34[b]
Breakdown (RVU)	90.36 ± 14.77[b]	144.47 ± 6.46[a]	124.19 ± 10.63[a]
Final viscosity (RVU)	272.58 ± 13.06[c]	849.17 ± 15.78[a]	342.03 ± 23.71[b]
Setback (RVU)	93.94 ± 9.46[c]	440.53 ± 10.69[a]	161.19 ± 25.80[b]
Peak time (min)	5.99 ± 0.15[a]	6.11 ± 0.16[a]	6.16 ± 0.07[a]

[a,b,c] different letters mean statistically significant difference ($p < 0.05$) in the same row. All data were represented as mean ± SD.

Nutritional values

The nutritional values of OF, RF and WF presented in Table 3. OF shows the higher dietary fiber than RF and WF because it is the main constituents of okara. Total dietary fiber of OF including soluble dietary fiber (2.71%) and insoluble dietary fiber (50.52%) which was similar with Vong and Liu (2016). Dietary fiber was reported to play important role in prebiotic effects, regulation of cancer, and obesity-related metabolic syndrome (Pérez-López et al., 2018). In addition, OF also contains higher amount of fat and protein than RF and WF. This

could be explained that OF was produced from soybean seed with a high proportion of fat and protein (Voss et al., 2018). The presence of higher fat content results in higher values of energy. However, the nutritional values of OF relies on cultivars and procedure of extraction (Kamble and Rani, 2020). RF and WF contain 78.16% and 74.96% carbohydrates, respectively which are their basic component. The low amount of fat and dietary fiber in RF and WF due to the polishing (Naves, 2007). In contrast to RF, WF had significantly higher protein values because wheat contains higher protein than other major cereals (Eurostat, 2002). The moisture content of OF was significantly lower than RF and WF. However, moisture content of all flours was in the safe for consumption criteria as according to the guideline for quality control in Thai regulations (Thai Industrial Standards Institute, 2007).

Table 3 Nutritional values of okara flour (OF), rice flour (RF), and wheat flour (WF)

Nutritional values	Flours		
	OF	RF	WF
Energy (kcal/100g)	455.34 ± 2.87^{a}	347.41 ± 1.55^{c}	350.84 ± 0.64^{b}
Protein (%)	24.03 ± 0.25^{a}	7.49 ± 0.12^{c}	10.58 ± 0.05^{b}
Fat (%)	16.26 ± 0.44^{a}	0.48 ± 0.29^{c}	0.93 ± 0.02^{b}
Carbohydrate (%)	53.22 ± 0.52^{c}	78.16 ± 0.07^{a}	74.96 ± 0.13^{b}
Total dietary fiber (%)	53.23 ± 0.69^{a}	0.68 ± 0.03^{b}	0.34 ± 0.02^{c}
Moisture content (%)	6.62 ± 0.15^{b}	10.84 ± 0.06^{a}	10.84 ± 0.08^{a}

^{a,b,c} different letters mean statistically significant difference ($p < 0.05$) in the same row. All data were represented as mean ± SD.

Determination of antioxidant and bioactive compound properties

In this study, TPCs, TFCs and antioxidant activity using DPPH, FRAP, ORAC assays of OF, RF and WF were determined and shown in Table 4. The results exhibited that OF had significantly higher TPC and TFC than RF and WF ($p < 0.05$). This was explained that okara contains isoflavone which has important biochemical activities (Ibidapo et al., 2019). For antioxidant activities, it found that OF had higher antioxidant activities than RF and WF when using FRAP and ORAC assay. In addition, these data suggested that TPCs and TFCs was positively correlated with antioxidant activities which were found in many plants (Ghanbari et al., 2015). Therefore, it seemed that OF is a good source of nutrients. Their functional properties can be used to utilize and improve nutritive values in a new food product development.

Table 4 TPCs, TFCs and antioxidant activities of okara flour (OF), rice flour (RF), and wheat flour (WF)

Properties	Flours		
	OF	RF	WF
TPCs (µg GAE/g DW)	1406.00 ± 112.11[a]	201.68 ± 10.56[b]	142.22 ± 12.78[b]
TFCs (µg QE /g DW)	1190.47 ± 33.11[a]	593.74 ± 33.81[c]	780.00 ± 66.30[b]
Antioxidant activities			
DPPH (µmol TE/100g DW)	0.27 ± 0.02[b]	0.22 ± 0.02[c]	0.39 ± 0.03[a]
FRAP (µmol TE/g DW)	21.78 ± 1.78[a]	6.34 ± 0.38[c]	12.68 ± 1.22[b]
ORAC (µmol TE/g DW)	49.25 ± 3.73[a]	11.99 ± 1.12[c]	24.04 ± 1.15[b]

[a,b,c] different letters means significant difference ($p < 0.05$) in the same row. All data were represented as mean ± SD.

Conclusion

The physicochemical properties such as pasting properties, water solubility index and water absorption index of OF were different from WF and RF, indicating different possible applications. However, a high amount of dietary fiber and protein were found in OF, which confers to it interesting nutritional characteristics. In addition, OF showed higher bioactive compound and antioxidant property than WF and RF. Therefore, OF could be used as a functional ingredient in food product development.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This work was supported by Institute nutrition Mahidol University.

Reference

Ainsworth, E.A., Gillespie, K.M. 2007. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent. Nat. Protoc. 2: 875–877. doi.org/10.1038/nprot.2007.102.

Andersson, A., Andersson, R., Autio, K., Åman, P.J. 1999. Chemical composition and microstructure of two naked waxy barleys. J. Cereal. Sci. 30: 183–191. doi.org/10.1006/jcrs.1999.0267.

Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V., Griffin, J. 1969. Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion cooking. Cereal Sci. Today. 14: 4–12. doi.org/10.1002/star.19700220408.

AOAC. 2016. Official Methods of Analysis of AOAC International, 20th ed. Association of Official Analytical Chemist, Gaithersburg, MD, USA.

Awolu, O.O. 2018. Rheological evaluation of cocoyam-bambara groundnut-xanthan gum composite flour obtained from the optimization of its chemical composition and functional properties. Rheology: Open Access. 2: 2–9.

Barrera, G.N., Bustos, M.C., Iturriaga, L., Flores, S.K., León, A.E., Ribotta, P.D. 2013. Effect of damaged starch on the rheological properties of wheat starch suspensions. J. Food Eng. 116: 233–239. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.020.

Benzie, I.F., Strain, J.J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay. Anal. Biochem. 239: 70–76. doi.org/10.1006/abio.1996.0292.

Clerici, M.T.P.S., El-dash, A.A. 2008. Technological properties of pre-gelatinized rice flour obtained by thermoplastic extrusion. Cienc. e Agrotecnologia. 32: 1543–1550. doi.org/10.1590/S1413-70542008000500028 .

Colletti, A., Attrovio, A., Boffa, L., Mantegna, S., Cravotto, G. 2020. Valorisation of By-products from soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Processing. Molecules. 25: 2129. doi.org/10.3390/molecules25092129.

Dautant, F.J., Simancas, K., Sandoval, A.J., Müller, A.J. 2007. Effect of temperature, moisture and lipid content on the rheological properties of rice flour. J. Food Eng. 78: 1159–1166. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.028.

Eurostat. 2002. Agricultural Statistical Yearbook. Statistical Office of the European Union. Luxembourg.

Fukumoto, L.R., Mazza, G. 2000. Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. J. Agric. Food Chem. 48: 3597–3604. doi.org/10.1021/jf000220w

Ghanbari, R., Zarei, M., Ebrahimpour, A., Abdul-Hamid, A., Ismail, A., Saari, N. 2015. Angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory and anti-oxidant activities of sea cucumber (*Actinopyga lecanora*) hydrolysates. Int. J. Mol. Sci. 16: 28870–28885. doi.org/10.3390/ijms161226140.

Guimarães, R.M., Silva, T.E., Lemes, A.C., Boldrin, M.C.F., da Silva, M.A.P., Silva, F.G., Egea, M.B. 2018. Okara: A soybean by-product as an alternative to enrich vegetable paste. LWT. 92: 593–599. doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.058.

Ibidapo, O., Henshaw, F., Shittu, T., Afolabi, W. 2019. Bioactive components of malted millet (*Pennisetum glaucum*), Soy Residue "okara" and wheat flour and their antioxidant properties. Int. J. Food Prop. 22: 1886–1898. doi.org/10.1080/10942912.2019.1689998.

Kamble, D.B., Singh, R., Rani, S., Pratap, D. 2019. Physicochemical properties, in vitro digestibility and structural attributes of okara-enriched functional pasta. J. Food Process. Preserv. 43: 1–9. doi.org/10.1111/jfpp.14232.

Naves, M.M.V. 2007. Chemical and nutritive characteristics of rice. Bol. Cent. de Pesqui. de Process. de Aliment. 25: 55–60. doi.org/10.5380/cep.v25i1.8394.

Nile, S.H., Nile, A., Oh J-W, Kai, G. 2020. Soybean processing waste: Potential antioxidant, cytotoxic and enzyme inhibitory activities. Food Biosci. 38: 100778. doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100778.

Otegbayo, B., Aina, J., Asiedu, R., Bokanga, M. 2006. Pasting characteristics of fresh yams (*Dioscorea spp.*) as indicators of textural quality in a major food product-pounded yam. Food Chem. 99: 663–669. doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.08.041.

Ou, B., Hampsch-Woodill, M., Prior, R.L. 2001. Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. J. Agric. Food Chem. 49: 4619–4626. doi.org/10.1021/jf010586o.

Pérez-López, E., Veses, A., Redondo, N., Tenorio-Sanz, M., Villanueva, M., Redondo-Cuenca, A., Marcos, A., Nova, E., Mateos-Aparicio, I., Rupérez, P. 2018. Soybean okara modulates gut microbiota in rats fed a high-fat diet. Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre. 16: 100–107. doi.org 10.1016/j.bcdf.2018.09.002.

Rawat, N., Darappa, I. 2015. Effect of ingredients on rheological, nutritional and quality characteristics of fiber and protein enriched baked energy bars. J. Food Sci. Technol. 52: 3006–3013. doi.org/10.1007/s13197-014-1367-x.

Sen, S., De, B., Devanna, N., Chakraborty, R. 2013. Total phenolic, total flavonoid content, and antioxidant capacity of the leaves of *Meyna spinosa Roxb an Indian medicinal plant*. Chin. J. Nat. Med. 11: 149–157. doi.org/ 10.1016/S1875-5364(13)60042-4.

Thai Industrial Standards Institute. 2007. Thai Community Products Standards: Soybeans flour (CPS 1377/2007). Ministry of Industry, Bangkok. http: / / tcps. tisi. go.th/ pub/ tcps1377_50.pdf, 15 Jan 2021.

Vong, W.C., Liu, S.Q. 2016. Technology. Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition. Trends Food Sci. Technol. 52: 139–147. doi.org/10.1016/j.tifs.2016.04.011.

Voss, G.B., Rodríguez-Alcalá, L.M., Valente, L.M.P. 2018. Impact of different thermal treatments and storage conditions on the stability of soybean byproduct (okara). J. Food Meas. Charact. 12: 1981–1996. doi.org/10.1007/s11694-018-9813-5.

Yin, T., Yao, R., Ullah, I., Xiong, S., Huang, Q., You, J., Hu, Y., Shi, L. 2019. Effects of nanosized okara dietary fiber on gelation properties of silver carp surimi. LWT. 111: 111–116. doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.023.

Yu, L., Ramaswamy, H.S., Boye, J. 2012. Twin-screw Extrusion of corn flour and soy protein isolate (SPI) blends: A response surface analysis. Food Bioproc. Tech. 5: 485–497. doi.org/10.1007/s11947-009-0294-8.

Investigation of optimized extraction conditions of total anthocyanin content from *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib

Kachakot Yosphan[a], Varittha Sritalahareuthai[a], Nattira On-nom[a], Chaowanee Chupeerach[a], Piya Temviriyanukul[a], Dalad Siriwan[b], Uthaiwan Suttisansanee[a,*]

[a]Institute of Nutrition, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand.

[b]Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: uthaiwan.sut@mahidol.ac.th

Abstract

Kadsura heteroclita (Roxb.) Craib (or Noi-na-kreua in Thai) is a local wild plant in Northern Thailand. Its edible pink-reddish fruits had been previously reported to possess several medicinal properties due to high contents of phenolics, especially anthocyanins. Even though the detecting method of anthocyanins is well-established, the optimization of extraction conditions using green technology for total anthocyanin content in *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib is unavailable. Therefore, this study aimed to investigate the optimized extraction conditions of total anthocyanin content in *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib by varying pH of solvent, solvent concentration, extraction temperature, and shaking time using pH differential method. As results, it was found that the usage of 90% (v/v) ethanol at pH 1 as a solvent system, 80°C of an extraction temperature, and 3 hours of shaking time provided the highest total anthocyanin content of 10.59 ± 0.53 mg cyanidin-3-glucoside equivalents/g dry weight determined by pH differential method. The information received from this study could be used as a reference for further investigation on green extraction of anthocyanins and would benefit future development of anthocyanins rich products from *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib.

Keywords: Extraction conditions, *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib, Optimization, Total anthocyanin content

Introduction

Kadsura heteroclita (Roxb.) Craib (or Noi-na-kreua in Thai) was found in forest in northern Thailand. *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib is the vine plant, which produces pink-reddish edible fruits during December and January. The fruits can be consumed fresh or fermented with rice whisky and sugar. It was previously suggested that the fruits contain high nutritive values and excellent medicinal properties, including antioxidant activities and *in vitro* inhibitory activities against some key enzymes related to Alzheimer's disease and diabetes (Sritalahareuthai et al., 2020a; Sritalahareuthai et al., 2020b). These health related properties were proposed to be biological functions from its high phenolic content, especially anthocyanins, which were found to be abundant in this fruit (Sritalahareuthai et al., 2020b). The edible part of the fruit, mesocarp, was reported to contain total anthocyanin contents (TACs) of 26 mg cyanidin-3-glucoside equivalents (C3GE)/100 g dry weight (DW), while its exocarp contained TACs of 28 mg C3GE/100 g DW (Sritalahareuthai et al., 2020b). Thus, both mesocarp and exocarp of *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib are anthocyanins-rich sources.

The detected method of anthocyanins from plants is well-established using acidic methanol extraction (Lapornik et al., 2005). However, methanol is toxic and even its trace left in food after extraction could be harmful for consumers. Besides, even though the anthocyanin extraction from *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib had been previously reported (Sritalahareuthai et al., 2020b), the optimization of extraction conditions using alternative source of alcohol, ethanol, is unavailable. Therefore, this study aimed to optimize the ethanolic based extraction conditions of TACs in exocarp and mesocarp of *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib by varying pHs of solvent, solvent concentrations, extraction temperatures, and shaking time periods. The knowledge received from this study could be used as a reference for safe extraction condition of anthocyanins from other anthocyanins-rich plants.

Materials and Methods

Plant materials and sample preparation

The edible fruits of *K. heteroclita* were collected from the forest near Mae-jedi-mai sub-district, Weing-pa-pao district, Chaing Rai, Thailand (19°11'58.3" N and 99°31'00.7" E). The voucher specimens for *K. heteroclita* is BK No. 071407 deposited at the Bangkok Herbarium (BK), Bangkok, Thailand. The samples were cleaned and separate mesocarp and exocarp from other parts of the fruits. The mixture of mesocarp and exocarp was freeze-dried for 3 days using a Heto Powerdry PL9000 freeze dryer (Heto Lab Equipment, Allerod, Denmark). Dry sample was ground into fine powder using a grinder (Philips Electronic Co., Ltd., Jakarta, Indonesia), and packed in vacuum aluminium foil bag before keeping at -20°C until analysis.

Optimization of extraction by varying pH value, solvent concentration, extraction temperature and shaking time

The optimization of extraction was determined by varying pH of solvent, ethanolic concentration, extraction temperature, and shaking time. To investigate the total anthocyanin contents (TACs), the powdery sample (0.5 g) was mixed with solvent (50 mL) and shaken in a WNE45 temperature-controlled water bath shaker (Memmert GmbH, Wisconsin, USA). To investigate the pH of solvent, the sample was mixed with deionized water (DI water) adjusting pH to 1, 2, 3 and 4 and shaking at 80°C for 3 hours. The effect of solvent concentration was then determined using 0%, 20% 40%, 60%, 80% and 90% (v/v) ethanol adjusting pH to 1 (due to the highest TPCs from the previous step) as a solvent, and the extraction was extraction at 80°C for 3 hours. Lastly, the effect of extraction temperature (30, 50, 70, and 80°C) was performed using pH 1 of 90% (v/v) ethanol (due to the highest TPCs from the previous step) as a solvent and a shaking time of 3 hours. Lastly, to investigate the effect of shaking time (0.5, 1, 2 and 3 hours), 90% (v/v) ethanol (pH 1) as a solvent and 80°C of extraction temperature were employed for extraction. The optimal extraction condition was determined using analysis of total anthocyanin content as below.

Determination of total anthocyanin contents

Total anthocyanin contents were determined using a pH differential method as previously reported (Lee et al., 2005). The powdery sample of *K. heteroclita* (0.5 g) was mixed with 90% (v/v) ethanol (50 mL, pH 1) and shaken at 80°C for 1 hour. To stop the reaction, the mixture was put in an ice bath for 5 min before centrifuging at 4,600 rpm for 10 mins using a Hettich® ROTINA 38R centrifuge (Andreas Hettich GmbH, Tuttlingen, Germany). The supernatant was separately adjusted to pH 1.0 by 3 M HCl and pH 4.5 by 1 M NaOH. The absorbance at 520 and 700 was measured using a microplate reader (Synergy™ HT 96-well UV-visible spectrophotometer, BioTek Instruments, Inc., Vermont, USA) with Gen 5 data analysis software, and TACs was calculated according to Equation 1:

$$\text{Total anthocyanin contents (TACs)} = \frac{A \times MW \times DF \times 10^3}{\varepsilon \times 1} \quad (1)$$

where $A = (A_{520nm} - A_{700nm})$ pH 1.0 – $(A_{520nm} - A_{700nm})$ pH 4.5, MW (molecular weight) = 449.2 g/mol for cyanidin-3-glucoside, DF = dilution factor, l = pathlength in cm, and ε (extinction coefficients) = 26900 $M^{-1}.cm^{-1}$ for cyanidin-3-glucoside.

Statistical analysis

All experiments were carried out in triplicate (n = 3). One-way analysis of variance (ANOVA) following by Duncan's multiple comparison tests was performed to determine the significant differences between values with $p < 0.05$ using SPSS™ software for Windows (version 26, SPSS Inc., Illinois, USA).

Results and Discussion

Effect of pH variation

Using the fixed extraction temperature of 50°C and shaking time of 2 hours, the results suggested that the reaction using the solvent with lower pH could increase TACs as shown in Table 1. The highest TACs of 1.17 ± 0.11 mg C3GE/g DW was observed in the reaction extracted with DI water with adjusted pH of 1, while TACs were drastically decreased with increasing pH of solvent. It was previously suggested that anthocyanins were more stable at low pH than at higher pH (Janna et al., 2007), and low pH could increase cell membrane permeability, leading to increased release of anthocyanins being extracted to solvent (Türker and Erdoğdu, 2006).

Table 1 The effect of pH variation on total anthocyanin contents (TACs)

pH of solvent	TACs (mg C3GE/g DW)
1	1.17 ± 0.11^{a}
2	0.62 ± 0.01^{b}
3	0.61 ± 0.03^{b}
4	0.61 ± 0.03^{b}

All data were expressed as mean ± standard deviation (SD) of triplicate experiments (n = 3). The letters indicate significant differences ($p < 0.05$) of TACs using one-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple comparison test.

Effect of solvent variation

Using the fixed pH of solvent (pH 1), extraction temperature of 50°C, and shaking time of 2 hours, the results suggested that high ethanol concentration could increase TACs as shown in Table 2. The highest TACs of 4.75 ± 0.39 mg C3GE/g of DW was observed in the reaction extracted with 90% (v/v) ethanol (pH 1), while TACs continuingly declined with decreased ethanol concentrations. It was previously suggested that anthocyanins were likely dissolved in solvent with polarity index (PI) lower than water (PI = 10.2) but higher than absolute ethanol (PI = 5.2), since solubility depends on the number, type, and linkage position of the sugar molecule on the anthocyanin structure (Lapornik et al., 2005). Besides, extraction with ethanol and high temperature can increase diffusion coefficient and solubility of anthocyanins (Cacace and Mazza, 2003b).

Table 2 The effect of solvent concentration on total anthocyanin contents (TACs)

Ethanol concentration (% v/v)	TACs (mg C3GE/g DW)
0	0.90 ± 0.00^{d}
20	0.92 ± 0.04^{d}
40	1.18 ± 0.04^{cd}
60	1.38 ± 0.05^{c}
80	2.07 ± 0.38^{b}
90	4.75 ± 0.39^{a}

All data were expressed as mean ± standard deviation (SD) of triplicate experiments (n = 3). The letters indicate significant differences ($p < 0.05$) of TACs using one-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple comparison test.

Effect of extraction temperature

Using the fixed extraction solvent of 90% (v/v) ethanol (pH 1) and shaking time of 1 hour, the results suggested that higher extraction temperature could increase TACs as shown in Table 3. The highest TACs of 5.43 ± 0.32 mg C3GE/g DW were observed in the reaction extracted under 80°C, while TACs were declined with lower extraction temperatures. It was previously suggested that high extraction temperature could increase the diffusion coefficient and solubility of anthocyanins (Cacace and Mazza, 2003a). Besides, high temperature could weaken cell membranes, resulting in release of more anthocyanins to solvent (Türker and Erdogˇdu, 2006).

Table 3 The effect of extraction temperature on total anthocyanin contents (TACs)

Temperature (°C)	TACs (mg C3GE/g DW)
30	1.11 ± 0.15^{c}
50	1.36 ± 0.30^{bc}
70	1.76 ± 0.02^{b}
80	5.43 ± 0.32^{a}

All data were expressed as mean ± standard deviation (SD) of triplicate experiments (n = 3). The letters indicate significant differences ($p < 0.05$) of TACs using one-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple comparison test.

Effect of shaking time

Using the fixed extraction solvent of 90% (v/v) ethanol (pH 1) and extraction temperature of 80°C, the results suggested that longer extraction time could increase TACs as shown in Table 4. The highest TACs of 10.59 ± 0.53 mg C3GE/g DW was observed in the reaction extracted for 3 hours. It was previously suggested that extraction with high temperature for long time period could increase the contact time between solvent and particle, resulting in a raise in diffusion of bioactive compounds into solvent (Ghafoor et al., 2009).

Therefore, using high temperature and long time extraction might increase the amount of anthocyanin relaesed into solvent.

Table 4 The effect of shaking time on total anthocyanin contents (TACs)

Shaking time (hrs)	TACs (mg C3GE/g DW)
0.5	1.74 ± 0.02^{d}
1	5.60 ± 0.55^{c}
2	6.84 ± 0.46^{b}
3	10.59 ± 0.53^{a}

All data were expressed as mean ± standard deviation (SD) of triplicate experiments (n = 3). The letters indicate significant differences ($p < 0.05$) of TACs using one-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple comparison test.

Conclusion

In conclusion, the extraction conditions of anthocyanins from *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib could be optimized utilizing 90% (v/v) ethanol (pH 1) as a solvent, 80°C of an extraction temperature, and 3 hours of shaking time. These information could be used as preliminary results for future investigation in optimized extraction conditions of total anthocyanin contents using response surface methodology. Besides, this method utilizing ethanol is safer for consumption than the conventional extraction using methanolic extraction. The information in this research could, as well, be used to establish the reference method for further investigation on anthocyanin extraction from other anthocyanin-rich plants.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The information on *Kadsura* spp. was kindly provided by Assist. Prof. Dr. Chunthana Suwanthada and Assoc. Prof. Dr. Chusri Trisonthi, the board of the Plant Genetic Conservation Project under the Royal Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn (RGSP). Besides, we would like to express our gratitude to Mrs. Viparat Tepkaew, the RSPG coordinator, and Mr. Boonlert Ittiponjun, the RGSP staff in Lam-pang province, who provided the information and samples of *Kadsura* spp. utilized in this study. Financial support of this project was provided by the National Research Council of Thailand (NRCT).

References

Cacace, J.E., Mazza, G. 2003a. Mass transfer process during extraction of phenolic compounds from milled berries. J. Food Eng. 59: 379–389. doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00497-1

Cacace, J.E., Mazza, G. 2003b. Optimization of extraction of anthocyanins from black currants with aqueous ethanol. J. Food Sci. 68: 240–248. doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb14146.x

Ghafoor, K., Choi, H.Y., Jeon, Y.J., Jo, H.I. 2009. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds, antioxidants, and anthocyanins from grape (*Vitis vinifera*) seeds. J. Agric. Food Chem. 57: 4988–4994. doi.org/10.1021/jf9001439

Janna, O.A., Khairul, A.K., Maziah, M. 2007. Anthocyanin stability studies in *Tibouchina semidecandra* L. Food Chem. 101: 1640–1646. doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.04.034

Lapornik, B., Prošek, M., Wondra, A.G. 2005. Comparison of extracts prepared from plant by-products using different solvents and extraction time. J. Food Eng. 71: 214–222. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.10.036

Lee, J., Durst, W.R., Wrolstad, R.E. 2005. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. J AOAC Int. 88: 1269–1278. 16385975

Sritalahareuthai, V., Aursalung, A., On-nom, N., Temviriyanukul, P., Charoenkiatkul, S., Suttisansanee, U. 2020a. Nutritional composition of conserved *Kadsura* spp. plants in Northern Thailand. Heliyon. 6:e04451. doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04451

Sritalahareuthai, V., Temviriyanukul, P., On-nom, N., Charoenkiatkul, S., Suttisansanee, U. 2020b. Phenolic Profiles, Antioxidant, and Inhibitory Activities of *Kadsura heteroclita* (Roxb.) Craib and Kadsura coccinea (Lem.) AC Sm. Food. 9: 1222. doi.org/10.3390/foods9091222

Türker, N., Erdoğdu, F. 2006. Effects of pH and temperature of extraction medium on effective diffusion coefficient of anthocynanin pigments of black carrot (*Daucus carota* var. L.). J. Food Eng. 76 : 579–583. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.005

Effect of natural ingredients on the reduction of residual nitrite in cooked cured pork during storage

Patapee Sengboontan, Pollacha Pooput, Arati Koger, 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

Nitrite has been used as curing agent in meat products for many decades for the desire color, preservation and microbiological safety of meat products, in particular *Clostridium botulinum*, the bacteria responsible for life-threatening botulism. Unfortunately, nitrite is an important precursor of carcinogenic N-nitrosamines. Thus, excessive consumption of nitrite could have deleterious consequences on human health. Our study aimed to use natural ingredients including bell pepper and mixture of broccoli and cauliflower (levels of 5 and 10%) to reduce residual nitrite in cooked cured pork during storage. Addition of 10% bell pepper caused the highest reduction of nitrite during storage up to 15% when compared with control. This decrease was supported by the higher total phenolic content of bell pepper (150.6 mg GAE/kg) than broccoli (46.2 mg GAE/kg) and cauliflower (19.6 GAE/kg). The overall acceptability was higher in sample containing 10% bell pepper than in control and other treatments. Therefore, bell pepper could be utilized as natural ingredient to reduce residual nitrite in cured meat product, thus provide the better quality and safety of finished product.

Keywords: Blanched vegetables, Cured meat, Natural ingredient, Residual nitrite

Introduction

Sodium nitrite was used in cured meat products for development of desirable characteristics including produce stable cured color and unique cured flavor, reduce lipid oxidation and retard growth of *Clostridium botulinum* (Lonergan et al., 2018). However, residual nitrite in finished products could be reacted with secondary amines and formed carcinogenic N-nitrosamines which classified as human carcinogen (IARC, 2015). Several factors affected the residual nitrite in finished cured meat products including raw material, cooking process, salt concentration and pH of the product. However, due to the concern of carcinogenic of N-nitrosamines, food safety authority recommended to replace ingoing amounts" with "residual amount" of nitrite in finished products. In Thailand, the revision of the use of nitrite in cooked cured meat was changed from indicating of ingoing nitrite (125 mg/kg) to residual nitrite (<80 mg/kg) in finished products since 2018 (Ministry of Public Health, 2018).

The concern of carcinogenic compounds could be an opportunity for launching new products that contained less amount of residual nitrite to attract consumers who preferred healthier products. Hung et al. (2016) studied about purchase intention of processed meat with reduced level of nitrite and reported that it was related to attitude of consumers for using natural ingredients over chemical additives. There were 40% in enthusiast groups who interested and willing to pay for healthier meat products. Previous studies showed that some natural ingredients with high antioxidant compounds could reduce residual nitrite during storage. For example, Doolaege et al. (2012) studied antioxidant effect of rosemary extract. Their result showed that rosemary extract could decrease lipid oxidation and also reduced the ingoing nitrite up to 33%. Šojić et al. (2019) reported that coriander essential oil led to a significant decrease of residual nitrite in cooked pork sausage up to 70% from 84 to 22 mg/kg after stored for 60 days. Tomato pomace and peppermint essential oil which rich of antioxidative terpenoids reduced residual nitrite level up to 68% and 44%, respectively (Šojić et al., 2020). Furthermore, Choi et al. (2019) reported that fermented rich in polyphenols and flavonoids showed better nitrite scavenging effect than ascorbic acid and BHT in sausage model.

According to demand of healthy meat products and nitrite reduction effect from natural ingredients, bell pepper, broccoli and cauliflower are vegetables that widely consumed so they have the potential to combine with meat product to attract consumers. These vegetables reported to have antioxidant compounds (Ghasemnezhad et al., 2011; Reis et al., 2015). Therefore, this research was to evaluate possible effects of natural ingredients including bell pepper, broccoli and cauliflower to reduce residual nitrite in cooked cured pork during storage and develop healthy meat products for this market segmentation.

Materials and Methods

Preparation of bell pepper, broccoli and cauliflower

Fresh bell pepper, broccoli and cauliflower were purchased from local market in Bangkok. All the vegetables were washed with water and blanched in boiled water for 5 min. Then, the blanched vegetables were chopped into small pieces and mixed with meat batter in the further step.

Total phenolic content of bell pepper, broccoli and cauliflower

Total phenolic content in bell pepper, broccoli and cauliflower was analyzed following Wolfe et al. (2003). Samples were mixed with 80% methanol (1:10), then the mixture was centrifuged (2500 rpm, 4°C, 20 min). The supernatant was analyzed for total phenolic content using Folin-ciocalteu method. The absorbance was read at 765 nm by spectrophotometer using gallic acid (0, 20, 40, 60 and 80 mg/L) as standard solution.

Nitrate content in bell pepper, broccoli and cauliflower

The edible parts of each vegetable were homogenized. Nitrate was extracted by deionized water. The mixture was heated in 80°C water bath for 20 min and filtered through a 0.45 µm syringe filter. The extracts were injected in hplc system at 20 µl. The separation of nitrate was performed on a Zorbax C18 reversed phase column. The mixture of n-Octylamine in 30% methanol used as a mobile phase by the rate 0.8 ml/min following Chou et al. (2003).

Production of cooked cured pork mixed with vegetables

Lean pork and back fat were ground by meat grinder and chilled at -18°C for 1 hr. Ground pork, sodium nitrite, and other ingredients as formulation shown in Table 1 were added to silent cutter and chopped for 12 min. The ingoing nitrite level of our experiment were controlled at 200 mg/kg in weighing step. The batter was divided into five groups and mixed with blanched vegetables including (1) control without the addition of vegetables, (2) 5% bell pepper, (3) 10% bell pepper, (4) 5% mixture of broccoli and cauliflower and (5) 10% mixture of broccoli and cauliflower (The quantity of vegetables in each treatment based on our preliminary study). Meat batters in each treatment was filled into square mold (5x5x2 inch), dried at 60°C for 1 hr using tray dryer, and cooked at boiling temperature for 15 min by electric steamer. Cooked cured pork was removed from mold and cut into dice-shape, they were stored in polypropylene bag for 6 days at chilled temperature (4 ˚C). Residual nitrite of each treatment was analyzed during storage; 0, 2, 4 and 6 days while sensory attributes were evaluated at day 0 after production.

Table 1 Formulation of meat batter mixed with vegetables in each treatment

Ingredient	Weight (g)				
	Control	5% Bell pepper	10% Bell pepper	5% Broccoli & Cauliflower	10% Broccoli & Cauliflower
Lean pork	2500	2500	2500	2500	2500
Pork backfat	500	500	500	500	500
Sodium nitrite	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Bell pepper	-	150	300	-	-
Broccoli	-	-	-	75	150
Cauliflower	-	-	-	75	150
Salt	50	50	50	50	50
MSG	10	10	10	10	10
STPP	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Coriander	15	15	15	15	15
Pepper	32	32	32	32	32
Ice	400	400	400	400	400

Note: The amount of ingoing nitrite was at 200 mg/kg in all treatments.

Residual nitrite in cooked cured pork mixed with vegetables

Cooked cured pork was homogenized and treated with hot water (70°C) to extract nitrite from meat samples. Borax solution, potassium ferrocyanide and zinc acetate were used as clarifying agents to reduce impurities in extracts. After extracts were cooled to room temperature. The whole was filtered into 200-ml volumetric flask through a nitrate-free paper and made up to 200 ml using distilled water. Then, a filtration step was repeated to ensure that an extract was clear from meat particles. After extraction, the analytical method of AOAC (2016) was used to determined residual nitrite based on spectrophotometry. The color was developed by sulphanilamide and naphthyl-ethylenediamine. Then measured absorbance at 540 nm by spectrophotometer. Sodium nitrite solution at 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 and 1.2 ppm were standard solution.

Sensory evaluation of cooked cured pork mixed with vegetables

Samples of cooked cured pork mixed with vegetables were chopped into the dice shape (1×1×1 inch). They were heated up by microwave for 3 min (2450 MHz, 800 Watt) and conducted to 18–23 years old untrained panelists (n = 15) who interested in healthy meat products and intended to try new experience from meat consumption. Serving size was around 15 g (1 piece). Overall liking, appearance liking, flavor liking and texture liking for each sample were scored on 9-point hedonic scales (1 = I don't like it at all, 9 = I like it very much).

Statistical analyses

A randomized completely block design was used in this study. All treatments were conducted in 2 replicates and 3 duplicates of measurement have been applied in this study. IBM SPSS Statistics Ver.22 was used for analyses variance (ANOVA) and compared means using Tukey's multiple comparison. The confidence level was 95% ($p = 0.05$).

Results and Discussion

Total phenolic and nitrate content of vegetables

Although phenolic compounds in vegetables could partly loss during blanching (Goncalves et al., 2010), the significant amount of remained total phenolic in blanched vegetables were remained. Total phenolic contents of blanched vegetables were showed in Table 2. Total phenolic content in bell pepper was much higher than both broccoli and cauliflower. This result indicated that bell pepper tended to have high antioxidant activities. Besides total phenolic compounds, Ghasemnezhad et al. (2011) also reported that bell pepper is a source of vitamin C and carotenoids including β-carotene, lycopene and zeaxanthin so bell pepper might have higher chances to affect the nitrite degradation than both broccoli and cauliflower.

Nitrate is naturally found in most vegetables. As shown in Table 2, cauliflower (1,040.13 mg/kg) had significantly higher amount of nitrate content than both broccoli (409.81 mg/kg) and bell pepper (26.95 mg/kg) ($p \leq 0.05$). Some studies reported that nitrate can be converted to nitrite by nitrate reductase produced by anaerobic bacterial activity (Cammack et al., 1999; Gøtterup et al., 2007; Kim et al., 2017). This could affect residual nitrite level of some treatment during stored in refrigerator.

Table 2 Total phenolic contents in blanched vegetables

Blanched vegetables	Total phenolic contents (mg gallic acid equivalents/kg)	Nitrate (mg/kg)
Bell Pepper	150.60 ± 0.88[a]	26.95 ± 2.76[c]
Broccoli	46.15 ± 7.14[b]	409.81 ± 37.37[b]
Cauliflower	19.57 ± 1.46[c]	1,040.13 ± 51.29[a]

[a-c] Means within a column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

Residual nitrite in cooked cured pork mixed with vegetables

The effect of the addition of vegetables on the residual nitrite of cooked cured pork during storage was showed in Fig. 1. At day 0, the addition of 10% bell pepper could reduce residual nitrite up to 15% when compared with control significantly ($p \leq 0.05$) and this level was lower than other treatments. After stored for 6 days, the residual nitrite gradually decreased in control and samples with 5% and 10% bell pepper. Cooked cured pork with the addition of 10% bell pepper indicated the great reduction trend. According to the results of total phenolic content in each vegetable, it showed the corresponding results. High total phenolic compounds of bell pepper may induce the reduction of nitrite to nitric oxide during storage. However, samples mixed with broccoli and cauliflower showed no significant difference during storage. This might be due to the presence of significant of nitrate in broccoli (409.81 mg/kg) and cauliflower (1,040.13 mg/kg) which could undergo change to nitrite by means of nitrate reduction by microbial activities (Cammack et al., 1999; Gøtterup et al., 2007; Kim et al., 2017).

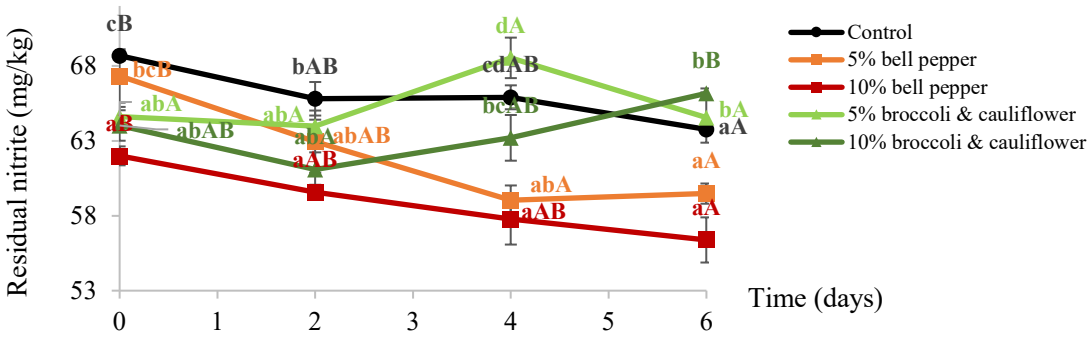


Fig. 1 Residual nitrite in different types of cooked cured pork during storage for 6 days
[a-d] Means within a vertical with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)
[A-B] Means within a horizontal with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

Sensory evaluation of cooked cured pork mixed with vegetables

Consumer acceptance on quality of products was accessed by sensory evaluation and the results were showed in Table 3. Cured pork with 10% bell pepper samples had the highest liking scores in all attributes including overall, appearance, flavor, texture. While samples with 10% mixture of broccoli and cauliflower obtained the lowest liking score of flavor attributes.

This could be due to the sulfurous aromas of *Brassica* vegetables such as broccoli, cauliflower, cabbage, Brussels and sprouts (Engel et al., 2002) which was not getting along with cured pork flavor.

Table 3 Consumer liking scores of cooked cured pork (9-scales Hedonic test)

Treatment	Overall	Appearance	Flavor	Texture
Control	6.33 ± 1.34^{ab}	6.00 ± 1.46^{ns}	5.87 ± 2.00^{ab}	6.13 ± 1.55^{ns}
5% Bell pepper	7.07 ± 0.80^{a}	6.60 ± 1.06	6.53 ± 1.25^{ab}	6.73 ± 0.88
10% Bell pepper	7.27 ± 0.96^{a}	7.13 ± 1.06	7.00 ± 1.20^{a}	7.13 ± 0.99
5% Broccoli & Cauliflower	5.87 ± 1.60^{ab}	5.93 ± 1.44	5.40 ± 1.76^{ab}	6.33 ± 1.29
10% Broccoli & Cauliflower	5.27 ± 2.09^{b}	5.93 ± 1.87	5.07 ± 2.37^{b}	6.13 ± 1.64

$^{a-b}$ Means within a column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)
^{ns} No significant differences between treatment ($p > 0.05$)
Note: 1 = I don't like it at all, 9 = I like it very much

Conclusions

The addition of 10% bell pepper in cooked cured pork effectively reduce the amount of residual nitrite up to 15%. This study suggested that natural ingredients with high phenolic compounds or high antioxidative compounds could probably be alternative ingredients to reduce the residual nitrite during storage. This could enhance the safety of cured meat and also provide unique characteristics to increase values of meat products. Meanwhile, the selection of natural ingredients need to carefully considered on the low nitrate ingredient to prevent the increase of residual nitrite in the product during storage.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

We are thankful to Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for supporting us in production plant, machine, analytical equipment and other laboratory facilities which help us to accomplish our work.

References

Association of Analytical Chemists. 2016. Official Method of Analysis, 17th ed. Gaithersburg. Maryland, USA.

Cammack, R., Joannou, C.L., Cui, X.Y., Martinez, C.T., Maraj, S.R., Hughes, M.N. 1999. Nitrite and nitrosyl compounds in food preservation. Biochim. Biophys. Acta 1411: 475–488. doi.org/10.1016/s0005-2728(99)00033-x

Choi, J.H., Song, D.H., Hong, J.S., Ham, Y.K., Ha, J.H., Choi, Y.S., Kim, H.W. 2019. Nitrite scavenging impact of fermented soy sauce in vitro and in a pork sausage model. Meat Sci. 151: 36–42. doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.01.001

Chou, S.S., Chung, J.C., Hwang, D.F. 2003. A high performance liquid chromatography method for determining nitrate levels in vegetables. J. Food Drug Anal. 11: 233–238. doi.org/10.38212/2224-6614.2702

Doolaege, E.H.A., Vossen, E., Raes, K., Meulenaer, B.D, Verhe, R., Paelinck, H., Smet, S.D. 2012. Effect of rosemary extract dose on lipid oxidation, colour stability and antioxidant concentrations, in reduced nitrite liver pâtés. Meat Sci. 90: 925–931. doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.034

Engel, E., Baty, C., Corre, D.L, Souchon, I., Martin, N. 2002. Flavor-active compounds potentially implicated in cooked cauliflower acceptance. J. Agric. Food Chem. 50: 6459–6467. doi.org/10.1021/jf025579u

Ghasemnezhad, M., Sherafati, M., Payvast, G.A. 2011. Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (Capsicum annum) fruits at two different harvest times. J. Funct. Foods 3: 44–49. doi.org/10.1016/j.jff.2011.02.002

Goncalves, E.M., Pinheiro, J., Abreu, M., Brandao, T.R.S., Silva, C.L.M. 2010. Carrot (Daucus carota L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching. J. Food Eng. 97: 574–581. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.005

Gøtterup, J., Olsen, K., Knöchel, S., Tjener, K., Stahnke, L.H., Møller, J.K.S. 2007. Relationship between nitrate/nitrite reductase activities in meat associated staphylococci and nitrosylmyoglobin formation in a cured meat model system. Int. J. Food Microbiol. 120: 303–310. doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.08.034

Hung, Y., de Kok, T.M., Verbeke, W. 2016. Consumer attitude and purchase intention towards processed meat products with natural compounds and a reduced level of nitrite. Meat Sci. 121: 119–126. doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.002

International Agency for Research on Cancer. 2015. IARC Monographs Evaluate Consumption of Red Meat and Processed Meat. http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2015/pdfs/pr240_E.pdf, 15 September 2019.

Kim, T.K, Kim, Y.B., Jeon, K.H., Park, J.D., Sung, J.M., Choi, H.W., Hwang, K.E., Choi, Y.S. 2017. Effect of fermented spinach as sources of pre-converted nitrite on color development of cured pork loin. Korean J. Food Sci. An. 37: 105–113. doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.1.105

Lonergan, S., Topel, D.T., Marple, D. 2018. The Science of Animal Growth and Meat Technology, 2nd ed. Iowa State University, Ames, Iowa.

Ministry of public health. 2018. Notification of the ministry of public health (No. 389) B.E. 2561 Food additives No.5. http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2561/E/178/1.PDF, 5 February 2021.

Reis, L.C.R.D., Oliveira, V.R.D., Hagen, M.E.K., Jablonski, A., Flores, S.H., Rios, A.D.O. 2015. Carotenoids, flavonoids, chlorophylls, phenolic compounds and antioxidant activity in fresh and cooked broccoli (Brassica oleracea var. Avenger) and cauliflower (Brassica oleracea var. Alphina F1). LWT – Food Sci. and Technol. 63: 177–183. doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.089

Šojić, B., Pavlić, B., Ikonić, P., Tomović, V., Ikonić, B., Zeković, Z., Tanackov, S.K., Jokanović, M., Škaljac, S., Ivić, M. 2019. Coriander essential oil as natural food additive improves quality and safety of cooked pork sausages with different nitrite levels. Meat Sci. 157: 107879. doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107879

Šojić, B., Pavlić, B., Tomović, V., Tanackov, S.K., Đurović, S., Zeković, Z., Belović, M., Torbica, A., Jokanović, M., Urumović, N., Vujadinović, D., Ivić, M., Škaljac, S. 2020. Tomato pomace extract and organic peppermint essential oil as effective sodium nitrite replacement in cooked pork sausages. Food Chem. 330: 127202. doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127202

Wolfe, K., Wu, X., Liu, R.H. 2003. Antioxidant activity of apple peels. J. Agric. Food Chem. 51: 609–614. doi.org/10.1021/jf020782a

Effects of coconut oil addition on properties of drum-dried pre-gelatinized Chainat 1 rice flour

Tidarat Norsuwan, Parichat Hongsprabhas, Masubon Thongngam*
Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: masubon.t@ku.th

Abstract

This study investigated the influences of coconut oil concentration on physicochemical properties of drum-dried pre-gelatinized Chainat 1 rice flour. Chainat 1 rice flour (6%w/w) was pre-gelatinized at 90°C for 8 min and homogenized with coconut oil (0-6%w/w of rice flour) before drying using a drum-dryer at 110 °C and 1.05 rpm. The pre-gelatinization and drying destroyed the crystallinity of amylopectin. The oil did not induce amylose-lipid complexes as determined by Differential scanning calorimetry (p> 0.05) and X-ray diffraction spectroscopy (p > 0.05). This modification did not influence the *in vitro* starch digestion although it promoted the structure of ester carbonyl group resulted from esterification between rice starch and coconut oil in the range of 1744-1745 cm^{-1} as determined by Fourier transform infrared spectroscopy. The insights on the promotion of esterification during the thermal process of rice starch and lipid suggested that drum-drying process can be used to esterify rice starch in Chainat 1 and coconut oil.

Keywords: Chainat 1 rice, Coconut oil, Drum-drying, Flour, Pre-gelatinization

Introduction

Flour-based Thai desserts are made from flour and coconut milk with thermal processing. This system probably induces the formation of amylose-lipid complexes (ALCs) during heating. Formation of ALCs or V-amylose complexes slows down retrogradation of starch (Panyoo and Emmambux, 2017). ALCs or resistant starch types 5 can reduce the susceptibility to enzymatic hydrolysis (Sun et al., 2019). The important factors affect the ALCs formation including complexing temperatures, lipid types and lipid concentrations etc. Pre-gelatinized starch is starch that has undergone a cooking process until complete gelatinization prior to drying (Alcázar-Alay and Meireles, 2015). Drum-drying is a drying method with shear force when apply to the starch granules, the starch granule may disrupt and led to physicochemical changes (Majzoobi et al., 2011). The lauric acid (C12:0) and myristic acid (C14:0) are the main saturated fatty acids of coconut milk and coconut oil (Pehowich et al., 2000). The fatty acids (FAs) with a chain length of 10–14 carbons produced more ordered structures and showed stronger intermolecular interactions with maize starch than other FAs (Sun et al., 2021). The production of ALCs from high-amylose Thai rice flour and coconut oil are prepared by pre-gelatinization for promoting the amylose leaching during heating and complexing with coconut oil. Then, the products are dried by drum-drying. The objective of this study was to study the effects of coconut oil addition on properties of drum-dried pre-gelatinized Chainat 1 (CNT1) rice flour.

Materials and Methods

Preparation of drum-dried pre-gelatinized Chainat 1 (CNT1) rice flour

The Chainat 1 (CNT1), the high amylose Thai rice cultivar (29.60 ± 0.20% amylose content) obtained from the Rice Research Center in Thailand, was prepared by wet-milling method. The CNT1 rice flour suspension (6%w/w) was heated in 90°C with vigorously stirring for 3 min. The coconut oil (0, 3 and 6%w/w, based on flour) was added into the rice flour suspensions and further vigorously stirring in 90°C for 5 min. Then, the rice flour pastes with the coconut oil were dried by a double drum dryer. The drum drying parameters were set to 110°C, 1.05 rpm with 0.15 mm gap. The CNT1 rice flour powder was collected, weighed, packed in aluminium foil bags, sealed, and kept at -18°C for physical characteristics and *in vitro* digestibility determination.

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

The FTIR spectra were obtained using a Nicolet iS10 FTIR spectrometer (Thermo Fisher Science Inc., Waltham, USA) equipped with a potassium bromide (KBr) beam splitter and a DTGS KBr detector. The samples were ground with KBr powder at a ratio of 1:100 (w/w), and the fine powders were pressed into transparent pellets and examined by the absorption method. The spectra were scanned in the range of 4000 to 400 cm^{-1} at room temperature, with an accumulation of 64 scans and at a resolution of 4 cm^{-1}.

Differential Scanning Calorimetry

Thermal property of drum-dried pre-gelatinized rice flours was measured using a Differential Scanning Calorimeter (DSC, DSC 1, STARe system Mettler Toledo, USA). The sample (6.0 mg, dry basis) was weighed accurately into a stainless steel pan, and distilled water was added to give a ratio of 3:1 (w/w) water/sample. The pans were sealed, equilibrated overnight at room temperature, and heated from 30 to 130°C at a rate of 5°C/min.

X-ray diffractometry

X-ray diffractogram was obtained using an X-ray diffractometer (D8 Advance, Bruker, Germany), which was operated at 40 kV and 40 mA with Cu Kα radiation (λ=0.154 nm). The sample was packed tightly into a glass cell and scanned over the range of 5-35° 2θ angles at a rate of 0.0229 degree/step at 25°C.

In vitro digestion rate determination

The *in vitro* digestion rate of a sample was determined as described by Brodkorb et al. (2019) and Minekus et al. (2014) with minor modifications. Simulated digestion was done through the three phases, oral, gastric and small intestinal phases. The percentage of glucose released within the gastric and small intestinal phases were determined based on the literature carbohydrate of Puhin et al. (2021).

Statistical analyses

The mean values were analyzed using Duncan's multiple-range test with SPSS 21.0 statistical software for Windows (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA). The significance level was set at $p \leq 0.05$.

Results and Discussion

FTIR spectra

FTIR spectra of native rice flour (NF) and drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition (DD-0%CO, DD-3%CO and DD-6%CO, respectively), are shown in Fig. 1. The pre-gelatinization and drum-drying of CNT1 rice flour affected the glycosidic bond of amylose in the range of 853-861 cm^{-1} attributed to the C-O-C glycosidic bond stretching (Ma and Boye, 2018) and 1154-1157 cm^{-1} attributed to the O-C-O symmetrical stretching (Ying et al., 2017) or C-O glycosidic bond stretching (Elizondo et al., 2009) or C-O, C-C stretching with some C-OH contributions (Ma and Boye, 2018). Moreover, these thermal processes of rice flour were also observed in the shift of the absorption peak at 2931.35 cm^{-1} to a lower value of 2928.94 cm^{-1}, corresponding to the O-H groups and CH_2 deformations in glucose ring (Sun et al., 2019; Ma and Boye, 2018) (Fig. 1).

In addition, the addition of 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil provided the additional absorption peaks at about 1744.21 cm^{-1} and 1745.28 cm^{-1} attributed to ester carbonyl group or C=O stretching vibration in a carboxyl group (Chen et al., 2018; Ying et al., 2017) (Fig. 1) which resulted from the esterification between rice starch and coconut oil. In the previous study, the peak of ester carbonyl group at 1746 cm^{-1} has been reported as the formation and/or reinforcement of the starch-lipid complex during heating process, probably

produced by esterification between maize starch and free maize oil existed in three-component blends together with zein protein (Chen et al., 2018). Moreover, the peak of drum-dried samples with the higher concentration of coconut oil were shifted to lower wave number at the range of 2925.64-2927.04 cm^{-1}, corresponding to the O-H groups and CH_2 deformations in glucose ring (Sun et al., 2019; Ma and Boye, 2018).

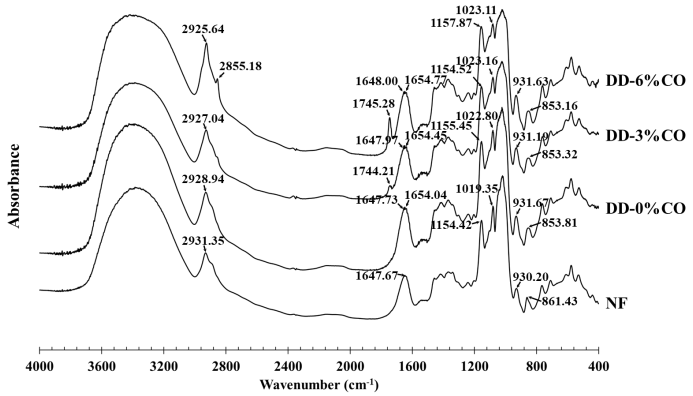


Fig. 1 FTIR spectra of native rice flour and pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition.
Sample code: NF: Native rice flour, DD-0%CO, DD-3%CO, DD-6%CO: drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition, respectively.

Thermal properties

Thermal properties of NF, DD-0%CO, DD-3%CO and DD-6%CO are summarized in Table 1 and 2. The CNT1 rice flour showed the gelatinization temperature range (T_o, T_p and T_c) according to the peak I (Table 1). These temperatures were consistent with the previous studies (Varavinit et al., 2003; Yoenyongbuddhagal and Noomhorm, 2002). In addition, the peak II and peak III (Table 1) exhibited the melting of ALCs Type I and Type II, respectively. Type I complex is the less ordered form that melts at a lower temperature (<100°C) whereas type II complex is more crystalline and melts at a higher temperature (>100°C) (Putseys et al., 2010). The drum-dried pre-gelatinized CNT1 rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil showed the values of T_o, T_p and T_c of retrograded amylopectin in the range of 47.59-67.91°C (Table 2, peak I), corresponding to the melting temperature of retrograded amylopectin (45–60°C) (Juliano, 2005). Therefore, the pre-gelatinization and drying destroyed the crystallinity of amylopectin. The previous study has reported that drum drying destroyed native starch granules, degraded molecular structure and reduced the degree of crystallinity of starch (Majzoobi et al., 2011). Furthermore, the addition of coconut oil did not affect the retrograded amylopectin formation ($p > 0.05$) (Table 2, peak I). This was probably due to the coconut oil added at 3-6% (w/w based on flour) did not increase ALCs formation ($p > 0.05$), exhibited the dissociation of ALCs Type I and Type II in the peak II and peak III (Table 2), respectively. In addition, the triglyceride was also able to form complex with starch but this complex was very weak, since large steric hindrance made it difficult for triglycerides to form complex with starch (Li et al., 2020). Therefore, the presence of ALCs in these samples probably resulted from endogenous lipids rather than coconut oil, consistent with the previous study (Yun et al., 2020).

Table 1 Thermal properties of CNT1 rice flour

Samples	Peak			
	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g dry basis)
Peak I	72.13 ± 0.53	75.97 ± 0.15	80.82 ± 0.06	9.07 ± 1.50
Peak II	89.54 ± 0.34	96.27 ± 0.15	102.37 ± 0.10	0.65 ± 0.07
Peak III	105.49 ± 3.07	111.71 ± 0.20	118.66 ± 2.25	0.37 ± 0.21

Data are expressed as means of two replications with standard deviations.
T_o, T_p, T_c, and ΔH are onset temperature, peak temperature, conclusion temperature, and enthalpy change, respectively.

Table 2 Thermal properties of drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition

Samples	Peak			
	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g dry basis)
Peak I				
DD-0%CO	48.21 ± 2.90^a	57.15 ± 0.86^a	65.53 ± 2.97^a	0.88 ± 0.76^a
DD-3%CO	49.89 ± 4.41^a	58.14 ± 1.75^a	67.91 ± 5.10^a	0.69 ± 0.49^a
DD-6%CO	47.59 ± 0.49^a	56.25 ± 0.08^a	64.59 ± 1.73^a	0.58 ± 0.27^a
Peak II				
DD-0%CO	92.63 ± 5.48^a	98.04 ± 0.98^a	104.13 ± 0.35^{ab}	1.15 ± 0.36^a
DD-3%CO	86.40 ± 0.25^a	97.96 ± 0.91^a	105.03 ± 0.11^a	0.26 ± 0.19^a
DD-6%CO	92.64 ± 8.66^a	98.84 ± 3.03^a	103.75 ± 0.74^b	0.88 ± 0.55^a
Peak III				
DD-0%CO	108.72 ± 0.53^a	113.04 ± 0.67^a	117.60 ± 1.68^a	0.20 ± 0.11^a
DD-3%CO	107.02 ± 1.49^a	112.91 ± 1.43^a	117.99 ± 0.57^a	0.18 ± 0.08^a
DD-6%CO	108.93 ± 0.51^a	112.34 ± 0.87^a	116.91 ± 0.97^a	0.22 ± 0.06^a

Data are expressed as means of two replications with standard deviations. Means in a column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$) by Duncan's multiple range test.
T_o, T_p, T_c, and ΔH are onset temperature, peak temperature, conclusion temperature, and enthalpy change, respectively.
Sample code: DD-0%CO, DD-3%CO, DD-6%CO: drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition, respectively.

XRD patterns

The XRD patterns of NF, DD-0%CO, DD-3%CO and DD-6%CO are shown in Fig. 2. NF exhibited the A-type crystalline structure with strong reflections peaks at 2θ of 15.1°, 17.1°, 17.9° and 23.1° (Fig. 2A), consistent with the previous study (Colussi et al., 2014). The DD-0%CO, DD-3%CO and DD-6%CO showed the amorphous characteristics because of the degradation of the crystalline structure (Fig. 2A). In addition, this was probably due to the coconut oil did not increase ALCs formation ($p > 0.05$) as determined by DSC. These samples also provided the FTIR spectra of amorphous characteristic in the range of 1022-1023 cm^{-1} (Fig. 1). The amorphous characteristic intensity of DD-3%CO and DD-6%CO were higher than DD-0%CO (Fig. 2B). The V-amylose complexes have been exhibited the reflections peaks of XRD patterns at 2θ of 7.5°, 13.0° and 20.0° (Yang et al., 2020).

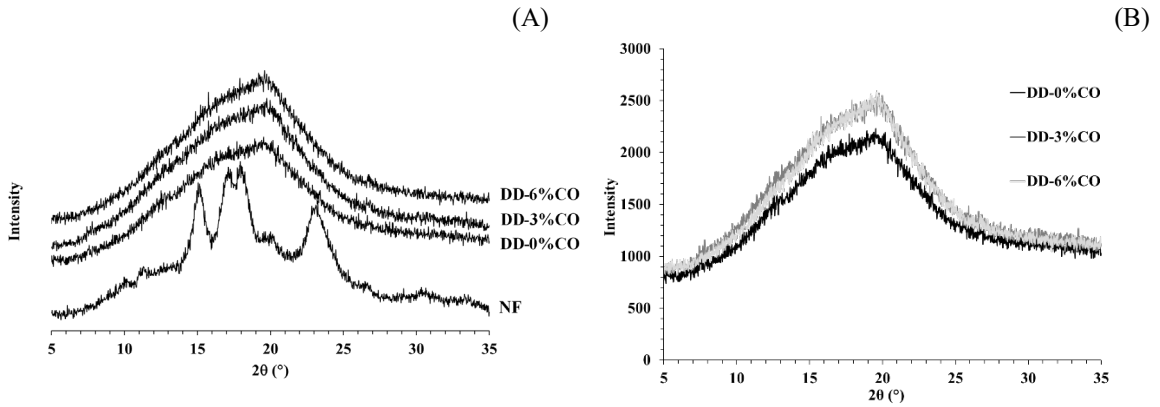


Fig. 2 XRD patterns of native rice flour and drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition.
Sample code: NF: Native rice flour, DD-0%CO, DD-3%CO, DD-6%CO: drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition, respectively.

In vitro starch digestion

The addition of coconut oil 3 and 6% (w/w based on flour) in pre-gelatinized rice flour before drum-drying did not influence the *in vitro* starch digestion ($p > 0.05$) including the glucose released and area under curve (AUC) (Fig. 3A and 3B). Because the coconut oil did not increase ALCs formation as determined by DSC ($p > 0.05$) and it also provided the amorphous characteristic as investigated by XRD ($p > 0.05$). Although they promoted the structure of ester carbonyl group resulting from esterification between rice starch and coconut oil in the range of 1744-1745 cm^{-1} as determined by FTIR. Moreover, the addition of coconut oil did not affect the retrograded amylopectin formation ($p > 0.05$) (Table 2, peak I). Therefore, the ALCs formation in this modification was influenced by the endogenous lipid in rice flour more than coconut oil addition, exhibited the dissociation of ALCs Type I and Type II of DD-0%CO, DD-3%CO and DD-6%CO in the peak II and peak III (Table 2), respectively as determined by DSC.

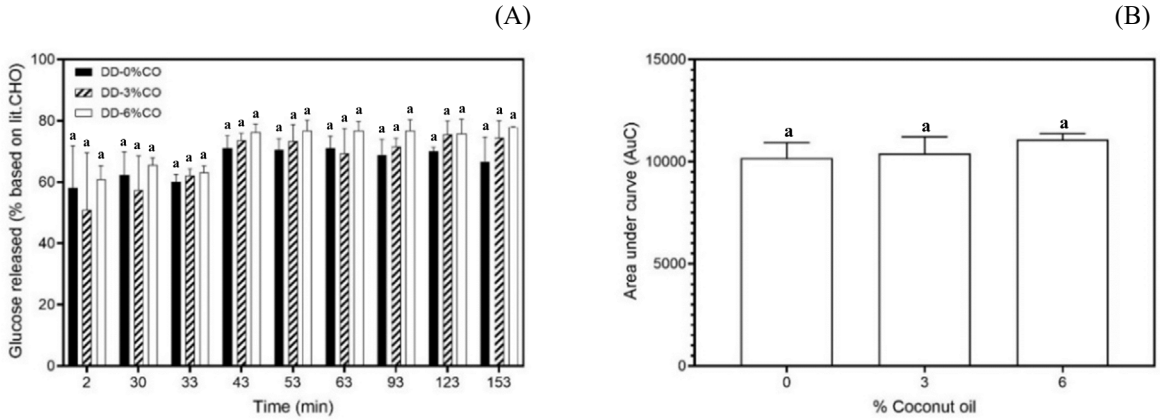


Fig. 3 *In vitro* starch digestion of drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w of based on flour) coconut oil addition (A). Glucose released (% based on literature carbohydrate (lit. CHO)) at different digestion times. (B). Area under curve (AUC) at different coconut oil concentrations.
Data are expressed as means of two replications with standard deviations. Means with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$) by Duncan's multiple range test.
Sample code: DD-0%CO, DD-3%CO, DD-6%CO: drum-dried pre-gelatinized rice flours with 0, 3 and 6% (w/w based on flour) coconut oil addition, respectively.

Conclusion

The drum-dried pre-gelatinized CNT1 rice flours with different coconut oil concentrations had lost their crystallinity and provided the structure of ester carbonyl group. This modification did not promote ALCs formation and influence the *in vitro* starch digestion. The presence of ALCs in drum-dried pre-gelatinized CNT1 rice flour may result from the endogenous lipids in rice flour rather than the addition of coconut oil. Therefore, the drum-drying process can be used to esterify rice starch in CNT1 and coconut oil.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The authors thank the supports received from Center for Agricultural Biotechnology (CAB), Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand and Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

References

Alcázar-Alay, S.C., Meireles, M.A.A. 2015. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. Food Sci. Technol. 35: 215–236. doi.org/10.1590/1678-457X.6749

Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., Clemente, A., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Edwards, C., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., Lesmes, U., Macierzanka, A., Mackie, A.R., Martins, C., Marze, S., McClements, D.J., Ménard, O., Minekus, M., Portmann, R., Santos, C.N., Souchon, I., Singh, R.P., Vegarud, G.E., Wickham, M.S.J., Weitschies, W., Recio, I. 2019. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion. Nat. Protoc. 14: 991–1014. doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1

Chen, X., He, X., Zhang, B., Fu, X., Li, L., Huang, Q. 2018. Structure, physicochemical and *in vitro* digestion properties of ternary blends containing swollen maize starch, maize oil and zein protein. Food Hydrocoll. 76: 88–95. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.04.025

Colussi, R., Pinto, V.Z., El Halal, S.L.M., Vanier, N.L., Villanova, F.A., Marques e Silva, R., da Rosa Zavareze, E., Dias, A.R.G. 2014. Structural, morphological, and physicochemical properties of acetylated high-, medium-, and low-amylose rice starches. Carbohydr. Polym. 103: 405–413. doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.070

Elizondo, N.J., Sobral, P.J.A., Menegalli, F.C. 2009. Development of films based on blends of Amaranthus cruentus flour and poly(vinyl alcohol). Carbohydr. Polym. 75: 592–598. doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.08.020

Juliano, B. (2005, 4-7 Nov 2004). Overview of rice and rice-based products. Paper presented at the Rice is Life: Scientific Perspectives for the 21st Century, Tsukuba, Japan.

Li, X., Luo, S., Hou, Y., Liu, Y., Hu, X., Liu, C. 2020. Effect of triglyceride on complexation between starch and fatty acid. Int. J. Biol. Macromol. 155: 1069–1074. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.072

Ma, Z., Boye, J.I. 2018. Research advances on structural characterization of resistant starch and its structure-physiological function relationship: A review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 58: 1059–1083. doi.org/10.1080/10408398.2016.1230537

Majzoobi, M., Radi, M., Farahnaky, A., Jamalian, J., Tongdang, T., Mesbahi, G. 2011. Physicochemical properties of pre-gelatinized wheat starch produced by a twin drum drier. J. Agric. Sci. Technol. 13: 193–202.

Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu, C., Carrière, F., Boutrou, R., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Egger, L., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., Lesmes, U., MacIerzanka, A., MacKie, A., Marze, S., McClements, D.J., Ménard, O., Recio, I., Santos, C.N., Singh, R.P., Vegarud, G.E., Wickham, M.S.J., Weitschies, W., Brodkorb, A. 2014. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus. Food Funct. 5: 1113–1124. doi.org/10.1039/c3fo60702j

Panyoo, A.E., Emmambux, M.N. 2017. Amylose–lipid complex production and potential health benefits: A mini-review. Starch/Staerke. 69. doi.org/10.1002/star.201600203

Pehowich, D.J., Gomes, A.V., Barnes, J.A. 2000. Fatty acid composition and possible health effects of coconut constituents. West Indian Med. J. 49: 128–133.

Puhin, K., Fukuoka, M., Ratanasumawong, S. 2021. Effect of starch and non-starch components on water migration, microstructure, starch retrogradation and texture of flat rice noodles made from different rice varieties. Int. J. Food Sci. Technol. doi.org/10.1111/ijfs.14957

Putseys, J.A., Lamberts, L., Delcour, J.A. 2010. Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties. J. Cereal Sci. 51: 238–247. doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.011

Sun, S., Hong, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z., Li, C. 2019. An investigation into the structure and digestibility of starch-oleic acid complexes prepared under various complexing temperatures. Int. J. Biol. Macromol. 138: 966–974. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.166

Sun, S., Jin, Y., Hong, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z., Li, C. 2021. Effects of fatty acids with various chain lengths and degrees of unsaturation on the structure, physicochemical properties and digestibility of maize starch-fatty acid complexes. Food Hydrocoll. 110: 106224. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106224

Varavinit, S., Shobsngob, S., Varanyanond, W., Chinachoti, P., Naivikul, O. 2003. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of thai rice. Starch/Staerke. 55: 410–415. doi.org/10.1002/star.200300185

Yang, X., Li, A., Li, X., Sun, L., Guo, Y. 2020. An overview of classifications, properties of food polysaccharides and their links to applications in improving food textures. Trends Food Sci. Technol. 102: 1–15. doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.020

Ying, D., Hlaing, M.M., Lerisson, J., Pitts, K., Cheng, L., Sanguansri, L., Augustin, M.A. 2017. Physical properties and FTIR analysis of rice-oat flour and maize-oat flour based extruded food products containing olive pomace. Food Res. Int. 100: 665–673. doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.062

Yoenyongbuddhagal, S., Noomhorm, A. 2002. Effect of physicochemical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality. Cereal Chem. 79: 481–485. doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.4.481

Yun, P., Devahastin, S., Chiewchan, N. 2020. Physical properties, microstructure and digestion behavior of amylose-lipid powder complexes prepared using conventional and spray-drying based methods. Food Biosci. 37. doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100724

ผลของการแทนที่เนยถั่วบางส่วนด้วยเนยกระบกต่อคุณภาพของคุกกี้เนยถั่ว

Effect of partial substitution of peanut butter with krabok butter on the quality of peanut butter cookies

สรญา เอกพินิจกุล, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช*, อุศมา สุนทรนฤรังษี

Soraya Ekpinitkul, Pitiporn Ritthiruangdej*, 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: pitiporn.r@ku.ac.th

บทคัดย่อ

กระบก (*Irvingia malayana*) เป็นพืชที่อุดมด้วยน้ำมัน เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนชื้น ในประเทศไทยบริโภคเมล็ดกระบกในรูปแบบคั่วเกลือ กระบกมีปริมาณไขมันสูงโดยเฉพาะไขมันอิ่มตัว เช่น กรดลอริก และกรดไมริสติก อย่างไรก็ตามพบว่ายังขาดข้อมูลด้านการใช้ประโยชน์เมล็ดกระบกในผลิตภัณฑ์อาหาร งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบกที่ระดับ 20, 30 และ 40% ต่อคุณภาพด้านกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของคุกกี้เนยถั่ว จากผลการทดลองพบว่า เมื่อแทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นไม่พบความแตกต่างของค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการอบ วอเตอร์แอคติวิตี้ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และค่าอัตราการแผ่ขยาย ของคุกกี้สูตรควบคุมและคุกกี้ที่แทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบก ($p > 0.05$) แต่พบว่าคุกกี้เนยกระบกมีค่าดัชนีสีน้ำตาลที่สูงกว่าคุกกี้เนยถั่ว เมื่อพิจารณาผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้สเกลความชอบ 9 ระดับ กับผู้ทดสอบ 50 คน พบว่า การแทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบก 30% สามารถใช้ในการทำคุกกี้เนยถั่วได้ โดยผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับชอบปานกลาง (ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบรวม 7.0)

คำสำคัญ: กระบก, การแทนที่, คุกกี้, คุณภาพ, เนยถั่ว

Abstract

Krabok (*Irvingia malayana*) is an oil-rich plant that grows well in tropical areas. In Thailand, the krabok seeds are normally consumed in salt roasted form. It is known for its high lipids content which mostly are saturated fatty acids such as lauric and myristic acids. However, no information is available on the utilization of krabok seeds in food products. Therefore, this study aimed to investigate the effect of krabok butter substitution (20, 30, and 40% by peanut butter weight) on the physical and consumer acceptance towards sensory properties of peanut butter cookies. The results indicated that there were no significant differences ($p > 0.05$) in weight loss during baking, water activity, diameter, thickness, spread ratio values between control cookies and cookies prepared with krabok butter substitution. The krabok butter cookies were also found to be darker compared to control cookies. Considering the nine-point hedonic sensory scores (n=50), the results suggested that substitution of peanut butter with 30% krabok butter could be used to prepare peanut butter cookies. Consumers rated the overall liking score of the product as like moderately (7.0).

Keywords: cookie, krabok, peanut butter, quality, substitution

คำนำ

กระบก (Wild almond) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Irvingia malayana* Oliv.ex A.w.Benn. เป็นไม้ต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีความสูงประมาณ 10–30 เมตร เป็นไม้ผลัดใบ โคนต้นเป็นพูพอน ใบเป็นรูปไข่หรือรูปรีแกมรูปขอบขนานจนถึงรูปใบหอก ในผลกระบกมีเมล็ด ซึ่งเมล็ดกระบก หรือเม็ดกระบก เมล็ดโตเป็นรูปไข่ เป็นเมล็ดเดี่ยว มีเปลือกแข็ง เนื้อในเมล็ดมีสีขาวอัดแน่นอยู่ (ลักษณะเป็นเนื้อแป้ง) และมีน้ำมัน มักติดผลในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน พบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยปกติคนส่วนใหญ่มักจะไม่ค่อยรู้จักกระบกมากนัก เมล็ดกระบกมีรสชาติคล้ายเมล็ดอัลมอนด์ จึงได้รับชื่อว่าเป็นอัลมอนด์อีสาน มักนำมาคั่วหรืออบให้สุกแล้วรับประทานเล่น เมล็ดกระบกมีปริมาณไขมัน 60.4% ปริมาณคาร์โบไฮเดรต 20.1% ปริมาณโปรตีน 37.1% มีเกลือแร่อยู่หลายชนิด และให้พลังงาน 527 กิโลแคลอรี่ต่อ 100 กรัม (สุดสงวน, 2532) กรดไขมันที่พบมากในกระบกคือกรดไขมันอิ่มตัว เช่น กรดลอริก พบในปริมาณ 42.84% (ธิติสุดา, 2558) เป็นกรดไขมันที่มีความสามารถในการลดระดับคอเลสเตอรอลและช่วยในการลดน้ำหนัก (Sandhya et al., 2016) และกรดไมริสติก พบในปริมาณ 35.21% (ธิติสุดา, 2558) เป็นกรดไขมันที่สะสมในร่างกาย ส่งผลในเชิงบวกต่อหัวใจและหลอดเลือด (Verruck et al., 2019)

คุกกี้ (Cookies) เป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีขนาดเล็ก แบน และมีรสหวาน มีรูปร่างและกลิ่นรสต่างๆ คุกกี้จะใช้เวลาการอบสั้น เมื่อนำเข้าเตาอบ ด้านนอกของโดจะเริ่มสุก เกิดลักษณะเป็นฟิล์มแข็ง หรือมีผิวด้านนอกแข็งขึ้น ความร้อนจากตู้อบจะทำให้ไขมันในโดละลาย และผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้โดขยายตัว น้ำในโดจะเปลี่ยนเป็นไอ ดันให้คุกกี้ขยายตัวต่อไป ใกล้ช่วงสุดท้ายของการอบ คุกกี้จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากปฏิกิริยาของน้ำตาลและโปรตีนในส่วนผสม ทำให้คุกกี้มีสีน้ำตาล กลิ่นหอม และรสชาติดี (จิตธนา และอรอนงค์, 2549) คุกกี้เนยถั่ว เป็นคุกกี้ประเภทหนึ่งที่มีเนยถั่วเป็นส่วนประกอบหลัก มีต้นกำเนิดในสหรัฐอเมริกา ซึ่งเนยถั่วสามารถใช้แทนเนยหรือชอร์ตเทนนิ่งได้

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้วัตถุดิบต่างๆ มาแทนที่เนยในผลิตภัณฑ์คุกกี้ เช่น งานวิจัยของ Adair et al. (2001) ได้นำถั่วเขียวกวนมาแทนที่ไขมันในคุกกี้เนยถั่วในปริมาณ 25, 50, 75 และ 100% พบว่าถั่วเขียวกวนสามารถแทนที่ไขมันในคุกกี้เนยถั่วได้ แต่เมื่อแทนที่ด้วยปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลต่อกลิ่นรสเนย กลิ่นรสเนยถั่ว และรสชาติ และในงานวิจัยของมนตรี และคณะ (2562) ได้นำเบต้ากลูแคนและถั่วลันเตาบดเป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้เนยชนิดปราศจากกลูเตน พบว่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงของโด และทำให้ทั้งโดและคุกกี้มีความแข็งแรงมากขึ้น มีอัตราการแผ่ตัวต่ำลง ค่าสีเหลืองต่ำลง และได้การยอมรับจากผู้บริโภค และมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ถั่วลันเตาบดและเบต้ากลูแคนในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางโภชนาการของคุกกี้เนย อย่างไรก็ตามยังไม่พบว่ามีการนำกระบกมาใช้แทนที่เนยหรือเนยถั่วในผลิตภัณฑ์คุกกี้

ผู้วิจัยได้เล็งเห็นประโยชน์ในด้านคุณค่าทางโภชนาการของกระบก และต้องการเพิ่มมูลค่าให้กับกระบก เนื่องจากการใช้ประโยชน์ของกระบกยังมีจำกัด ซึ่งกระบกมีปริมาณไขมันและโปรตีนสูงคล้ายกับถั่วลิสง โดยในถั่วลิสงมีปริมาณไขมันเท่ากับ 38.70% (กรมอนามัย สำนักโภชนาการ, 2545) และปริมาณโปรตีนเท่ากับ 29.7% (กรมอนามัย สำนักโภชนาการ, 2544) อีกทั้งยังไม่พบข้อมูลที่อ้างว่ากระบกก่อให้เกิดอาการแพ้ จึงสามารถนำมาใช้ในการทำเนยถั่ว และพัฒนาต่อยอดเป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์คุกกี้เนยถั่วได้ อย่างไรก็ตามการใช้เนยกระบกแทนที่เนยถั่วอาจส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพคุกกี้ที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการแทนที่เนยถั่วบางส่วนด้วยเนยกระบกต่อคุณภาพด้านกายภาพ และด้านประสาทสัมผัสของคุกกี้เนยถั่ว

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเนยถั่วและเนยกระบก

คัดเลือกถั่วลิสงและกระบกที่มีลักษณะเมล็ดสมบูรณ์ ไม่ลีบ ไม่ฝ่อ ล้างน้ำทำความสะอาด สะเด็ดให้แห้งและจัดเรียงในถาด นำเข้าอบในเตาอบไฟฟ้า (DH4B-B, Taiwan) อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 60 นาที นำออกมาผึ่งลมให้เย็น กะเทาะเยื่อหุ้มเมล็ดออก จากนั้นทำการเตรียมเนยถั่ว โดยใช้กระบกแทนที่ถั่วลิสงในระดับที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 0 (สูตรควบคุม), 20, 30 และ 40% ทำเนยถั่วโดยนำถั่วลิสงและกระบกเข้าเครื่องทำเนยถั่ว (Olde Tyme, USA) 2 รอบเพื่อให้ได้เนื้อสัมผัสเนยถั่วที่ละเอียด จากนั้นเติมน้ำเชื่อม 5% ของน้ำหนักเนยถั่วที่ได้ ผสมให้เข้ากันและนำไปใช้ในการผลิตคุกกี้เนยถั่ว

การวางแผนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของการแทนที่เนยถั่วบางส่วนด้วยเนยกระบกต่อคุณภาพด้านกายภาพและประสาทสัมผัสของคุกกี้เนยถั่ว โดยใช้เนยถั่วที่มีการแทนที่ถั่วด้วยกระบก 4 ระดับ คือ 0, 20, 30 และ 40% วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) สูตรพื้นฐานของคุกกี้ดัดแปลงจากสูตรของ Saksadet (2017) ประกอบด้วย เนยถั่ว 32.29% แป้งสาลีอเนกประสงค์ 20.43% เนยเค็ม 15.12% ไข่ไก่ 11.83% น้ำตาลทรายแดง 10.83% น้ำตาลทราย 8.58% กลิ่นวานิลลา 0.45% ผงฟู 0.23% เบคกิ้งโซดา 0.16% และเกลือ 0.08%

วิธีการทำคุกกี้เนยถั่ว ทำได้โดยร่อนแป้งสาลีอเนกประสงค์ ผงฟู เบคกิ้งโซดา และเกลือผสมรวมกัน เทเนยเค็มกับเนยถั่วลงในโถผสมของเครื่อง KITCHENAID (5K5SSWH, United Kingdom) ปั่นด้วยความเร็วระดับ 2 จนเข้ากันดี จากนั้นใส่น้ำตาลทรายและน้ำตาลทรายแดง ปั่นด้วยความเร็วระดับ 2 ใส่ไข่ไก่และกลิ่นวานิลลาลงไป ใส่แป้งที่ร่อนเตรียมไว้ ปั่นต่อด้วยความเร็วระดับ 1 เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำส่วนผสมมารีดให้เป็นแผ่นบนกระดาษไข ให้มีความหนา 3 มิลลิเมตร นำไปแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิ -18 °C เวลา 10 นาที ใช้พิมพ์สแตนเลสรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร กดทีละชิ้น วางเรียงบนถาดที่มีซิลิโคนรองอบ จากนั้นอบคุกกี้โดยใช้เตาอบไฟฟ้า (EO-70K, SHARP, Federal Electric Co., Ltd., Thailand) ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 นาที

การวิเคราะห์อัตราการแผ่ขยาย และน้ำหนักที่สูญเสียหลังอบของคุกกี้เนยถั่ว

ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) และความหนา (Thickness) ของคุกกี้ด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ จำนวน 6 ชิ้น ตามวิธีการของ Jan et al. (2016) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าอัตราการแผ่ขยาย (Spread ratio) จากค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางหารด้วยค่าเฉลี่ยความหนาของคุกกี้ ตามวิธีการของ Milicevic et al. (2020), วัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (Water activity) จำนวน 5 ซ้ำ ด้วยเครื่อง AquaLab (Decagon Devices Inc, Pullman, Washington, USA) ที่อุณหภูมิ 25°C และคำนวณค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการอบ (Baking Weight Loss; BWL) จำนวน 6 ซ้ำจากน้ำหนักก่อนอบ (m_0) และน้ำหนักหลังอบ (m_t) ดัง Equation 1 (Milicevic et al., 2020)

$$BWL\ (\%) = [(m_0-m_t)/m_0] \times 100 \quad (1)$$

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของคุกกี้เนยถั่ว

วิเคราะห์ค่าสีของคุกกี้เนยถั่วโดยระบบ CIE L* a* b* ดัดแปลงจากวิธีของ Jan et al. (2016) โดยวัดตัวอย่างทั้งชิ้นที่ผิวหน้า จำนวน 5 ชิ้นด้วยเครื่อง UltraScan PRO Spectrophotometer กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมในการวัด 10° ทำการบันทึกค่า L* (แสดงค่าความสว่างมีค่า 0-100), a* (เครื่องหมาย + หมายถึงสีแดง และเครื่องหมาย – หมายถึงสีเขียว) และ b* (เครื่องหมาย + หมายถึงสีเหลือง และเครื่องหมาย – หมายถึงสีน้ำเงิน) และคำนวณค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index) จาก Equation 2

$$\text{Browning index} = \frac{100(x-0.31)}{0.17}, \quad x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \qquad (2)$$

การวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของคุกกี้เนยถั่ว

วิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างคุกกี้เนยถั่ว โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Mudgil et al. (2017) โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom) ด้วยวิธี Three point bending test บันทึกค่าความแข็ง (Hardness, *N*) กำหนดสภาวะในการวัดดังนี้ load cell 50 kg, pre-test speed 1.5 mm/s, test speed 2 mm/s, post-test speed 10 mm/s, ระยะห่างของฐานวัดที่วางตัวอย่าง 25 มิลลิเมตร และกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทาง 10 มิลลิเมตร ทำการวัด 5 ซ้ำ

การประเมินคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของคุกกี้เนยถั่ว

ทำการประเมินความชอบตัวอย่างคุกกี้ด้วยวิธี 9-Point hedonic scale test (1 =ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 = ชอบมากที่สุด)ในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ, ความหนา, สี, ความกรอบ, รสหวาน, กลิ่นรสเนยถั่ว, กลิ่นรสโดยรวม และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน เสิร์ฟทีละตัวอย่างโดยจัดลำดับการเสิร์ฟแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) และกำหนดให้ผู้ชิมเป็นบล็อก (Block)

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำค่าคุณภาพกายภาพ และประสาทสัมผัสของคุกกี้เนยถั่วที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS for Windows (IBM Co., New York, United States)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพของคุกกี้เนยถั่ว

Table 1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพของคุกกี้เนยถั่วที่มีการแทนที่ด้วยเนยกระบกในระดับที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาพบว่า เมื่อแทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ไม่พบความแตกต่าง

ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา ค่าอัตราการแผ่ขยาย (Spread ratio) ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการอบ (Baking weight loss) ของคุกกี้สูตรควบคุมและคุกกี้ที่แทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบก ($p > 0.05$) และจาก Fig.1 พบว่าลักษณะปรากฏของคุกกี้ที่มีการใช้เนยกระบกมีสีเข้มกว่าคุกกี้เนยถั่ว (Control) โดยเมื่อพิจารณาค่าดัชนีสีน้ำตาล (Browning index) ของคุกกี้ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ด้วยเนยกระบกในระดับที่มากขึ้น เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ ทั้งปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่เกิดจากน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนและปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชั่น (Cauvain, 2016) เป็นผลมาจากปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในกระบกมีมากกว่าถั่วลิสง โดยกระบกมีปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 37.1 (สุภัทรา และมนัส, 2520) และ 20.1% (สุดสงวน, 2532) ตามลำดับ ในขณะที่ถั่วลิสงมีปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 29.7 และ 17.79% ตามลำดับ (กรมอนามัย สำนักโภชนาการ, 2544) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเป็นสีแดง (a*) ที่มีเพิ่มขึ้นด้วย จากการสืบค้นข้อมูลงานวิจัยเพิ่มเติม พบว่า งานวิจัยของ ธนวรรณ และคณะ (2559) ได้มีการนำกระบกมาใช้แทนที่เนยสดในผลิตภัณฑ์คุกกี้ลูกเดือย และพบว่าปริมาณการแทนที่เนยด้วยกระบกไม่มีผลต่อค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) และจาก Table 1 พบว่าค่าความแข็งของคุกกี้ที่แทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบกที่ 30% และคุกกี้เนยถั่วสูตรควบคุมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่คุกกี้ที่แทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบกที่ 20% และ 40% มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ไขมันเป็นองค์ประกอบที่ช่วยทำให้คุกกี้มีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่ม โดยกรดไขมันในถั่วลิสงและกระบกมีชนิดและปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของคุกกี้ กรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่พบมากในถั่วลิสงคือ กรดปาล์มิติก มีปริมาณเท่ากับ 12.83% และกรดสเตียริก ปริมาณเท่ากับ 4.10% (กรมอนามัย สำนักโภชนาการ, 2545) และกรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากในกระบกคือ กรดลอริก และกรดไมริสติก ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 42.84% และ 35.21% ตามลำดับ (ธิติสุดา, 2558) เมื่อกรดไขมันอิ่มตัวเหล่านี้ถูกให้ความร้อนในอุณหภูมิที่สูง จะเกิดการหลอมเหลวและละลายออกมาภายนอกชิ้นคุกกี้ ซึ่งจุดหลอมเหลวของกรดปาล์มิติก กรดสเตียริก กรดลอริก และกรดไมริสติก มีค่าเท่ากับ 63, 69, 45 และ 55°C (Morsch L., 2019) อาจส่งผลให้คุกกี้สูญเสียปริมาณไขมันออกมาทำให้คุกกี้มีลักษณะสัมผัสที่แข็งขึ้น ถึงแม้ว่าค่าความแข็งจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ค่าความความแข็งที่วัดได้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าการทดแทนเนยถั่วด้วยเนยกระบกไม่ค่อยส่งผลเด่นชัดต่อความแข็งของคุกกี้ จากการสืบค้นข้อมูลงานวิจัยเพิ่มเติมพบว่า งานวิจัยของ Adair et al. (2001) ได้นำถั่วเขียวกวนมาแทนที่ไขมันในคุกกี้เนยถั่วในปริมาณ 25, 50, 75 และ 100% พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถั่วเขียวกวนส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

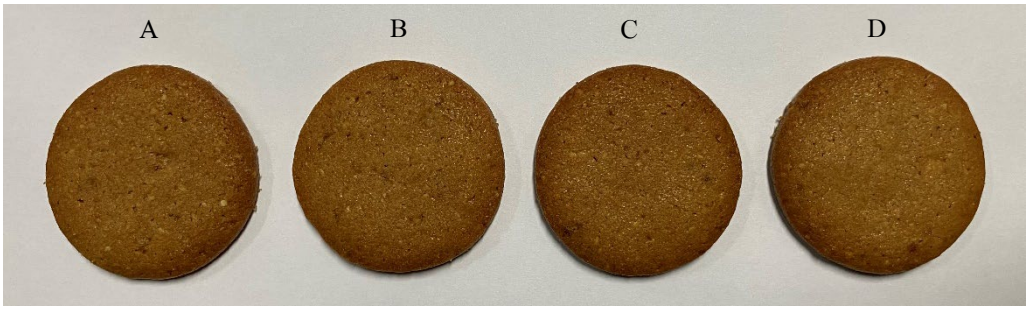


Fig. 1 The appearance of peanut butter cookies partially substituted with krabok butter: (A) Control (0%), (B) 20%, (C) 30% and (D) 40% of krabok butter substitution, respectively

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของคุกกี้เนยถั่ว

Table 2 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธี 9-Point hedonic scale test (1 =ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 = ชอบมากที่สุด) เมื่อพิจารณาพบว่าคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่น กลิ่นรส และความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่พบความแตกต่างในคุณลักษณะด้านรสชาติและเนื้อสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบคะแนนความชอบเฉลี่ยในแต่ละคุณลักษณะ พบว่าคุกกี้เนยถั่วที่แทนที่ด้วยเนยกระบกที่ 30% มีคะแนนความชอบมากที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกันในทุกคุณลักษณะ ได้แก่ ด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส กลิ่นรส และความชอบโดยรวม

Table 1 Physical qualities of peanut butter cookies partially substituted with krabok butter

Physical parameters	%Krabok butter substitution (w/w)			
	Control (0%)	20%	30%	40%
Diameter (mm) [ns]	210.73±0.45	210.39±0.25	210.41±0.14	210.90±0.47
Thickness (mm) [ns]	174.22±0.17	174.24±0.15	174.21±0.14	174.34±0.16
Spread ratio[ns]	1.21±0.00	1.21±0.00	1.21±0.00	1.21±0.00
Water activity[ns]	0.441±0.004	0.438±0.066	0.441±0.023	0.439±0.021
Baking weight loss (%)[ns]	13.29±0.19	13.38±0.35	13.47±0.21	13.37±0.17
L*[ns]	50.36±0.31	50.65±0.38	50.56±0.24	50.37±0.22
a*	11.68±0.18[c]	12.06±0.19[b]	12.66±0.34[a]	12.67±0.25[a]
b*	29.55±0.34[c]	30.10±0.41[b]	30.80±0.41[a]	30.67±0.24[a]
Browning index	100.15±1.53[b]	102.16±1.39[b]	106.20±2.49[a]	106.24±1.00[a]
Hardness (N)	7.62±0.28[ab]	7.38±0.16[b]	7.57±0.28[ab]	7.81±0.20[a]

[ns] Means defined as no statistically significant difference ($p > 0.05$)

[a-b] Means in the same row with different superscript are statistically different ($p \leq 0.05$)

Table 2 Liking scores of peanut butter cookies partially substituted with krabok butter (N=50)

Sensory attributes	%Krabok butter substitution (w/w)			
	Control (0%)	20%	30%	40%
Color[ns]	6.6±1.5	6.7±1.6	7.0±1.4	6.7±1.7
Appearance[ns]	6.9±1.4	6.8±1.5	7.1±1.4	6.8±1.5
Odor[ns]	6.5±1.6	6.7±1.2	6.8±1.5	6.4±1.5
Taste	6.5±1.4[b]	6.9±1.1[ab]	7.1±1.4[a]	6.5±1.5[b]
Texture	6.5±1.5[b]	6.9±1.2[ab]	7.1±1.3[a]	6.6±1.3[b]
Flavor[ns]	6.4±1.6	6.8±1.4	6.9±1.5	6.4±1.6
Overall liking[ns]	6.5±1.4	6.8±1.3	7.0±1.4	6.5±1.4

[ns] Means defined as no statistically significant difference ($p > 0.05$)

[a-b] Means in the same row with different superscript are statistically different ($p \leq 0.05$)

สรุป

การแทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบกที่ระดับต่างๆ ในผลิตภัณฑ์คุกกี้ ไม่พบความแตกต่างของค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการอบ วอเตอร์แอคติวิตี้ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และค่าอัตราการแผ่ขยาย ($p > 0.05$) แต่ส่งผลให้ค่าความแข็งและลักษณะปรากฏของคุกกี้ที่มีการใช้เนยกระบกมีสีเข้มกว่าคุกกี้เนยถั่วสูตรควบคุม ค่า a* ค่า b* และค่าดัชนีสีน้ำตาล เปลี่ยนแปลงไปจากคุกกี้เนยถั่วสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9-Point hedonic scale test กับผู้ทดสอบ 50 คน ไม่พบความแตกต่างของคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่น กลิ่นรส และความชอบโดยรวม ($p > 0.05$) และการแทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบก 30% สามารถใช้ในการทำคุกกี้เนยถั่วได้โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมเท่ากับ 7.0 คะแนน ทั้งนี้ควรมีการศึกษาคุณภาพทางด้านเคมีเพิ่มเติมเพื่อพิจารณาผลของการแทนที่เนยถั่วด้วยเนยกระบกต่อคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

กรมอนามัย สำนักโภชนาการ. 2544. ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย. กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.

กรมอนามัย สำนักโภชนาการ. 2545. กรดไขมันและคอเรสเตอรอลในอาหารไทย. กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.

จิตธนา แจ่มเมฆ, อรอนงค์ นัยวิกุล. 2546. เบเกอรี่เทคโนโลยีเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธนวรรณ เพ็งชัย, ศุจิดา นนทภา, อรอุมา ประทัดทอง. 2559. การทดแทนไขมันในคุกกี้ลูกเดือยโดยใช้กระบกบด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 47(พิเศษ): 201–204.

ธิติสุดา ตระกูลหูทิพย์. 2558. การสกัดไขกระบกเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์สบู่. การค้นคว้าอิสระ, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.

มนตรี ฉายสว่าง, อภินันท์ ศรีไพวัลย์, สมใจ สืบเสาะ. 2562. การใช้เบต้ากลูแคนและถั่วลันเตาบดเป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้เนยชนิดปราศจากกลูเตนและไขมันทรานส์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 24: 272–283.

สุดสงวน เลาหวินิจ. 2532. การประเมินคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดกระบก. วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุภัทรา มั่นสกุล, มนัส หวังหมัด. 2520. การศึกษาไขมันกระบกเพื่อใช้บริโภค. แผนการวิจัย, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทย.

Adair, M., Knight, S., Gates, G., 2001. Acceptability of Peanut Butter Cookies Prepared Using Mungbean Paste as a Fat Ingredient Substitute. J. Am Diet Assoc. 101: 467–469. doi:10.1016/S0002-8223(01)00120-1

Cauvain, S.P., 2016. Cookies, biscuits and crackers: formulation, processing and characteristics. 2nd ed. Elsevier. BakeTran, Witney, OX, UK.

Jan, R., Saxena, D.C., Singh, S. 2016. Physico-chemical, textural, sensory and antioxidant characteristics of gluten–Free cookies made from raw and germinated Chenopodium (*Chenopodium album*) flour. LWT. 71: 281–287. doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.001

Milicevic, N., Sakac, M., Hadnadev, M., Skrobot, D., Saric, B., Hadnadev, T.D., Jovanov, P., Pezo, L. 2020. Physico-chemical properties of low-fat cookies containing wheat and oat bran gels as fat replacers. J. Cereal Sci. 95: 103056. doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103056

Morsch, L. 2019. UIS: CHE 267 - Organic Chemistry I (Morsch). University of Illinois Springfield. Springfield, United States.

Mudgil, D., Barak, S., Khatkar, B.S. 2017. Cookie texture, spread ratio and sensory acceptability of cookies as a function of soluble dietary fiber, baking time and different water levels. LWT. 80: 537–542. doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.009

Sakdadet. 2017. คุกกี้เนยถั่ว. https://sakdadetblog.wordpress.com/2017/01/13, 13 มกราคม 2560

Sandhya, S., Talukdar, J., Bhaishya, D. 2016. Chemical and biological properties of lauric acid: A review. Int. J. Adv. Res, 4: 1123-1128. doi.org/10.21474/IJAR01/952

Sonwai, S., Ponprachanuvut, P. 2012. Characterization of physicochemical and thermal properties and crystallization behavior of krabok (*Irvingia Malayana*) and rambutan seed fats. J. Oleo Sci, 61(12): 671–679. doi:10.5650/jos.61.671

Verruck, S., Balthazar, C.F., Rocha, R.S., Silva, R., Esmerino, E.A., Pimentel, T.C., Freitas, M.Q., Silva M.C., Cruz, A.G., Prudencio, E.S. 2019. Dairy foods and positive impact on the consumer's health. In: Toldrá F. (Eds). Advances in food and nutrition research, Elsevier Inc. Amsterdam, Netherlands, pp. 95–164.

ขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยที่มีส่วนผสมของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เมล็ดทานตะวัน และนิวทริชั่นแนลยีสต์

Banana blossom snack mixed with cashew nuts, sunflower seeds and nutritional yeast

สุภาพร สิงหา*, โมไนย์ ทรัพย์สินกีรติ, อริสรา พุทธกิจ, ปิ่นมณี ขวัญเมือง

Supaporn Singha[a]*, Monai supsinkirati, Arissara Phutthakit, Pinmanee Kwanmuang

ภาควิชาครุศาสตร์เกษตร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Agricultural Education, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: 61603130@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาสูตรการผลิตขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอดและหาองค์ประกอบที่เหมาะสมของการใช้เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เมล็ดทานตะวัน นิวทริชั่นแนลยีสต์ และแป้งมันสำปะหลังร่วมกับกล้วยน้ำว้าดิบในผลิตภัณฑ์โดยใช้การทดสอบทางประสาทสัมผัสกับผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 2) ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ตลอดจนคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปลีกล้วย ผลการศึกษาพบว่าผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยสูตรสุดท้ายที่มีอัตราส่วนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดทานตะวันร้อยละ 5 นิวทริชั่นแนลยีสต์ร้อยละ 2.5 แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 3.5 ร่วมกับกล้วยน้ำว้าดิบร้อยละ 10 เป็นตัวประสานในการขึ้นรูป โดยมีคะแนนความชอบที่ระดับชอบปานกลาง (7.14) ค่าความสว่าง 42.29 ค่าความเป็นสีแดง 12.66 ค่าความเป็นสีเหลือง 23.33 และมีค่าความแข็ง 2.11 นิวตัน ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปลีกกล้วย 100 กรัม ให้พลังงาน 448 กิโลแคลอรี คุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย โปรตีน 18.5 กรัม ไขมัน 19.5 กรัม คาร์โบไฮเดรท 49.6 กรัม และมีเกลือแร่ที่สำคัญ เช่น โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ปริมาณสูง โดยเฉพาะโพแทสเซียม 1,308 มิลลิกรัม และมีความชื้นร้อยละ 7.27

คำสำคัญ: ขนมขบเคี้ยว, นิวทริชั่นแนลยีสต์, ปลีกล้วย, เมล็ดทานตะวัน, เมล็ดมะม่วงหิมพานต์

Abstract

This research aimed to 1) develop the formula of the banana blossom snack by planning a completely randomized design and determine the proper compositions of cashew nuts, sunflower seeds, nutritional yeast, and tapioca starch together with a raw banana by sensory evaluation using untrained panelists. 2) Study the physical and chemistry characteristics and nutritional values of banana blossom snacks. The results showed that the panelists accepted the final formula banana blossom snack recipe with a proportion of 5% cashew nuts and sunflower seeds, 2.5% nutritional yeast, 3.5% tapioca starch together with 10% raw banana as binding agents. The preference score was at a moderate level (7.14). L* 42.29, a* 12.66, b* 23.33 and had the hardness 2.11 N. Banana blossom snack 100 g provided calorie of 448 kcal. The nutritional value contained 18.5 g of protein, 19.5 g of fat, 49.6 g of carbohydrate, and high content of essential minerals such as potassium, phosphorus, calcium, and magnesium especially 1,308 mg. of potassium and 7.27% moisture.

Keywords: banana blossom, cashew nuts, nutritional yeast, snack, sunflower seeds

คำนำ

หัวปลี หรือปลีกล้วย (Banana blossom หรือ Banana flower) เป็นส่วนดอกของกล้วยมีกาบหุ้มอยู่ มีรูปทรงคล้ายหยดน้ำ ลักษณะของโคนปลีกว้าง ปลายปลีแหลม เมื่อลอกปลีส่วนนอกออกจนเหลือปลีเนื้อสีขาวภายในเป็นส่วนที่ใช้บริโภคได้ เรียกว่าปลีกล้วย ปลีกล้วยมีคุณค่าทางโภชนาการและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยปลีกล้วย 100 กรัม ให้คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ให้พลังงาน 51 กิโลแคลอรี คาร์โบไฮเดรท 9.9 กรัม โปรตีน 1.6 กรัม ไฟเบอร์ 5.7 กรัม แคลเซียม 56 มิลลิกรัม โพแทสเซียม 553.3 มิลลิกรัม (Zhan et al., 2010) การบริโภคปลีกล้วยส่วนใหญ่นำมาทำเป็นอาหารคาว เช่น ยำหัวปลี ต้มหัวปลี หัวปลีทอด หรือรับประทานดิบเป็นผัก และพบว่ามีการนำมาอบแห้งทำเป็นชาปลีกล้วย ทั้งนี้ยังไม่พบนำปลีกล้วยมาทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว

แนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารในกลุ่มอาหารฟังก์ชันที่เรียกว่า ฟอร์ทิฟิเคชัน (Food fortification) โดยกำหนดสูตรขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยที่เพิ่มส่วนผสมอื่นๆ ในการผลิต ได้แก่ เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งเป็นเมล็ดพืชที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ทั้งคาร์โบไฮเดรท โปรตีนและไขมัน ตลอดจนเกลือแร่ (Emelike et al., 2015) โดยเมล็ดทานตะวัน 100 กรัม มีคาร์โบไฮเดรท ร้อยละ 18.72 โปรตีน ร้อยละ 19.69 ไขมัน ร้อยละ 53 มีแคลเซียม ฟอสฟอรัสและเหล็กปริมาณสูง (Srivastava and Verma, 2014) ตลอดจนใช้นิวทริชั่นแนลยีสต์เป็นตัวเพิ่มรสชาติ และใช้กล้วยน้ำว้าดิบเป็นตัวช่วยประสานในการขึ้นรูป การพัฒนาขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยครั้งนี้เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากหัวปลีให้มีลักษณะปรากฏเป็นแผ่นและมีความกรอบซึ่งง่ายต่อการบริโภค ไม่มีการใช้สารให้ความหวานในสูตรการผลิต สอดคล้องกับแนวโน้มการบริโภคอาหารสุขภาพสำหรับผู้บริโภคทุกวัย เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะมีโปรตีนเพิ่มขึ้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้มีการทดสอบการยอมรับจากผู้บริโภคทั่วไปที่ไม่ผ่านการฝึกฝน ตลอดจนวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยมีความพร้อมสำหรับการนำไปผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวเพื่อใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ให้กับหน่วยงานต่างๆ และผู้สนใจต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบและส่วนผสม

นำปลีกล้วยสดมาปอกปลีนอกออกจนเหลือเนื้อสีขาว หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยมีด ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (รุ่น EPS-302) แล้วแช่ในน้ำสะอาดที่ผสมสารละลายกรดซิตริก (0.1 % ต่อน้ำ 1 ลิตร) นำกล้วยน้ำว้าดิบปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ชั่งน้ำหนักตามสูตรแล้วนำไปแช่รวมกับปลีกล้วยข้างต้น นำเมล็ดทานตะวันและเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสจนเป็นสีเหลืองทองและทิ้งให้เย็น จากนั้นบดจนละเอียดเป็นผง (มีขนาดอนุภาค 60 เมช) ด้วยเครื่องบดสับ (Tefal รุ่น MF327)

วิธีการผลิตขนมขบเคี้ยวปลีกล้วย

นำปลีกล้วยและกล้วยน้ำว้าดิบที่ผ่านการเตรียมมาปั่นรวมกันจนละเอียด จากนั้นนำมาผสมกับเมล็ดทานตะวัน เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ แป้งมันสำปะหลัง นิวทรีชั่นแนล ยีสต์ และเกลือ ผสมจนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี นำส่วนผสมทั้งหมดไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องทำวาฟเฟิลใช้ความร้อน 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที

จากนั้นนำออกมาพักบนตะแกรงทิ้งไว้ให้เย็น บรรจุใส่ภาชนะปิดสนิทเพื่อนำไปใช้ในการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ตรวจสอบทางกายภาพและทางเคมี รวมถึงการตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนการวิจัย

การพัฒนาขนมขบเคี้ยวปลีกล้วย มีขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การคัดเลือกปริมาณเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดทานตะวันที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ที่ผู้ชิมยอมรับ ดำเนินการทดลอง 3 สูตร คือ สูตรที่ 1 เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 5 กรัมต่อเมล็ดทานตะวัน 5 กรัม สูตรที่ 2 เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 7.5 กรัมต่อเมล็ดทานตะวัน 7.5 กรัม และ สูตรที่ 3 เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 10 กรัมต่อเมล็ดทานตะวัน 10 กรัม ผลิตขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยตามขั้นตอน จากนั้นนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน และเลือกสูตรที่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดไปศึกษาต่อ

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาการใช้นิวทริชั่นแนลยีสต์ในสูตรการผลิต ดำเนินการโดยนำสูตรที่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดตามขั้นตอนที่ 1 มาศึกษาต่อ ทำการทดลอง 3 สูตร โดยใช้นิวทริชั่นแนลยีสต์ในสูตรการผลิต 3 ระดับ คือ 5 กรัม 7.5 กรัม และ 10 กรัม ผลิตขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยตามขั้นตอน จากนั้นนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัส และเลือกสูตรที่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดไปศึกษาต่อ

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการใช้แป้งกล้วยน้ำว้าดิบและกล้วยน้ำว้าสุก เป็นตัวประสานในระหว่างการขึ้นรูป ดำเนินการโดยนำสูตรที่ได้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดตามขั้นตอนที่ 2 มาปรับส่วนผสมเพื่อการขึ้นรูปโดยใช้แป้งจากกล้วยน้ำว้าดิบและกล้วยน้ำว้าสุก แบ่งการทดลองเป็น 4 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1) แป้งมันสำปะหลัง 15 กรัม สูตรที่ 2) แป้งมันสำปะหลัง 7.5 กรัมร่วมกับกล้วยน้ำว้าดิบ 25 กรัม สูตรที่ 3) แป้งมันสำปะหลัง 5 กรัมร่วมกับกล้วยน้ำว้าดิบ 17 กรัมและกล้วยน้ำว้าสุก 17 กรัม และสูตรที่ 4) กล้วยน้ำว้าดิบ 50 กรัม ทำการผลิตขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยตามขั้นตอนการผลิต จากนั้นนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัส และเลือกสูตรที่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดไปศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ ดำเนินการโดยผลิตขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดจากขั้นตอนที่ 3 นำไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงานทั้งหมด คาร์โบไฮเดรท ไขมัน โปรตีน ไฟเบอร์ เกลือแร่ชนิดต่างๆ และปริมาณน้ำอิสระ

การทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส และการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้าน สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้แบบทดสอบชิมให้คะแนนความชอบแบบ 9 - point hedonic scales กับผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 80 คน ดำเนินการในทุกขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan’s new multiple range test และแปลผลค่าเฉลี่ยโดยใช้เกณฑ์การแปลความหมายการทดสอบทางประสาทสัมผัสของ ปราณี (2547)

2. การทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

- ค่าสี โดยเครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น Mini Scan EZ รายงานผลเป็นค่า L* a* b* โดยค่า L* แสดงค่า

ความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว) ค่า a* แสดงความเป็นสีแดงและเขียว และ ค่า b* แสดงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน

- วิเคราะห์เนื้อสัมผัส วัดแรงตัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น EZ-SX โดยใช้หัววัดชนิด V – cuts เพื่อใช้ในการประเมินแรงตัดเฉือนอาหาร

3. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ นำผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนที่ 3 มาวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้น พลังงาน คาร์โบไฮเดรท ไขมัน โปรตีน และค่า a_w

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 การคัดเลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดทานตะวัน

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ค่า L* ของทั้ง 3 สูตร อยู่ระหว่าง 40.25- 45.18 ค่า a* เท่ากับ 13.58–15.64 มีค่าเป็นสีแดง ส่วนค่า b* เท่ากับ 21.71–22.98 มีค่าความเป็นสีเหลืองแสดงดัง Table 2 ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์โดยรวมเป็นสีน้ำตาลอ่อน ส่วนค่าความแข็งในสูตรที่ใช้เมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดทานตะวัน 7.5 กรัม มีความแข็งน้อยที่สุด ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน ผู้ชิมให้คะแนนสูงที่สุดคือปริมาณเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดทานตะวัน 10 กรัม โดยมีคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนคุณลักษณะด้านสีกลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ได้รับคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง ซึ่งสูงกว่าสูตรอื่นแสดงดัง Table 1 ดังนั้นจึงเลือกสูตรนี้ไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

Table 1 Sensory evaluation properties of cashew and sunflower seeds

Amount of cashew and sunflower seeds (g)	Sensory evaluation properties				
	Color	Odor	Taste	Texture	Overall liking
5	5.59±1.40^{a}	5.31±1.46^{b}	5.36±1.65^{b}	5.30±2.09^{b}	5.80±1.46^{b}
7.5	6.07±1.83^{a}	5.83±1.38^{ab}	5.78±1.90^{ab}	5.62±1.82^{b}	5.93±1.61^{ab}
10	6.25±1.61^{a}	6.30±1.51^{a}	6.30±1.42^{a}	6.73±1.22^{a}	6.53±1.24^{a}

The different vertical characters had statistically significant differences at the confidence level ($p < 0.05$)

Table 2 Color value and hardness of cashew and sunflower seeds

Amount of cashew and sunflower seeds (g)	Color value			Hardness (N)
	L*	a*	b*	
5	45.18 ± 0.47^{a}	15.40 ± 0.15^{a}	22.98 ± 0.52^{a}	10.35 ± 1.30^{a}
7.5	40.25 ± 0.97^{b}	15.64 ± 0.32^{a}	21.71 ± 0.32^{b}	3.23 ± 0.39^{c}
10	45.05 ± 0.32^{a}	13.58 ± 0.22^{b}	21.90 ± 0.54^{b}	4.85 ± 0.48^{b}

The different vertical characters had statistically significant differences at the confidence level ($p < 0.05$)

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาการใช้นิวทริชั่นแนลยีสต์ในสูตรการผลิต

จากการศึกษาขั้นตอนที่ 1 ผู้ทดสอบชิมเลือกสูตรที่มีส่วนผสมของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดทานตะวัน 10 กรัม และเพิ่มสารอาหารกลุ่มโปรตีน โดยใช้นิวทริชั่นแนลยีสต์ในสูตรการผลิต

Table 3 Sensory evaluation properties of nutritional yeast

Amount of Nutritional Yeast (g)	Sensory evaluation properties				
	Color	Odor	Taste	Texture	Overall liking
5	5.33±1.72^{b}	5.20±1.60^{b}	5.10±1.55^{b}	5.49±1.80^{b}	5.46±1.58^{b}
7.5	6.91±1.48^{a}	6.90±1.72^{a}	6.79±1.96^{a}	7.06±1.55^{a}	7.18±1.44^{a}
10	5.74±1.78^{b}	5.51±1.88^{b}	5.36±2.02^{b}	5.41±1.99^{b}	5.41±1.91^{b}

The different vertical characters had statistically significant differences at the confidence level ($p < 0.05$)

Table 4 Color value and hardness of nutritional yeast

Amount of Nutritional Yeast (g)	Color value			Hardness (N)
	L*	a*	b*	
5	44.53 ± 0.81^{c}	11.64 ± 0.35^{a}	21.53 ± 0.61^{b}	6.36 ± 0.61^{b}
7.5	47.70 ± 1.07^{a}	12.13 ± 0.36^{a}	25.88 ± 0.71^{a}	4.73 ± 0.63^{c}
10	46.30 ± 0.70^{b}	10.32 ± 0.58^{b}	25.37 ± 0.32^{a}	9.63 ± 0.92^{a}

The different vertical characters had statistically significant differences at the confidence level ($p < 0.05$)

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ค่า L* ของทั้ง 3 สูตร อยู่ระหว่าง 44.53–47.70 ค่า a* เท่ากับ 10.32–12.13 มีค่าเป็นสีแดง ส่วนค่า b* เท่ากับ 21.53–25.88 มีค่าความเป็นสีเหลืองแสดงดัง Table 4 ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์โดยรวมเป็นสีน้ำตาลอ่อน มีกลิ่นหอมของเมล็ดพืชและนิวทริชั่นแนลยีสต์ ส่วนค่าความแข็งสูตรที่ใช้นิวทริชั่นแนลยีสต์ 7.5 กรัม มีความแข็งน้อยที่สุด (4.73 นิวตัน) ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน ผู้ชิมให้การยอมรับสูตรที่ใช้ปริมาณนิวทริชั่นแนลยีสต์เป็นส่วนผสม 7.5 กรัม โดยคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสทุกด้านมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสูตรอื่น ค่าคะแนนความชอบทุกด้านอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง แสดงดัง Table 3 ดังนั้นจึงเลือกสูตรนี้ไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การใช้แป้งกล้วยน้ำว้าดิบและกล้วยน้ำว้าสุก เป็นตัวประสานในระหว่างการขึ้นรูป

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ค่า L* ของทั้ง 4 สูตร อยู่ระหว่าง 40.68- 46.63 ค่า a* เท่ากับ 11.91–15.28 มีค่าเป็นสีแดง ส่วนค่า b* เท่ากับ 23.33–27.89 มีค่าความเป็นสีเหลือง ส่วนค่าความแข็งสูตรที่ใช้แป้งมันสำปะหลัง 7.5 กรัม ผสมกล้วยน้ำว้าดิบ 25 กรัม มีความแข็งน้อยที่สุด (2.11 นิวตัน) แสดงดัง Table

6 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน พบว่าผู้ชิมให้การยอมรับขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยที่ใช้แป้งมันสำปะหลังผสมกล้วยน้ำว้าดิบเป็นตัวประสานในการขึ้นรูป โดยคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสูตรอื่น มีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเท่ากับ 6.90 6.76 6.91 7.04 และ 7.14 ตามลำดับ การทดสอบทางประสาทสัมผัสทั้ง 5 ด้าน อยู่ในระดับความชอบปานกลางแสดงดัง Table 5 ดังนั้นสูตรนี้จึงเป็นสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปลีกล้วย สำหรับนำไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการต่อไป

Table 5 Sensory evaluation properties of raw namwa banana and ripe namwa banana

Formula	Sensory evaluation properties				
	Color	Odor	Taste	Texture	Overall liking
1. 1 (15 g)	4.73±1.86^{b}	4.64±1.58^{b}	4.48±1.71^{b}	4.58±1.59^{b}	4.71±1.58^{b}
2. 1 (7.5 g) + 2 (25 g)	6.90±4.96^{a}	6.76±1.93^{a}	6.91±1.90^{a}	7.04±1.92^{a}	7.14±1.93^{a}
3. 1 (5 g) + 2 (17 g) + 3 (17 g)	5.24±1.57^{b}	4.95±1.59^{b}	4.88±1.66^{b}	4.78±1.60^{b}	4.80±1.67^{b}
4. 2 (50 g)	4.96±1.57^{b}	4.75±1.49^{b}	4.64±1.51^{b}	4.69±1.34^{b}	4.73±1.38^{b}

1 = Tapioca starch, 2 = Raw namwa banana, 3 = Ripe namwa banana

The different vertical characters had statistically significant differences at the confidence level ($p < 0.05$)

Table 6 Color value and hardness of raw namwa banana and ripe namwa banana

Formula	Color value			Hardness (N)
	L*	a*	b*	
1. 1 (15 g)	45.91 ± 0.61^{a}	11.91 ± 0.73^{d}	24.38 ± 0.81^{c}	5.24 ± 0.29^{c}
2. 1 (7.5 g) + 2 (25 g)	42.29 ± 1.18^{b}	12.66 ± 0.44^{c}	23.33 ± 0.80^{d}	2.11 ± 0.22^{d}
3. 1 (5 g) + 2 (17 g) + 3 (17 g)	40.68 ± 1.88^{c}	15.28 ± 0.40^{a}	25.44 ± 0.52^{b}	7.85 ± 0.36^{a}
4. 2 (50 g)	46.33± 0.51^{a}	14.33 ± 0.51^{b}	27.89 ± 0.27^{a}	6.76 ± 0.37^{b}

1 = Tapioca starch, 2 = Raw namwa banana, 3 = Ripe namwa banana

The different vertical characters had statistically significant differences at the confidence level ($p < 0.05$)

ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

นำขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนที่ 3ไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงาน คาร์โบไฮเดรท ไขมัน โปรตีน ไฟเบอร์ เกลือแร่ชนิดต่างๆ ปริมาณน้ำอิสระ ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการขนมขบเคี้ยวปลีกล้วย 100 กรัม พบว่าให้พลังงาน 448 กิโลแคลอรี มีปริมาณคาร์โบไฮเดรท ร้อยละ 49.6 โปรตีนและไขมัน (ร้อยละ 18.5 และ 19.5) ซึ่งเป็นคุณค่าทางโภชนการของวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม มีปริมาณไฟเบอร์ ร้อยละ 12 นอกจากนั้นยังมีปริมาณ

เกลือแร่ที่สำคัญ เช่น โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ปริมาณสูง โดยเฉพาะโพแทสเซียม (1308 มิลลิกรัม) และมีความชื้น 7.27 เปอร์เซ็นต์ แสดงดัง Table 7 จะเห็นได้ว่าคุณค่าทางโภชนาการทั้งหมดมาจากวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม ตลอดจนลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นแผ่นกรอบ มีกลิ่นหอมจากส่วนผสม และรับประทานได้ง่าย

Table 7 Nutrient composition of banana blossom snack per 100 g

Nutrients	unit	Nutritional value
Moisture	%	7.27
Calories	kcal	448
Total Carbohydrate (Include Dietary Fiber)	g	49.6
Fat	g	19.5
Protein	g	18.5
Dietary Fiber (Total)	g	12.0
Calcium	mg	110
Phosphorus	mg	421
Potassium	mg	1308
Magnesium	mg	201
Iron	mg	4.08
Ash	mg	5.13
Water activity at 25°C	-	0.404

สรุป

จากการพัฒนาขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยครั้งนี้ สรุปได้ว่า สูตรที่เหมาะสมในการผลิตขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยมีส่วนผสมของปลีกล้วยสดร้อยละ 43.5 น้ำสะอาดร้อยละ 30 เมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดทานตะวันร้อยละ 5 นิวทริชั่นแนลยีสต์ร้อยละ 2.5 แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 3.5 เกลือร้อยละ 0.5 และกล้วยน้ำว้าดิบร้อยละ 10 ลักษณะปรากฏของขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยเป็นแผ่นบาง มีความกรอบ มีน้ำหนักเบา มีกลิ่นหอมของเมล็ดพืช คุณค่าทางโภชนการของขนมขบเคี้ยวปลีกล้วย 100 กรัม ให้พลังงาน 448 กิโลแคลอรี มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 18.5 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 49.6 ไขมันร้อยละ 19.5 มีปริมาณไฟเบอร์ ร้อยละ 12 มีเกลือแร่ที่สำคัญ เช่น โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ปริมาณสูง โดยเฉพาะมีโพแทสเซียมสูง (1308 มิลลิกรัม) มีค่า Water activity เท่ากับ 0.404 ซึ่งขนมขบเคี้ยวปลีกล้วยเป็นผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของพืชเป็นหลัก ไม่มีการเติมน้ำตาล เป็นผลิตภัณฑ์จากปลีกล้วยที่ยังไม่เคยมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ ใช้บริโภคได้ทั้งเด็กและผู้ใหญ่ เป็นผลิตภัณฑ์ที่

สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับปลีกล้วยซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากการปลูกกล้วยเชิงพาณิชย์ และสามารถดำเนินการผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้



Fig. 1 Banana blossom snack

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาครุศาสตร์เกษตร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือตลอดการทดลอง ขอขอบคุณผู้ดูและห้องปฏิบัติการ IE 3104

เอกสารอ้างอิง

นิวทริชั่นแนลยีสต์. สืบค้นจาก https://www.organicseedsthailand.com/product/nutritional-yeast, 23 มีนาคม 64.

ปราณี อ่านเปรื่อง. 2547. หลักการวิเคราะห์อาหารด้วยประสาทสัมผัส. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Arya Krishnan S., Sinija, V.R. 2016. Proximate Composition and Antioxidant Activity of Banana Blossom of Two Cultivars in India. International Journal of Agriculture and Food Science Technology.

Barbara Bigliardia and Francesco Galati. 2013. Innovation trends in the food industry: The case of functional foods. Trends in Food Science & Technology.

Emelike, N.J.T., Barber, L.I., Ebere, C.O. 2015. Proximate, mineral and functional properties of defatted and undefatted cashew (*Anacardium occidentale* Linn.) Kernel Flour. European Journal of Food Science and Technology.

Judith, A.M., McBurney, M.I., Slavin, J.L. 2002. Health implication of dietary fibre. Journal of American Diebetic Association.

Pilch, S. 1987. Physiological effects and health consequences of dietary fibre. Bethesda, MD: Life sciences Research Office, Federation of American Societies for Experimental Biology.

Srivastava, A., Verma, A. 2014. Nutritional composition of sunflower seeds flour and nutritive value of products prepared by incorporating sunflower seeds flour. International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences.

Zhan-Wu Sheng, Wei-Hong Ma, Zhi-Qiang Jin, Yang Bi, Zhi-Gao Sun, Hua-Ting Dou, Jin-He Gao, Jing-Yang Li, Li-Na Han. 2010. Investigation of dietary fiber, protein, vitamin E and other nutritional compounds of banana flower of two cultivars grown in China. African Journal of Biotechnology.

การศึกษาความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคสำหรับบริการจัดส่งสินค้าเกษตรและอาหารแบบควบคุมอุณหภูมิ

A study of consumers' willingness to pay for temperature-controlled delivery service of agri-food products

สุดา แก้วรุ่งคำ*, ปรารถนา ปรารถนาดี, จุมพล วรสายัณห์

Suda Kaewrunkham*, Parthana Parthanadee, Jumpol Vorasayan

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: suda.ka@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรม ทัศนคติและความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคในการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนากลยุทธ์ของผู้จัดจำหน่าย ผลสำรวจผู้บริโภคที่ซื้อสินค้าเกษตรและอาหารผ่านช่องทางออนไลน์ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 402 คนด้วยแบบสอบถาม พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เคยใช้บริการส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ โดยสินค้าที่นิยมซื้อมากที่สุด ได้แก่ ผลไม้พรีเมียม ซึ่งเป็นสินค้าที่ผู้ตอบแบบสอบถามมีความเต็มใจจ่ายค่าบริการส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิในราคาสูงที่สุด เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคที่เคยใช้และไม่เคยใช้บริการส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิด้วย Independent-sample t-test พบว่า ผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่มมีความเต็มใจจ่ายค่าบริการแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในสินค้าเพียง 2 ประเภท ได้แก่ น้ำผัก/ผลไม้ และไอศกรีม โดยกลุ่มที่เคยใช้บริการมีค่าเฉลี่ยความเต็มใจจ่ายที่ 82.12 บาทต่อครั้ง และ 85.08 บาทต่อครั้ง ตามลำดับ และกลุ่มที่ไม่เคยใช้บริการมีค่าเฉลี่ยความเต็มใจจ่ายที่ 72.23 บาทต่อครั้ง และ 67.30 บาทต่อครั้ง ตามลำดับ ส่วนสินค้าประเภทอื่น ๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำสำคัญ: การขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิ, ความเต็มใจจ่าย, สินค้าเกษตรและอาหาร

Abstract

This research studied behaviors, attitudes and consumers' willingness to pay for temperature-controlled delivery services for agri-food products to provide information for strategy development of distributors. From the questionnaire survey of 402 consumers in Bangkok Metropolitan who bought agri-food products online, most respondents had previously used temperature-controlled delivery services. The most purchased items were premium fruits of which the respondents also gave the highest willingness to pay for temperature-controlled delivery services. When analyzing differences between the willingness-to-pay of the consumers who had and had not used temperature-controlled delivery services using independent-sample t-tests, it was found that the two groups had different willingness-to-pay for the services on two product categories only, which were vegetable/fruit juices and ice cream. The willingness-to-pay of those who had used the services were 82.12 and 85.08 baht per order on average, respectively and the willingness-to-pay of those who had not used the services were 72.23 and 67.30 baht per order on average, respectively. Those of the other product categories were found not statistically different.

Keywords: agri-food products, temperature-controlled delivery service, willingness to pay

คำนำ

สินค้าเกษตรและอาหารเป็นสินค้าที่เสี่ยงต่อการเน่าเสียได้ง่าย ซึ่งในประเทศไทย ยังขาดขั้นตอนสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิหลังการเก็บเกี่ยวจากแหล่งผลิตให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม สินค้าเกษตรที่เน่าเสียง่ายจะมีความเสี่ยงต่อความความสูญเสียด้านคุณภาพ และจะเพิ่มมากขึ้นทันทีเมื่อขนส่งในระยะทางไกลหรือใช้ระยะเวลานานในการขนส่งสินค้า สำหรับประเทศไทย การขนส่งด้วยการควบคุมอุณหภูมิ (Cold chain logistic) ยังอยู่ในระดับต่ำ และคาดว่ามีสินค้าไม่ถึง 10% ที่ถูกขนส่งและจัดเก็บอย่างเหมาะสม และมีการสูญเสียของผลผลิตมากถึง 30–40% ของผลผลิตทางการเกษตรที่เน่าเสียง่ายในแต่ละปี ในขณะที่ประเทศที่พัฒนาแล้วมีอัตราสูญเสียระหว่างกระบวนการดังกล่าวน้อยกว่า 3% จากปริมาณการผลิตสินค้าเกษตรทั้งหมด เนื่องจากมีการเก็บรักษาผลผลิตให้อยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสมตลอดกระบวนการโลจิสติกส์โซ่ความเย็น (ธวัชชัย, 2563) ข้อเสียที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตผลทางการเกษตรมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือ ทำให้ผลไม้สุกเร็วขึ้น หรือทำให้เกิดการเน่าเสียเร็วขึ้น จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียเจริญอย่างรวดเร็ว ผลผลิตทางการเกษตรมีการคายน้ำ ทำให้น้ำหนักสินค้าสูญหาย เป็นต้น (ดนัย, 2550) แต่การขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมินั้นมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการขนส่งทั่วไป และผู้บริโภคส่วนใหญ่ยังไม่ให้ความสำคัญด้านคุณภาพหรือตระหนักถึงความสูญเสียจากสินค้าที่เน่าเสียหรือเสื่อมสภาพและความปลอดภัยของอาหาร จากการสำรวจข้อมูลและสัมภาษณ์ผู้จัดจำหน่ายสินค้าและผู้บริโภคเบื้องต้น พบว่า ผู้จัดจำหน่ายสินค้าเกษตรและอาหารส่วนหนึ่งยังไม่พร้อมใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ เนื่องจากต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผู้บริโภคก็ยังไม่เต็มใจจ่ายค่าบริการที่สูงขึ้นเช่นกัน

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคชาวจีนในการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ ได้แก่ รายได้ครัวเรือน ระดับการศึกษาของผู้บริโภค การดูแลและการสนับสนุนของภาครัฐ โดยความเต็มใจจ่ายจะแปรผันตามรายได้ครัวเรือนและระดับการศึกษา (Rong et al., 2019) ในขณะที่ Wu et al. (2018) ได้ศึกษาคุณภาพการบริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิต่อความเต็มใจในการซื้อสินค้าอาหารสดออนไลน์ในประเทศจีน โดยแบ่งผู้บริโภคเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่เคยและกลุ่มที่ไม่เคยซื้อสินค้าอาหารสดออนไลน์ พบว่า ปัจจัยหลักที่กระตุ้นให้เกิดการซื้อสินค้าอาหารสดออนไลน์ สำหรับกลุ่มที่ไม่เคยซื้อ คือ ความสะดวกในการซื้อ รองลงมา ได้แก่ ระยะเวลาในการขนส่ง และความหลากหลายของสินค้า ตามลำดับ สำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่เคยซื้อสินค้าอาหารสดออนไลน์ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้บริการ ได้แก่ ความเร็วในการจัดส่งสินค้า รองลงมาคือ ความสดของสินค้า และความยืดหยุ่นในการรับ-ส่งของให้แก่ลูกค้า ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Shepherd (2006) ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตผลสดของผู้บริโภคในเอเชีย ได้แก่ รูปลักษณ์ความสดและราคา ส่วนปัจจัยสำคัญอื่น ๆ ได้แก่ การนำเสนอ สี ความสุก และความสะดวกของสถานที่จำหน่าย งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซื้อสินค้าเกษตรและอาหารออนไลน์ การใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ รวมถึงทัศนคติการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ เพื่อวิเคราะห์ความเต็มใจจ่ายสำหรับการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิของผู้บริโภค ในการศึกษาความเต็มใจจ่ายของการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิจะใช้วิธีการสมมติสถานการณ์ให้ประเมินมูลค่า (Contingent Valuation Method: CVM) เป็นเทคนิคการประเมินมูลค่าความพึงพอใจแบบถามตรง (Stated preference method) ด้วยการถามถึงความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณหรือคุณภาพของสินค้าหรือบริการที่กำลังจะเกิดขึ้นหรือสมมติขึ้น (Hypothetical Situation) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบสอบถามแบบปลายเปิด (Open-ended Question) เป็นรูปแบบการออกแบบสอบถามที่ไม่ระบุทางเลือกหรือจำนวนเงินที่ผู้ตอบแบบสอบถามควรจะตอบ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการออกแบบสอบถามเพื่อหาความเต็มจ่ายตามวิธี CVM (ชนิตา และรภัสสรณ์, 2555)

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการสำรวจโดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูล ซึ่งผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นจากการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) จากตัวแทนผู้บริโภคที่เคยซื้อสินค้าเกษตรและอาหารผ่านช่องทางออนไลน์จำนวน 3 คนที่มีอายุและอาชีพที่แตกต่างกัน เพื่อทราบข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะผู้บริโภคและพฤติกรรมการบริโภค และเก็บรวบรวมข้อมูลการจำหน่ายสินค้าของผู้จัดจำหน่ายผ่านช่องทางออนไลน์ เช่น ประเภทสินค้าที่จำหน่าย ราคาสินค้า วิธีการจัดส่งสินค้า ค่าบริการจัดส่งสินค้า เป็นต้น รวมถึงอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อนำมาสร้างแบบสอบถาม โดยแบบสอบถามประกอบไปด้วย 4 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 ข้อมูลประชากรศาสตร์

ส่วนที่ 2 พฤติกรรมการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร

ส่วนที่ 3 ทัศนคติของผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารในปัจจุบัน

ส่วนที่ 4 ความเต็มใจจ่ายผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร

ในส่วนของการตั้งคำถามเพื่อวิเคราะห์ทัศนคติของผู้บริโภคอ้างอิงจากงานวิจัยของ Rong et al. (2019) และ Wu et al. (2018) พบว่าทัศนคติในด้านความปลอดภัยของอาหาร พฤติกรรมการรับรู้ และปัจจัยอื่น ๆ เช่น คุณภาพสินค้าและการบริการ ความรวดเร็ว ความสะดวกในการรับ-ส่งของ ส่งผลต่อความเต็มใจในการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ จึงนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ประกอบในการออกแบบแบบสอบถาม

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาพฤติกรรมการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารและความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตร แบ่งตามประเภทของสินค้า รวม 11 ประเภท ประกอบด้วย ผัก ผลไม้พรีเมียม ผลไม้ตามฤดูกาล ผลไม้ปอกเปลือกพร้อมทาน น้ำผลไม้ นมและผลิตภัณฑ์จากนม ไอศกรีม เนื้อสัตว์ อาหารทะเล อาหารแปรรูปแช่เย็น และอาหารแปรรูปแช่แข็ง โดยมีวิธีการศึกษาวิจัยดังนี้

1. เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามกับผู้บริโภคที่อาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่มีประสบการณ์การซื้อสินค้าเกษตรและอาหารออนไลน์ โดยคำนวณขนาดตัวอย่างจากสูตรของ Cochran กรณีที่ไม่ทราบจำนวนประชากรที่แท้จริง และไม่ทราบสัดส่วนของลักษณะที่สนใจในประชากร (p) โดยสมมติให้สัดส่วนของลักษณะที่สนใจในประชากร เท่ากับ 0.5 ด้วย Equation 1 (กัลยา, 2545) ซึ่งคำนวณขนาดของกลุ่มตัวอย่างได้เท่ากับ 385 คน ซึ่งในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามกับผู้บริโภคกลุ่มตัวอย่างจำนวน 402 คน

$$n = \frac{Z^2}{4e^2} \quad (1)$$

n คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

Z คือ คะแนนมาตรฐาน โดยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 1.96

e คือ ระดับความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ ในที่นี้กำหนด e = 0.05

2. วิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของแบบสอบถามในรูปแบบสเกล ในส่วนที่ 3 หลังจากการทำ Pre-test จำนวน 30 คน ซึ่งใช้วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์อัลฟ่าของครอนบัค (Cronbach's alpha coefficient) โดยแบบสอบถามมีค่าสัมประสิทธิ์มากกว่า 0.7 จึงถือว่าแบบสอบถามมีความเชื่อถือได้ (Malhotra and Peterson, 2006)

3. วิเคราะห์ข้อมูลทางด้านประชากรศาสตร์และพฤติกรรมการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารของผู้บริโภค โดยใช้ความถี่และร้อยละแยกตามประเภทสินค้า

4. วิเคราะห์ทัศนคติของผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร ณ ปัจจุบัน โดยใช้ Independent-sample t-test เพื่อเปรียบเทียบทัศนคติของผู้บริโภคกลุ่มที่ไม่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิและเคยใช้บริการ และใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5. วิเคราะห์ความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร โดยใช้ Independent-sample t-test เพื่อเปรียบเทียบความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคกลุ่มที่ไม่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิและเคยใช้บริการ และใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่ามัธยฐานในการวิเคราะห์ความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคในภาพรวม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านประชากรศาสตร์และพฤติกรรมการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารของผู้บริโภค

จากการศึกษากลุ่มตัวอย่างที่เคยซื้อสินค้าเกษตรและอาหารผ่านช่องทางออนไลน์ที่อาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 402 คน สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มผู้บริโภคที่เคยใช้บริการการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิจำนวน 328 คน (81.6%) และกลุ่มผู้บริโภคที่ไม่เคยใช้บริการ 74 คน (18.4%) พบว่ากลุ่มผู้บริโภคที่เคยใช้บริการส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (64.3%) อายุ 16–60 ปี มีการศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรี (61.5%) รองลงมาคือระดับปริญญาโทหรือสูงกว่า (34.5%) เป็นพนักงานเอกชนมากที่สุด (45.7%) รองลงมาคือธุรกิจส่วนตัว/ค้าขาย (24.04%) มีรายได้ต่อเดือน 20,001-30,000 บาท (26.2%) และ 40,001-50,000 บาท (26.2%) และรายต่อครัวเรือนมากกว่า 90,001 บาท (32.6%) ที่อยู่อาศัยมีลักษณะเป็นบ้านเดี่ยว (44.5%) รองลงมาคือคอนโดมิเนียมหรืออพาร์ทเมนท์ (29.0%) ส่วนใหญ่จะซื้อเพื่อรับประทานเอง (65.5%) รองลงมาคือซื้อให้คนในครอบครัว (29.9%) โดยตัวผู้บริโภคเองมีอิทธิพลในการตัดสินใจซื้อมากที่สุด เหตุผลที่ใช้บริการการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ ได้แก่ (1) เพื่อรักษาคุณภาพของสินค้า (2) เชื่อถือคุณภาพของแบรนด์หรือผู้ขาย (3) มั่นใจในความปลอดภัยของสินค้าระหว่างการขนส่ง ผู้บริโภคที่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิส่วนใหญ่แล้วไม่เคยพบปัญหาระหว่างการขนส่ง แต่ผู้บริโภคบางส่วนก็เห็นว่าค่าบริการการขนส่งมีราคาแพง สำหรับสินค้าส่วนใหญ่ที่ผู้บริโภคกลุ่มนี้ซื้อ ได้แก่ ผลไม้พรีเมียม โดยให้เหตุผลว่าเป็นผลไม้ที่หาซื้อยาก มักไม่มีขายในตลาดทั่วไป ดังนั้น การซื้อผ่านช่องทางออนไลน์จึงมีความสะดวกกว่า ความถี่ในการซื้อ 2-3 ครั้งต่อเดือน ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการซื้อสินค้า 860 บาท/ครั้ง ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการขนส่ง 113 บาท/ครั้ง แหล่งที่มาของสินค้าส่วนใหญ่มาจากทั่วประเทศ รองลงมาคือกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยซื้อจากผู้รวบรวมหรือตัวแทนขายผ่านช่องทางออนไลน์ รองลงมาคือซื้อโดยตรงจากเกษตรกรหรือผู้ผลิตผ่านช่องทางออนไลน์ ใช้บริการการขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิในกล่องรักษาอุณหภูมิ โดยเป็นรถขนส่งจากผู้จัดจำหน่ายเอง สินค้าที่ผู้บริโภคกลุ่มนี้ไม่ซื้อมากที่สุด ได้แก่ ผลไม้ปอกเปลือกพร้อมทาน โดยให้เหตุผลว่าไม่มั่นใจในคุณภาพ กลัวสินค้าไม่สดและไม่สะอาด

กลุ่มผู้บริโภคที่ไม่เคยใช้บริการการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิจำนวน 74 คน ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (40.9%) อายุ 18–65 ปี มีการศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรี (60.8%) รองลงมาคือระดับปริญญาโทหรือสูงกว่า (39.7%) เป็นพนักงานเอกชนมากที่สุด (41.9%) รองลงมาคือนักเรียนหรือนักศึกษา มีรายได้ต่อเดือน 10,001–20,000 บาท (31.1%) และรายต่อครัวเรือนมากกว่า 90,001 บาท (36.5%) ที่อยู่อาศัยมีลักษณะเป็นบ้านเดี่ยว (50.0%) รองลงมาคือคอนโดมิเนียมหรืออพาร์ทเมนท์ (24.3%) ส่วนใหญ่จะซื้อเพื่อรับประทานเอง รองลงมาคือซื้อให้คนในครอบครัว โดยตัวผู้บริโภคเองมีอิทธิพลในการตัดสินใจซื้อมากที่สุด เหตุผลที่ไม่เคยใช้บริการการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ เนื่องจาก (1) ไม่ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการบริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ (2) ผู้บริโภคคิด

ว่าสินค้าที่ซื้อไม่จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ (3) ค่าขนส่งมีราคาแพง ผู้บริโภคกลุ่มนี้ส่วนใหญ่แล้วไม่เคยพบปัญหาระหว่างการขนส่ง แต่ผู้บริโภคบางส่วนก็พบปัญหาเรื่องสินค้าไม่สด มีคุณภาพด้อยลง สำหรับสินค้าส่วนใหญ่ที่ผู้บริโภคกลุ่มนี้ซื้อได้แก่ น้ำผัก/ผลไม้ โดยให้เหตุผลว่าสะดวกในการซื้อ ความถี่ในการซื้อ 2-3 ครั้งต่อเดือน ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการซื้อสินค้า 334 บาท/ครั้ง ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการขนส่ง 35 บาท/ครั้ง แหล่งที่มาของสินค้าส่วนใหญ่มาจากกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยซื้อจากเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันของซูเปอร์มาร์เก็ตและไฮเปอร์มาร์เก็ต ใช้บริการขนส่งแบบปกติ (แบบด่วน โดยได้รับสินค้าภายใน 1 วัน) โดยใช้บริการขนส่งของ Grab Express และ Line Man สินค้าที่ผู้บริโภคกลุ่มนี้ไม่ซื้อมากที่สุดได้แก่ เนื้อสัตว์ โดยให้เหตุผลว่า ต้องการเลือกซื้อเอง

การวิเคราะห์ทัศนคติของผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร ณ ปัจจุบัน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบทัศนคติของผู้บริโภคที่เคยใช้บริการและไม่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร โดยใช้ Independent-sample t-test พบว่ากลุ่มผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่มมีระดับความคิดเห็นเฉลี่ยต่อทัศนคติการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารแตกต่างกัน โดยกลุ่มที่เคยใช้บริการมีระดับความคิดเห็นเฉลี่ยต่อทัศนคติส่วนใหญ่สูงกว่ากลุ่มที่ไม่เคยใช้บริการ แต่สำหรับความคิดเห็นต่อเรื่องการบริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิมีความยุ่งยากและราคาแพงกว่าการจัดส่งแบบธรรมดานั้น กลุ่มที่ไม่เคยใช้บริการมีระดับความคิดเห็นเฉลี่ยที่สูงกว่ากลุ่มผู้บริโภคที่เคยใช้บริการ ระดับความคิดเห็นเฉลี่ยต่อทัศนคติที่สูง 3 อันดับแรกของกลุ่มผู้บริโภคที่เคยใช้บริการ ได้แก่ ราคาของสินค้ามีผลต่อความเต็มใจจ่ายค่าใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ สินค้าแช่แข็งควรเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C และการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิแช่เย็นหรือแช่แข็งทำให้มีความมั่นใจในคุณภาพมากขึ้น ระดับความคิดเห็นเฉลี่ยต่อทัศนคติที่สูง 3 อันดับแรกของกลุ่มผู้บริโภคที่ไม่เคยใช้บริการ ได้แก่ การขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิมีราคาแพงกว่าขนส่งทั่วไป ราคาของสินค้ามีผลต่อความเต็มใจจ่ายค่าใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ และการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิแช่เย็นหรือแช่แข็งทำให้มีความมั่นใจในคุณภาพมากขึ้น (Table 1)

การวิเคราะห์ความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร

ผลการศึกษาความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารจากผู้ตอบแบบสอบถามโดยรวม พบว่า ผู้บริโภคที่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารมีความเต็มใจจ่ายค่าบริการสูงที่สุดให้กับผลไม้พรีเมียมในราคาเฉลี่ย 131.59 บาท/ครั้ง (19.07% ของราคาสินค้าต่อการสั่งซื้อ) รองลงมา ได้แก่ อาหารแปรรูปแช่แข็งในราคาเฉลี่ย 98.27 บาท/ครั้ง (29.07% ของราคาสินค้าต่อการสั่งซื้อ) และอาหารแปรรูปแช่เย็น ในราคาเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 98.06 บาท/ครั้ง (29.01% ของราคาสินค้าต่อการสั่งซื้อ) สำหรับผู้บริโภคที่ไม่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหาร มีความเต็มใจจ่ายค่าบริการสูงที่สุดให้กับผลไม้พรีเมียมในราคาเฉลี่ย 119.93 บาท/ครั้ง (17.38% ของราคาสินค้าต่อการสั่งซื้อ) รองลงมา ได้แก่ อาหารแปรรูปแช่เย็น ในราคาเฉลี่ย 91.14 บาท/ครั้ง (26.96% ของราคาสินค้าต่อการสั่งซื้อ) และผลไม้ตามฤดูกาล ในราคาเฉลี่ย 90.15 บาท/ครั้ง (17.17% ของราคาสินค้าต่อการสั่งซื้อ) ดังแสดงใน Table 2

Table 1 The average level of attitudes on the temperature-controlled delivery services for agri-food products

	Consumer's attitudes	Mean ± SD	
		Never Experienced	Experienced
1.	There is more confident in quality by using the temperature-controlled delivery services	3.95 ± 0.94[a]	4.35 ± 0.75[b]
2.	It can reduce loss of product by using the temperature-controlled delivery services	3.50 ± 0.97[a]	4.11 ± 0.90[b]
3.	It can maintain the nutritional (such as vitamins) of the product by using the temperature-controlled delivery services	3.71 ± 0.95[a]	4.15 ± 0.85[b]
4.	It can reduce Food loss and Food waste of product by using the temperature-controlled delivery services	3.84 ± 1.07[a]	4.22 ± 0.74[b]
5.	Fresh agricultural products (e.g. vegetables / fruits, meat, seafood, etc.) should be kept at 0-20 ^{o}C.	3.91 ± 0.93[a]	4.34 ± 0.81[b]
6.	Frozen products (e.g. frozen meats, etc.) should be stored at -18 ^{o}C.	3.94 ± 0.99[a]	4.36 ± 0.75[b]
7.	Using the temperature-controlled delivery services is faster than normal delivery services	3.37 ± 1.02[a]	4.04 ± 0.93[b]
8.	Using the temperature-controlled delivery services is more complicated than normal delivery services	3.73 ± 0.95[a]	3.42 ± 1.19[b]
9.	There must be flexibility in product delivery. (Time for receiving - delivery)	3.69 ± 1.01[a]	3.98 ± 0.89[b]
10.	Using the temperature-controlled delivery services is reliable	3.78 ± 0.96[a]	4.23 ± 0.83[b]
11.	Using the temperature-controlled delivery services is more expensive than normal delivery services	4.11 ± 0.96[a]	3.71 ± 1.29[b]
12.	Using the temperature-controlled delivery services is cost-effective in terms of product quality maintenance and safety	3.86 ± 0.91[a]	4.26 ± 0.72[b]
13.	Using the temperature-controlled delivery services can be traceable In case of damage to the product	3.52 ± 1.07[a]	4.09 ± 0.86[b]
14.	Government policies can help to support using the temperature-controlled delivery services	3.18 ± 1.24[a]	3.75 ± 1.09[b]
15.	Public relations provide the information on the temperature-controlled delivery services to consumers can make consumers use more services	3.80 ± 0.96[a]	4.09 ± 0.87[b]
16.	Premium products influence willingness to pay for using temperature-controlled delivery services	3.94 ± 1.00[a]	4.33 ± 0.80[b]
17.	The price of a product influence willingness to pay for using temperature-controlled delivery services	4.02 ± 0.92[a]	4.36 ± 0.70[b]

Note: The horizontal means with different letters show statistical differences. ($p \leq 0.05$)

Table 2 Customer's willingness to pay for temperature-controlled delivery services (in Thai baht)

Product category	Willingness to pay for temperature-controlled delivery services	
	Never Experienced	Experienced
	Mean ± SD	Mean ± SD
Fresh vegetables	55.64 ± 33.13	60.06 ± 34.48
Premium fruits	119.93 ± 64.46	131.59 ± 79.76
Seasonal fruits	90.15 ± 43.05	85.14 ± 44.76
Ready-to-eat fruits	68.99 ± 36.30	72.53 ± 37.65
Vegetable/fruit juices	72.23 ± 30.13[a]	82.12 ± 29.68[b]
Milk and dairy products	65.53 ± 51.90	63.9 ± 35.83
Ice cream	67.3 ± 40.24[a]	85.08 ± 53.56[b]
Meats	64.8 ± 36.54	72.18 ± 44.66
Seafood	79.99 ± 42.35	82.48 ± 44.47
Chilled processed foods	91.14 ± 44.37	98.06 ± 47.37
Frozen processed foods	86.07 ± 46.18	98.27 ± 59.68

Note: The horizontal means with different letters show statistical differences. ($p \leq 0.05$)

จาก Table 2 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคที่เคยใช้บริการและไม่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับสินค้าเกษตรและอาหารทั้ง 11 ประเภท พบว่า ผู้บริโภคที่เคยใช้บริการมีแนวโน้มที่จะเต็มใจจ่ายค่าบริการสูงกว่าผู้บริโภคที่ไม่เคยใช้บริการ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภคทั้งสองกลุ่มด้วย Independent-sample t-test พบว่า กลุ่มผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่มมีความเต็มใจจ่ายต่อการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในรายการสินค้าเพียง 2 ประเภท ได้แก่ น้ำผัก/ผลไม้ และไอศกรีม โดยกลุ่มที่ไม่เคยใช้บริการมีค่าเฉลี่ยความเต็มใจจ่ายค่าบริการการจัดส่งที่ 72.23 บาทต่อครั้ง และกลุ่มที่เคยใช้บริการมีค่าเฉลี่ยความเต็มใจจ่ายค่าบริการที่ 82.12 บาทต่อครั้ง สำหรับน้ำผัก/ผลไม้ และสำหรับไอศกรีม กลุ่มที่ไม่เคยใช้บริการมีค่าเฉลี่ยความเต็มใจจ่ายค่าบริการการจัดส่งที่ 67.30 บาทต่อครั้ง กลุ่มที่เคยใช้บริการมีค่าเฉลี่ยความเต็มใจจ่ายค่าบริการที่ 85.08 บาทต่อครั้ง ส่วนสินค้าประเภทอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุป

จากผลการศึกษาพบว่าผู้บริโภคที่ซื้อสินค้าเกษตรและอาหารออนไลน์นั้นเคยใช้บริการการขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิ สาเหตุสำคัญอันดับแรก ได้แก่ เพื่อรักษาคุณภาพของสินค้า รองลงมาได้แก่ ความเชื่อถือในคุณภาพของแบรนด์หรือผู้ขาย แสดงให้เห็นว่าผู้บริโภคให้ความสำคัญกับคุณภาพของสินค้าและความน่าเชื่อถือของผู้จัดจำหน่าย สำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่ยังไม่เคยใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ สาเหตุสำคัญได้แก่ ไม่ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการบริการจัดส่งสินค้าแบบคุมอุณหภูมิ ดั้งนั้นผู้จัดจำหน่ายควรให้ข้อมูลแก่ลูกค้าเกี่ยวกับการบริการจัดส่ง เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือและกระตุ้นในผู้บริโภคใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบคุมอุณหภูมิมากขึ้น และจากระดับคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยจะเห็นได้ว่าผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่ม ทั้งกลุ่มผู้ที่เคยใช้บริการและไม่เคยใช้บริการการขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิมีคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ยในด้านของราคาของสินค้ามีผลต่อความเต็มใจจ่ายค่าใช้บริการ

จัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ และการใช้บริการจัดส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิแบบแช่เย็นหรือแช่แข็งทำให้มีความมั่นใจในคุณภาพมากขึ้นอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับความเต็มใจจ่ายของผลไม้พรีเมียม ผลไม้พรีเมียมเป็นสินค้าที่มีราคาสูงส่งผลให้ผู้บริโภคมีความเต็มใจจ่ายค่าขนส่งที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย โดยในงานวิจัยขั้นต่อไปผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุเพื่อระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อความเต็มใจจ่ายในการใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิของสินค้า เมื่อผู้จัดจำหน่ายทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเต็มใจจ่ายในการใช้บริการของผู้บริโภคและมูลค่าความเต็มใจจ่ายของสินค้าแต่ละประเภท ผู้จัดจำหน่ายสามารถนำผลวิจัยไปสร้างเป็นกลยุทธ์ส่งเสริมการขายต่าง ๆ ที่ช่วยในการกระตุ้นและส่งเสริมการใช้บริการและการกำหนดราคาค่าบริการการขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิและการควบคุมต้นทุนในด้านขนส่งให้เหมาะสม กรณีที่ราคาค่าขนส่งจริงสูงกว่าความเต็มใจจ่ายของผู้บริโภค ผู้จัดจำหน่ายอาจใช้วิธีการปันส่วนค่าขนส่งระหว่างผู้บริโภคและผู้จัดจำหน่าย เพื่อช่วยให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อและเลือกใช้บริการจัดส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิง่ายขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านในการให้ข้อมูลเป็นอย่างดี และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2545. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติสำหรับการบริหารและวิจัย, พิมพ์ครั้งที่ 6. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ชนิตา พันธุ์มณี และรภัสสรณ์ คงธนจารุอนันต์. 2555. ความยินดีที่จะจ่ายและความสามารถที่จะจ่ายได้สำหรับผักสดอินทรีย์ของผู้บริโภคในจังหวัดเชียงใหม่. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ดนัย บุณยเกียรติ. 2550. ระบบสายโซ่ความเย็นในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลิตผลพืชสวน. โครงการหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ด้านเกษตรเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธวัชชัย บัววัฒน์. 2563. การขนส่งอาหารแบบควบคุมอุณหภูมิ (Cold Chain Logistics). https://beginrabbit.com/2020/04/14/การขนส่งอาหารแบบควบคุม/, 14 เมษายน 2563.

Malhotra, N.K., Peterson, M. 2006. Basic Marketing Research: A Decision-making Approach. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall.

Rong, F., Zhang, Y., Wang, Z., Li, Y. 2019. Influencing factors of consumer willingness to pay for cold chain logistics: an empirical analysis in China. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing 10: 3279–3285.

Shepherd, A.W. 2006. Quality and safety in the traditional horticultural marketing chains of Asia. Agricultural Management, Marketing and Finance: Occasional Paper 11. FAO, Rome.

Wu, T., Tang, S, Yuan, Z. 2019. Cold chain logistics service quality on the willingness of online shopping fresh products based on logistic regression model. In: Tang, Y., Zu, Q., Rodríguez García, J. (eds). Human Centered Computing (HCC) 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 11354. Springer, Cham, Switzerland. pp. 497–502.

การจำแนกสินค้าคงคลังด้วยการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ K-Means เพื่อการบริหารจัดการสินค้าคงคลังผลิตภัณฑ์สมุนไพรของร้านขายยา

Inventory classification by K-Means clustering for herbal product inventory management of a pharmacy

สุวนันท์ วิมลรัชต์มโนรม*, ปรารถนา ปรารถนาดี

Suwanan Wimolratmanorom*, Parthana Parthanadee

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: suwanan.wi@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการแบ่งกลุ่มสินค้าผลิตภัณฑ์สมุนไพร เพื่อการบริหารจัดการและควบคุมสินค้าคงคลังของร้านขายยากรณีศึกษาในจังหวัดปราจีนบุรี ปัจจุบันร้านขายยากรณีศึกษาประสบปัญหาการควบคุมสินค้าคงคลัง ทำให้มีต้นทุนการบริหารจัดการสินค้าคงคลังสูง เนื่องจากไม่มีนโยบายในการกำหนดปริมาณการสั่งซื้อและระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสม จึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสินค้าคงคลังจำนวน 280 รายการ ย้อนหลัง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 เพื่อนำมาจำแนกกลุ่มสินค้าตามระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC โดยใช้เทคนิคการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Clustering technique) แบบ K-Means พบว่า สินค้ากลุ่ม A ซึ่งเป็นกลุ่มที่มียอดขายสูงสุด ประกอบด้วยสินค้าจำนวน 16 รายการ มียอดขายคิดเป็นร้อยละ 38.46 ของยอดขายทั้งหมด สินค้ากลุ่ม B ซึ่งมียอดขายปานกลาง ประกอบด้วยสินค้าจำนวน 50 รายการ มียอดขายคิดเป็นร้อยละ 33.27 ของยอดขายทั้งหมด และสินค้ากลุ่ม C ซึ่งมียอดขายต่ำสุด ประกอบด้วยสินค้าจำนวน 214 รายการ มียอดขายคิดเป็นร้อยละ 28.27 ของยอดขายทั้งหมด จากนั้นนำเสนอนโยบายการสั่งซื้อและควบคุมสินค้าคงคลังที่เหมาะสมสำหรับสินค้าแต่ละกลุ่มให้แก่ร้านขายยากรณีศึกษาต่อไป

คำสำคัญ: การควบคุมสินค้าคงคลัง, การแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ K-Means, ระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC, ร้านขายยา

Abstract

This research studied the classification of herbal products for inventory management and control of a pharmacy in Prachin Buri province. At present, the pharmacy in this case study faced an inventory control problem which incurred a high cost of inventory management. This was because there was no policy for determining appropriate order quantities and inventory levels. We thus collected its inventory historical data of 280 items in total, for 12 months, from January 2020 to December 2020, to classify the items based on ABC inventory classification, using K-Means clustering technique. The classification result showed that A group with the highest total sales, consisted of 16 items, contributing to 38.46% of the total sales; B group with intermediate total sales, consisted of 50 items, contributing to 33.27% of the total sales; and C group with the lowest sales, consisted of 214 items, contributing to 28.27% of the total sales. Next, an appropriate ordering and inventory control policy were proposed for each product group to the case-study pharmacy.

Keywords: ABC inventory classification, inventory control, K-Means clustering, pharmacy

คำนำ

ร้านขายยาเป็นหน่วยบริการทางด้านสาธารณสุขที่ผู้คนสามารถเข้าถึงได้ง่าย โดยทำหน้าที่ในการจำหน่ายยาควบคู่ไปกับการคำปรึกษาเรื่องการใช้ยาและเวชภัณฑ์ต่างๆ รวมถึงยังช่วยประเมินสุขภาพในเบื้องต้นได้อีกด้วย เมื่อใดที่มีอาการเจ็บป่วยเพียงเล็กน้อย คนทั่วไปมักจะนิยมไปร้านขายยาก่อนเป็นอันดับแรก โดยให้เหตุผลว่ามีความสะดวกรวดเร็วและเสียค่าใช้จ่ายไม่สูงเมื่อเทียบกับการไปโรงพยาบาล (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2560) ปัจจุบันผลิตภัณฑ์สมุนไพรและยาแผนโบราณกำลังได้รับความนิยมจากผู้บริโภคมากขึ้น เนื่องจากเชื่อว่ามีผลข้างเคียงน้อยเมื่อเทียบกับยาแผนปัจจุบันที่อาจมีปริมาณสารตกค้างในร่างกายสูง ดังนั้นกลุ่มผลิตภัณฑ์สมุนไพรและยาแผนโบราณจึงเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีความน่าสนใจ และเป็นอีกหนึ่งทางเลือกใหม่ให้กับผู้บริโภค

ด้วยพฤติกรรมของผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ธุรกิจร้านขายยามีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นในทุกปี ทำให้เกิดการแข่งขันกันในการดำเนินธุรกิจมากขึ้น ดังนั้นการดำเนินธุรกิจจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับตัว เพื่อหาแนวทางที่ดีในการลดต้นทุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของบริหารจัดการสินค้าคงคลัง เนื่องจากเป็นต้นทุนหลักของธุรกิจค้าปลีกซึ่งรวมถึงร้านขายยา และควรมีการควบคุมปริมาณสินค้ารวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของสินค้าคงคลังให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการลดต้นทุนสินค้าคงคลัง อีกทั้งยังสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าและรักษาส่วนแบ่งทางการตลาดไว้ได้อีกด้วย

ร้านขายยากรณีศึกษา ตั้งอยู่ในจังหวัดปราจีนบุรี ปัจจุบันประสบปัญหาการควบคุมสินค้าคงคลังทำให้มีต้นทุนในการบริหารจัดการสินค้าคงคลังสูง โดยมีสาเหตุเนื่องมาจาก 1) ร้านไม่มีนโยบายในการควบคุมปริมาณสินค้าคงคลัง เพราะใช้การประมาณจำนวนสินค้าในแต่ละรอบของการสั่ง หรือสั่งตามปริมาณสั่งซื้อขั้นต่ำที่ทางบริษัทยาระบุไว้ จึงทำให้สินค้าบางรายการมีปริมาณมาก (Overstock) จนอาจส่งผลให้สินค้าหมดอายุ และมีเงินทุนที่จมไปกับการจัดเก็บสินค้า และ 2) ไม่มีการวิเคราะห์ข้อมูลยอดขายและปริมาณสินค้าคงคลังภายในร้าน ทำให้ไม่ทราบปริมาณความต้องการสินค้าที่แน่นอน เพราะมาจากการคาดคะเนของเจ้าของร้าน จึงอาจส่งผลให้มีสินค้าคงคลังมากเกินไป ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่ได้รับการแก้ไข ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาเพื่อหาแนวทางในการบริหารจัดการสินค้าคงคลังให้แก่ร้านขายยากรณีศึกษา โดยได้เลือกศึกษาสินค้ากลุ่มผลิตภัณฑ์สมุนไพรและยาแผนโบราณ ซึ่งเป็นกลุ่มสินค้าคงคลังที่มีการเคลื่อนไหวค่อนข้างช้า และจำแนกกลุ่มสินค้าตามระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC (ABC inventory classification) ด้วยเทคนิคการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) โดยการแบ่งกลุ่ม (Clustering) แบบ K-Means เปรียบเทียบกับการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC ด้วยประสบการณ์ จากนั้นนำเสนอนโยบายการสั่งซื้อและควบคุมสินค้าคงคลังที่เหมาะสมสำหรับสินค้าแต่ละกลุ่มให้แก่ร้านขายยากรณีศึกษาต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เก็บรวบรวมข้อมูลยอดขายสินค้าภายในร้านขายยากรณีศึกษา

กลุ่มสินค้าที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ กลุ่มสินค้าผลิตภัณฑ์สมุนไพรและยาแผนโบราณ โดยทำการรวบรวมข้อมูลยอดขายสินค้าตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 ถึงเดือนธันวาคม 2563 จำนวนทั้งสิ้น 280 รายการ

2. วิเคราะห์การจัดกลุ่มสินค้าตามลำดับความสำคัญ

2.1 นำข้อมูลยอดขายสินค้ามาจำแนกกลุ่มตามระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC (ABC classification analysis) ดังนี้ (Sipper and Bulfin, 1997; Jacobs, et al., 2010)

กลุ่ม A เป็นกลุ่มสินค้าที่มีจำนวนน้อยแต่มียอดขายสูง จึงส่งผลต่อต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังมาก ต้องวางแผนการบริหารจัดการและควบคุมระดับสินค้าคงคลังแต่ละรายการอย่างเข้มงวด

กลุ่ม B เป็นกลุ่มสินค้าที่มียอดขายปานกลาง มักวางแผนการบริหารจัดการและควบคุมระดับสินค้าคงคลังแบบกลุ่ม

กลุ่ม C เป็นกลุ่มสินค้าที่มีมูลค่าต่ำและมีจำนวนมาก มักวางแผนการบริหารจัดการและควบคุมระดับสินค้าคงคลังแบบกลุ่ม เช่นเดียวกับกลุ่ม B และไม่เข้มงวดในการควบคุมสินค้าคงคลังมากนัก เนื่องจากส่งผลต่อต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังน้อย

ทั้งนี้ ระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC ไม่มีข้อกำหนดตายตัวในการจำแนกกลุ่มสินค้า ผู้วิเคราะห์สามารถใช้วิจารณญาณในการจัดกลุ่มสินค้าจากประสบการณ์ โดยทั่วไปนิยมให้สินค้ากลุ่ม A, B และ C มีรายการสินค้าประมาณร้อยละ 20, 30 และ 50 ของรายการสินค้าสินค้าทั้งหมดตามลำดับ

2.2 นำข้อมูลยอดขายสินค้ามาจำแนกกลุ่มตามระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC ด้วยเทคนิคการทำเหมืองข้อมูล (Data mining) โดยการแบ่งกลุ่ม (Clustering) ด้วยวิธี K-Means หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การวิเคราะห์ข้อมูลให้กลุ่มแบบไม่เป็นขั้นตอน (Nonhierarchical cluster analysis) โดยการใช้โปรแกรม RapidMiner Studio (Educational License) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ทำเหมืองข้อมูล (Data mining) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) การแบ่งกลุ่มแบบ K-Means มีวัตถุประสงค์ในการแบ่งหน่วยตัวอย่าง m หน่วย ที่ประกอบไปด้วยตัวแปร n ตัว ไปยังกลุ่ม k กลุ่ม (ปราณี, 2548; จันทร์จิรา, 2558) โดยมีวิธีการวิเคราะห์ ดังนี้

(1) กำหนดจำนวนกลุ่มที่ต้องการจะจัดกลุ่ม (K)

(2) อัลกอริทึม (Algorithm) จะคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) เริ่มต้นของแต่ละกลุ่มเพื่อกำหนดเป็นจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่ม เรียกว่า Centroid

(3) คำนวณระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มและแต่ละหน่วยตัวอย่าง

(4) พิจารณาว่าหน่วยตัวอย่างใดอยู่ในรัศมีที่ใกล้จุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มมากที่สุด และจัดหน่วยตัวอย่างนั้นให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน

(5) คำนวณหาจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มและระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่ม และแต่ละหน่วยตัวอย่างใหม่ ทำซ้ำจนข้อมูลในกลุ่มเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจัดกลุ่มสินค้า

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC แบบดั้งเดิมกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม RapidMiner Studio ด้วยวิธี K-Means และเลือกการจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังที่เหมาะสมต่อการบริหารจัดการและควบคุมระดับสินค้าคงคลังร้านขายยากรณีศึกษามากที่สุด

4. เสนอแนะแนวทางการควบคุมสินค้าคงคลังที่เหมาะสม

เสนอแนะแนวทางการควบคุมสินค้าคงคลังที่เหมาะสมสำหรับสินค้าแต่ละกลุ่มให้แก่ร้านขายยากรณีศึกษาตามหลักเกณฑ์ระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC (ABC classification analysis)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC เป็นวิธีการจำแนกสินค้าคงคลังตามลำดับความสำคัญออกเป็นสินค้ากลุ่ม A, B และ C ตามลำดับ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อให้สามารถวางแผนบริหารจัดการสินค้าคงคลังที่มีหลายรายการและลำดับความสำคัญของสินค้าได้อย่างเหมาะสม ระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC แบบดั้งเดิมไม่มีข้อกำหนดในการจำแนกกลุ่มสินค้าที่ตายตัว จึงมีนักวิจัยนำวิธีการจำแนกกลุ่มตัวอย่างที่ซับซ้อนขึ้นมาใช้ในการจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลัง โดยเฉพาะเมื่อต้องการจำแนกสินค้าคงคลังโดยใช้เกณฑ์การพิจารณาแบ่งกลุ่มหลายเกณฑ์ (Multi-criteria ABC classification) เช่น Šarić, et al. (2014) ได้เปรียบเทียบการประยุกต์ใช้กระบวนการ

วิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process, AHP) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANN) และการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี K-Means (K-Means clustering) มาใช้ในการจำแนกสินค้าคงคลังกับระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC แบบดั้งเดิม ซึ่งพบว่าทั้งวิธี AHP, ANN และ K-Means สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC ได้ดี ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเปรียบเทียบระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC แบบดั้งเดิม และการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี K-Means (K-Means clustering) ในกลุ่มสินค้าผลิตภัณฑ์สมุนไพรและยาแผนโบราณ จำนวน 280 รายการ โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาเกณฑ์เดียว คือ ยอดขายสินค้ารายปีตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 ถึงเดือนธันวาคม 2563 รวม 446,479.84 บาท ผลการศึกษาแสดงได้ดังนี้

1. ระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC แบบดั้งเดิม

ระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC แบบดั้งเดิมใช้ยอดขายสินค้าปี 2563 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลัง โดยอาศัยวิจารณญาณและประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์ประกอบการพิจารณา จากการพิจารณายอดขายสินค้าปี 2563 พบว่า มีสินค้าจำนวน 3 รายการที่มียอดขายสูงกว่าสินค้ารายการอื่นๆ โดยมียอดขายสินค้าคิดเป็นร้อยละ 7.38, ร้อยละ 5.36 และร้อยละ 3.38 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด ตามลำดับ และร้อยละ 92.50 ของสินค้ามียอดขายสินค้าต่ำกว่าร้อยละ 1 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด ในที่นี้ผู้วิจัยจึงได้จำแนกกลุ่มสินค้าคงคลัง ด้วยวิธีที่ 1 (Method 1) จำแนกตามเกณฑ์ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ ให้สินค้ากลุ่ม A, B และ C มีรายการสินค้าประมาณร้อยละ 20, 30 และ 50 ของรายการสินค้าทั้งหมดตามลำดับ และวิธีที่ 1.2 (Method 2) พิจารณาจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังโดยอาศัยวิจารณญาณและประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์ โดยให้สินค้ากลุ่ม A ประกอบด้วยสินค้าที่มียอดขายอย่างน้อยร้อยละ 1 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด สินค้ากลุ่ม B ประกอบด้วยสินค้าที่มียอดขายอย่างน้อยร้อยละ 0.2 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด และสินค้ากลุ่ม C ประกอบด้วยสินค้าที่เหลือทั้งหมด สามารถจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังได้ดังแสดงใน Table 1

จากผลการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC แบบดั้งเดิม พบว่าการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC วิธีที่ 1 ไม่เหมาะสม เนื่องจากสินค้ากลุ่ม A มีสินค้าที่มียอดขายต่ำมาก (ร้อยละ 0.48 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด) การจำแนกสินค้าคงคลัง ABC วิธีที่ 2 มีความเหมาะสมมากกว่า โดยสินค้ากลุ่ม A มีจำนวน 21 รายการ (ร้อยละ 7.50) มียอดขายสินค้ารวม 195,180.09 บาท (ร้อยละ 43.72) โดยสินค้าที่มียอดขายสูงสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 7.38 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด และสินค้าที่มียอดขายต่ำสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 1.01 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด สินค้ากลุ่ม B มีจำนวน 100 รายการ (ร้อยละ 35.71) มียอดขายสินค้ารวม 196,136.19 บาท (ร้อยละ 43.93) โดยสินค้าที่มียอดขายสูงสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 0.96 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด และสินค้าที่มียอดขายต่ำสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 0.20 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด สินค้ากลุ่ม C มีจำนวน 159 รายการ (ร้อยละ 56.79) มียอดขายสินค้ารวม 55,163.56 บาท (ร้อยละ 12.36) โดยสินค้าที่มียอดขายสูงสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 0.19 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด และสินค้าที่มียอดขายต่ำสุดในกลุ่มมียอดขายเพียงร้อยละ 0.01 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด อย่างไรก็ตามการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC วิธีที่ 2 ยังไม่มีความเหมาะสมเท่าที่ควร เนื่องจากเป็นการจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังโดยอาศัยวิจารณญาณและประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์ ทำให้สินค้ากลุ่ม A และ B ยอดขายรวมใกล้เคียงกันซึ่งตามหลักการแล้วสินค้ากลุ่ม A ควรมียอดขายรวมที่สูงกว่ายอดขายรวมของสินค้ากลุ่ม B

Table 1 The results of traditional ABC classifications

	Method	Group A	Group B	Group C
	Number of Items	56	84	140
	% Item	20.00%	30.00%	50.00%
1	Total Sales (THB)	300,786.54	105,224.75	40,468.56
	% Sales	67.37%	23.57%	9.06%
	% Minimum Sales	0.48%	0.16%	0.01%

Table 1 (continued).

	Method	Group A	Group B	Group C
2	% Maximum Sales	7.38%	0.47%	0.16%
	Number of Items	21	100	159
	% Item	7.50%	35.71%	56.79%
	Total Sales (THB)	195,180.09	196,136.19	55,163.56
	% Sales	43.72%	43.93%	12.36%
	% Minimum Sales	1.01%	0.20%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	0.96%	0.19%

2. การจัดกลุ่มด้วยวิธี K-Means (K-Means clustering)

ทำการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC โดยใช้ยอดขายสินค้า ปี 2563 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลัง ด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-Means (K-Means clustering) จากข้อมูลยอดขายสินค้าปี 2563 เนื่องจากมีสินค้าเพียงไม่กี่รายการที่มียอดขายสูงมาก ขณะที่สินค้าส่วนใหญ่ (ร้อยละ 92.50 ของสินค้าทั้งหมด) มียอดขายสินค้าต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 1 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด) ทำให้เมื่อแบ่งกลุ่มสินค้าออกเป็นเพียง 3 กลุ่มจะมีสินค้าที่จัดให้อยู่ในกลุ่มสินค้าที่มียอดขายสูง (กลุ่ม A) จำนวนน้อยรายการเกินไป จึงทำการทดสอบแบ่งกลุ่มสินค้าตามยอดขายสินค้าออกเป็น 3 – 10 กลุ่ม แล้วทำการรวมกลุ่มสินค้าที่มียอดขายสูงและมีจำนวนน้อยเข้าในกลุ่ม A ให้เหลือกลุ่มสินค้า A, B และ C เพียง 3 กลุ่ม (Methods 3 – 10) ดังผลการวิเคราะห์ที่แสดงใน Table 2

Table 2 The results of traditional ABC classifications using K-Means clustering (K = number of clusters)

	Method	Group A	Group B	Group C
3 (k = 3)	Number of Clusters	1	1	1
	Number of Items	2	22	256
	% Item	0.71%	7.86%	91.43%
	Total Sales (THB)	56,892.92	150,787.17	238,799.75
	% Sales	12.74%	33.77%	53.49%
	% Minimum Sales	5.36%	0.91%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	3.38%	0.87%
4 (k = 4)	Number of Clusters	2	1	1
	Number of Items	11	48	221
	% Item	3.93%	17.14%	78.93%
	Total Sales (THB)	141,533.51	165,563.03	139,383.30
	% Sales	31.70%	37.08%	31.22%
	% Minimum Sales	1.59%	0.47%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	1.41%	0.45%
5 (k = 5)	Number of Clusters	3	1	1
	Number of Items	16	59	205
	% Item	5.71%	21.07%	73.21%
	Total Sales (THB)	171,695.51	163,949.85	110,834.49
	% Sales	38.46%	36.72%	24.82%
	% Minimum Sales	1.22%	0.38%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	1.10%	0.36%

Table 2 (continued).

	Method	Group A	Group B	Group C
6 (k = 6)	Number of Clusters	4	1	1
	Number of Items	16	50	214
	% Item	5.71%	17.86%	76.43%
	Total Sales (THB)	171,695.51	148,548.85	126,235.49
	% Sales	38.46%	33.27%	28.27%
	% Minimum Sales	1.22%	0.40%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	1.10%	0.39%
7 (k = 7)	Number of Clusters	5	1	1
	Number of Items	47	69	164
	% Item	16.79%	24.64%	58.57%
	Total Sales (THB)	279,998.54	106,856.82	59,624.49
	% Sales	62.71%	23.93%	13.35%
	% Minimum Sales	0.59%	0.22%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	0.57%	0.21%
8 (k = 8)	Number of Clusters	6	1	1
	Number of Items	49	68	163
	% Item	17.50%	24.29%	58.21%
	Total Sales (THB)	285,068.54	102,727.82	58,683.49
	% Sales	63.85%	23.01%	13.14%
	% Minimum Sales	0.56%	0.21%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	0.55%	0.20%
9 (k = 9)	Number of Clusters	7	1	1
	Number of Items	51	66	163
	% Item	18.21%	23.57%	58.21%
	Total Sales (THB)	289,896.54	97,899.82	58,683.49
	% Sales	64.93%	21.93%	13.14%
	% Minimum Sales	0.53%	0.21%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	0.50%	0.20%
10 (k = 10)	Number of Clusters	8	1	1
	Number of Items	59	62	159
	% Item	21.07%	22.14%	56.79%
	Total Sales (THB)	307,096.54	84,219.75	55,163.56
	% Sales	68.78%	18.86%	12.36%
	% Minimum Sales	0.47%	0.20%	0.01%
	% Maximum Sales	7.38%	0.45%	0.19%

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงใน Table 2 พบว่า การจำแนกกลุ่มสินค้าด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-Means เป็น 5 กลุ่ม (วิธีที่ 5) และ 6 กลุ่ม (วิธีที่ 6) สามารถจัดกลุ่มสินค้าได้เหมาะสม เนื่องจากมีเกณฑ์ที่เป็นไปตามระบบการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC (ABC classification analysis) คือกลุ่ม A ควรมีปริมาณสินค้าไม่เกินร้อยละ 15 ของรายการสินค้าทั้งหมด กลุ่ม B ควรมีปริมาณสินค้าไม่เกินร้อยละ 30 ของรายการสินค้าทั้งหมด และกลุ่ม C

ควรมีปริมาณสินค้าไม่เกินร้อยละ 55 ของรายการสินค้าทั้งหมด ซึ่งการจัดกลุ่มแบบ K-Means น้อยกว่า 5 กลุ่ม ทำให้สินค้ากลุ่ม A มีจำนวนรายการสินค้าน้อย ทำให้ยอดขายรวมของสินค้ากลุ่ม A ต่ำกว่ายอดขายรวมของสินค้ากลุ่ม B ขณะที่การจำแนกกลุ่มสินค้ามากกว่า 6 กลุ่ม ทำให้มีสินค้าที่มียอดขายต่ำมากรวมอยู่ในสินค้ากลุ่ม A วิธีที่ 5 และวิธีที่ 6 จำแนกกลุ่มสินค้าโดยมีสินค้าในกลุ่ม A จำนวน 16 รายการ (ร้อยละ 5.71) มียอดขายสินค้ารวม 171,695.51 บาท (ร้อยละ 38.46) จำแนกกลุ่มสินค้าโดยสินค้าที่มียอดขายสูงสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 1.22 ของยอดขายสินค้าทั้งหมดและสินค้าที่มียอดขายต่ำสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 7.38 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด แต่ทั้งสองวิธีแบ่งกลุ่มสินค้ากลุ่ม B และ C แตกต่างกันเล็กน้อย โดยการแบ่งกลุ่มสินค้าด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-Means เป็น 6 กลุ่ม (วิธีที่ 6) มีจำนวนรายการสินค้าในกลุ่ม B น้อยกว่า สินค้าที่มียอดขายต่ำสุดในกลุ่มจึงมียอดขายสูงกว่า ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการจำแนกกลุ่มสินค้าด้วยวิธีที่ 5 และวิธีที่ 6 ให้แก่ร้านขายยากรณีศึกษาพิจารณา ซึ่งร้านขายยากรณีศึกษาได้เลือกการจำแนกกลุ่มสินค้าด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-Means เป็น 6 กลุ่ม ซึ่งมีสินค้ากลุ่ม B จำนวน 50 รายการ (ร้อยละ 17.86) มียอดขายสินค้ารวม 148,548.85 บาท (ร้อยละ 33.27) โดยสินค้าที่มียอดขายสูงสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 1.10 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด และสินค้าที่มียอดขายต่ำสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 0.40 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด สินค้ากลุ่ม C มีจำนวน 214 รายการ (ร้อยละ 76.43) มียอดขายสินค้ารวม 126,235.49 บาท (ร้อยละ 28.27) โดยสินค้าที่มียอดขายสูงสุดในกลุ่มมียอดขายร้อยละ 0.39 ของยอดขายสินค้าทั้งหมดและสินค้าที่มียอดขายต่ำสุดในกลุ่มมียอดขายเพียงร้อยละ 0.01 ของยอดขายสินค้าทั้งหมด

3. การนำเสนอนโยบายการสั่งซื้อและควบคุมสินค้าคงคลังที่เหมาะสม

สำหรับการนำเสนอนโยบายการสั่งซื้อและควบคุมสินค้าคงคลังที่เหมาะสมสำหรับสินค้าแต่ละกลุ่มให้แก่ร้านขายยากรณีศึกษา ได้ข้อเสนอแนะดังนี้

- กลุ่ม A ซึ่งเป็นกลุ่มสินค้าที่มีจำนวนน้อยแต่มียอดขายสูง สั่งซื้อสินค้าตามปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (Economic Order Quantity, EOQ) และกำหนดปริมาณคงคลังสำรองที่ระดับการให้บริการที่สูง อย่างน้อยร้อยละ 95
- กลุ่ม B ซึ่งเป็นเป็นกลุ่มสินค้าที่มียอดขายปานกลาง สั่งซื้อสินค้าตามปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) โดยกำหนดปริมาณคงคลังสำรองที่ระดับการให้บริการที่ต่ำกว่าสินค้ากลุ่ม A
- กลุ่ม C ซึ่งเป็นกลุ่มสินค้าที่มีมูลค่าต่ำและมีจำนวนมาก สามารถกำหนดนโยบายการสั่งซื้อและควบคุมสินค้าคงคลังจากประสบการณ์ได้ เนื่องจากสินค้ากลุ่มนี้ส่งผลต่อต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังต่ำ โดยอาจกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังเท่ากับปริมาณสินค้าสูงสุดที่สามารถจำหน่ายได้ในแต่ละเดือน และสั่งซื้อสินค้าโดยใช้นโยบายเติมเต็มสินค้าแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (One-for-one replenishment policy) กล่าวคือ สั่งซื้อสินค้ามาเติมเต็มเท่ากับปริมาณที่จำหน่ายไปในเดือนที่แล้ว หรือสั่งซื้อตามปริมาณขั้นต่ำที่ทางบริษัทยาระบุ

สรุป

จากการศึกษาการจำแนกสินค้าคงคลัง ABC ด้วยวิธีดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ K-Means เพื่อการบริหารจัดการสินค้าคงคลังผลิตภัณฑ์สมุนไพรของร้านขายยากรณีศึกษา พบว่า การจำแนกสินค้าคงคลัง ABC โดยการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ K-Means ออกเป็น 6 กลุ่มสามารถจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังผลิตภัณฑ์สมุนไพรของร้านขายยากรณีศึกษาได้เหมาะสมที่สุด การจำแนกสินค้าคงคลัง ABC โดยการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ K-Means ช่วยให้สามารถจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการจำแนกกลุ่มสินค้าในร้านค้าปลีกซึ่งมักมีสินค้าจำนวนมากที่มียอดขายใกล้เคียงกัน และไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้ยากต่อการแบ่งกลุ่มด้วยประสบการณ์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวเป็นงานวิจัยเบื้องต้น ทำให้อาจไม่สามารถสรุปผล

ที่แน่ชัดได้ ซึ่งผู้วิจัยจะทำการศึกษาการจำแนกสินค้าคงคลังโดยใช้เกณฑ์การพิจารณาแบ่งกลุ่มหลายเกณฑ์ (Multi-criteria ABC classification) ในขั้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประกอบการร้านขายยากรณีศึกษาที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

เอกสารอ้างอิง

จันทร์จิรา พิลาแดง. 2558. การจัดกลุ่มแบบสองด้านโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อแบ่งกลุ่มระดับความเข้มแข็งของครอบครัวไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ปราณี นิลกรณ์. 2548. การวิเคราะห์ตัวแปรพหุ. ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2560. ธุรกิจร้านขายยา (Online). https://thaipublica.org/wp-content/uploads/2016/06/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%93%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%98%E0%B8%B8%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%B4%E0%B8%88%E0%B8%82%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%A2%E0%B8%B2.pdf, 10 ตุลาคม 2563.

Jacobs, F.R., Berry, W.L., Whybark, D.C., Vollmann, T.E. 2010. Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management, 6th ed. McGraw-Hill. New York, USA.

Šarić, T., Šimunović, K., Pezer, D., Šimunović, G. 2014. Inventory classification using multi - criteria abc analysis, neural networks and cluster analysis. Tehnicki Vjesnik (Technical Gazette) 21 (5): 1109–1115.

Sipper, D., Bulfin, R. 1997. Production: Planning, Control and Integration. McGraw-Hill. New York, USA.

การพยากรณ์ราคาซื้อไก่สดแช่แข็ง

Forecasting of the buying prices of frozen chicken

รดา กิตติอุดมเดช*, ปรารถนา ปรารถนาดี

Rada Kittiudomdach*, Parthana Parthanadee

อุตสาหกรรมภาควิชาเทคโนโลยีเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: rada.ki@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนการจัดซื้อวัตถุดิบของบริษัทกรณีศึกษา โดยศึกษาวัตถุดิบไก่สดทั้งหมด 6 ชิ้นส่วนหลัก ได้แก่ อกไก่ลอกหนังไม่มีกระดูก (Skinless Boneless Breasts, SBB) สันในไก่ (Fillets) เศษเนื้อบดแกะจากซี่โครงไก่ (Chicken Carcass Meats, CCM) ตับ (Livers) หัวใจ (Hearts) และไขมันไก่ (Fat) ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลราคาตลาดของวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งรายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 และนำมาพยากรณ์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา พบว่า วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ราคาไขมันไก่ และ CCM ได้แก่ วิธี Single Moving Average โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน MAPE (Mean Absolute Percentage Error) เท่ากับ 3.10% และ 3.82% ตามลำดับ ขณะที่แบบจำลองการพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับราคา SBB สันในไก่ ตับ และหัวใจ ได้แก่ วิธี SARIMA(1,0,1)(1,0,1) วิธี SARIMA(0,1,1)(1,0,0) วิธี SARIMA(1,1,1)(1,0,1) และวิธี SARIMA(1,1,0)(0,0,1) ตามลำดับ มีค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ MAPE ที่ 2.89%, 5.00%, 1.96% และ 2.94% ตามลำดับ ซึ่งราคาวัตถุดิบไก่สดที่บริษัทกรณีศึกษาซื้อมีราคาที่แตกต่างจากราคาตลาด บริษัทสามารถนำค่าพยากรณ์ของราคาตลาดของวัตถุดิบไก่สดไปใช้ในการวางแผนและการต่อรองราคาวัตถุดิบไก่สดกับผู้ส่งมอบ รวมถึงใช้ในการวางแผนการจัดซื้อวัตถุดิบให้เหมาะสมต่อไป

คำสำคัญ: ไก่สดแช่แข็ง, การพยากรณ์ราคา, การวิเคราะห์อนุกรมเวลา

Abstract

This research study aimed to forecast the buying prices of frozen chicken raw materials for purchasing planning of the case-study company. The considered raw materials consisted of six chicken parts: Skinless Boneless Breasts (SBB), fillets, Chicken Carcass Meats (CCM), livers, hearts and fat. We collected monthly market prices of frozen chicken raw materials from January 2015 to October 2020 and forecasted the prices using time series analysis techniques. It was found that the most appropriate forecasting techniques for forecasting chicken fat and CCM prices were Single Moving Average technique with mean absolute percentage errors (MAPE) of 3.10% and 3.82%, respectively, while those for SBB, fillet, liver and heart prices were SARIMA(1,0,1)(1,0,1), SARIMA(0,1,1)(1,0,0), SARIMA(1,1,1)(1,0,1) and SARIMA (1,1,0)(0,0,1), respectively. They had MAPE of 2.89%, 5.00%, 1.96% and 2.94% respectively. However, the buying prices of the company were different to the market prices. The company can use these buying prices of frozen chicken raw materials for planning and negotiating the prices with suppliers, and for developing an appropriate purchasing plan.

Keywords: frozen chicken, price forecasting, time series analysis

คำนำ

โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยในปัจจุบันมีการแข่งขันด้านนวัตกรรม มาตรฐานคุณภาพ ต้นทุน การบริการ ซึ่งการตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้ได้ทันต่อเวลาภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดนั้นเป็นสิ่งที่ค่อนข้างท้าทายต่อโรงงานอุตสาหกรรม จากปัญหาที่ผ่านมาในหลายๆปี โรงงานกรณีศึกษาประสบปัญหาการสั่งซื้อวัตถุดิบที่ยังไม่ได้ประสิทธิภาพมากพอ ส่งผลต่อต้นทุนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากฝ่ายจัดซื้อใช้เพียงประสบการณ์และประวัติการสั่งซื้อย้อนหลังในการต่อรองราคาและวางแผนการสั่งซื้อ รวมทั้งความต้องการของลูกค้าที่มีความผันผวนไม่แน่นอน ส่งผลต่อการวางแผนการจัดซื้อ การวางแผนการผลิตสินค้า และต้นทุนวัตถุดิบ นอกจากนั้นราคาต้นทุนสินค้าจากวัตถุดิบไก่ยังมีความผันผวนจากปัจจัยภายนอก เช่น ในปี 2560 การระบาดของโรคไข้หวัดนกในหลายประเทศ เช่น จีน เมียนมา เกาหลีใต้ ซาอุดิอาระเบีย อิหร่าน แอฟริกา รัสเซีย และสหรัฐฯ ทำให้มีความต้องการนำเข้าผลิตภัณฑ์ไก่เนื้อจากไทยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การส่งออกผลิตภัณฑ์ไก่เนื้อของไทยขยายตัว 11.0% YoY (Year-over-Year) ในเชิงปริมาณ และ 18.4% YoY ในเชิงมูลค่า (วิจัยกรุงศรี, 2561) และปัญหาจากการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 ตั้งแต่ปี 2562 เป็นต้นมา ส่งผลให้กำลังซื้อของประชาชนซบเซา ผนวกกับกิจกรรมทางเศรษฐกิจชะงัก โดยเฉพาะธุรกิจร้านอาหารและฟาสต์ฟู้ดในช่วงครึ่งปีแรกของปี 2563 ทำให้ปริมาณการบริโภคไก่และราคาไก่ลดลง (วิจัยกรุงศรี, 2563) จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น หากโรงงานไม่มีการวางแผนการสั่งซื้อที่มีประสิทธิภาพ ก็อาจจะทำให้กระทบต่อต้นทุนการผลิต และการส่งออกสินค้า ซึ่งส่งผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าและอาจจะส่งผลให้ทางโรงงานผลิตต้องเสียค่าปรับให้แก่ลูกค้าได้

จากสถานการณ์ดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจเพื่อทำการพยากรณ์ราคาตลาดของวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินราคาซื้อวัตถุดิบและการวางแผนการจัดซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งของหน่วยงานจัดซื้อของโรงงานกรณีศึกษา โดยเก็บข้อมูลราคาตลาดของวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งย้อนหลัง และนำมาพยากรณ์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา

อนุกรมเวลา (Time series data) คือ ชุดข้อมูลที่เก็บรวบรวมตามลำดับเวลา และมีลักษณะผันแปรตามเวลา อาจมีการแปรปรวนเป็นรูปแบบ เช่น มีแนวโน้มขึ้นลงตามเวลา (Trend) มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Seasonal) การเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร (Cyclical) เป็นต้น การวิเคราะห์แบบอนุกรมเวลา สามารถแบ่งแบบจำลองตามรูปแบบของข้อมูลได้ดังนี้ (1) รูปแบบคงที่ไม่มีแนวโน้ม (Stationary / No Trend) ใช้ในการพยากรณ์ช่วงสั้นๆ กับข้อมูลคงที่ ไม่มีแนวโน้มหรือฤดูกาล เทคนิคที่ใช้ เช่น การหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) การหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Moving Average) และการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังเชิงเดียว (Single Exponential Smoothing) (2) รูปแบบที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (Linear Trend) ใช้กับการพยากรณ์ข้อมูลที่มีแนวโน้มขึ้นลงในอนุกรมเวลา เทคนิคที่เหมาะสม เช่น การปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังสองชั้น (Double Exponential Smoothing) และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เป็นต้น (3) รูปแบบฤดูกาล (Seasonality) ใช้กับข้อมูลที่เกิดขึ้นซ้ำๆในช่วงเวลาหนึ่งๆของปี เทคนิคที่เหมาะสม เช่น Seasonal Additive Smoothing (SAS) และ Seasonal Multiplicative Smoothing (SMS) และ (4) รูปแบบที่มีทั้งแนวโน้มและฤดูกาล เทคนิคที่เหมาะสม เช่น วิธีของโฮลต์และวินเทอร์ส (Holt-Winter's Methods) หรือ ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) หรือวิธี Box-Jenkins เป็นต้น (พรธิภา, 2562) ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลาในการพยากรณ์ราคาสินค้า เช่น งานวิจัยของพูนสิริ (2559) ซึ่งศึกษาการพยากรณ์ราคาผักเมือง

หนาว ณ ตลาดสี่มุมเมือง โดยทำการพยากรณ์พืชเมืองหนาว 10 ชนิด โดยใช้ข้อมูลทั้งแบบรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือน ซึ่งเกษตรกรสามารถนำการพยากรณ์ราคาผักเมืองหนาวไปใช้ในการวางแผนการปลูกและเก็บเกี่ยวให้เหมาะกับผักแต่ละชนิดได้ วรางคณา (2560) ทำการศึกษาการพยากรณ์ราคามังคุดคละ โดยใช้เทคนิคพยากรณ์ 3 วิธี ได้แก่ วิธี Box-Jenkins, วิธีการแยกส่วนประกอบอนุกรมเวลา (Decomposition method) และ วธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์สแบบคูณ (Holt-Winters' Multiplicative Exponential Smoothing Method) พบว่า วิธีการแยกส่วนประกอบอนุกรมเวลามีความแม่นยำในการพยากรณ์ดีที่สุด จึงเลือกวิธีนี้ในการพยากรณ์ราคามังคุด

อุปกรณ์และวิธีการ

1. ทำการเก็บข้อมูลราคาอ้างอิงรายเดือนของวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งจากผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่สดแช่แข็ง เป็นระยะเวลา 70 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2558 ถึงเดือนตุลาคม 2563 โดยรวบรวมข้อมูลราคาของชิ้นส่วนวัตถุดิบไก่ 6 ส่วนประกอบด้วย อกไก่ลอกหนังไม่มีกระดูก (Skinless Boneless Breasts, SBB) สันในไก่ (Fillets) เศษเนื้อบดแกะจากซี่โครงไก่ (Chicken Carcass Meats, CCM) ตับ (Livers) หัวใจ (Hearts) และไขมันไก่ (Fat)

2. นำข้อมูลมาทำการพยากรณ์ราคาของชิ้นส่วนวัตถุดิบไก่สดแช่แข็ง ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Oracle Crystal Ball Predictor

3. ทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนในรูปค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนสมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation, MAD) รากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเฉลี่ยร้อยละของค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

4. เลือกวิธีการพยากรณ์ราคาที่เหมาะสมที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ที่ต่ำที่สุดมาใช้ในการพยากรณ์ราคาของวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งต่อไป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์จากการพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งทั้ง 6 ชิ้นส่วน โดยใช้ข้อมูลราคาอ้างอิงรายเดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 รวมระยะเวลา 70 เดือน ดังแสดงใน Fig. 1 พบว่าราคาซื้อไก่สดแช่แข็งทุกชิ้นส่วนมีลักษณะเคลื่อนไหวในทิศทางขึ้นและลงในบางช่วงเวลา โดยราคาจะเริ่มลดลงในช่วงเดือนธันวาคม จากนั้นจะค่อยๆ ปรับตัวสูงขึ้นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ และจะลดลงในช่วยเดือนธันวาคมอีกครั้ง แนวโน้มของทุกชิ้นส่วนจะเป็นในลักษณะเดียวกัน รวมถึงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น โรคระบาด ราคาอาหารสัตว์ ความต้องการเนื้อไก่จากต่างประเทศ เป็นต้น สาเหตุที่ราคาวัตถุดิบไก่สดมีราคาต่ำในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม เนื่องจากในภาคการส่งออก ผู้ส่งมอบวัตถุดิบได้ส่งคำสั่งซื้อสำหรับช่วงเทศกาลคริสต์มาสไปแล้ว ทำให้ในช่วงนี้ผู้ส่งมอบวัตถุดิบต้องการขายสินค้าในประเทศ จึงทำให้มีการแข่งขันด้านราคา แต่ในปี 2563 จากกราฟ (Fig. 1) จะเห็นได้ว่าราคามีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลกระทบจากการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา (โควิด-19) ทำให้การส่งออกชะลอตัวลง (วิจัยกรุงศรี, 2563) ส่งผลให้ผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลายรายมีการแข่งขันตลาดภายในประเทศสูงมากขึ้น

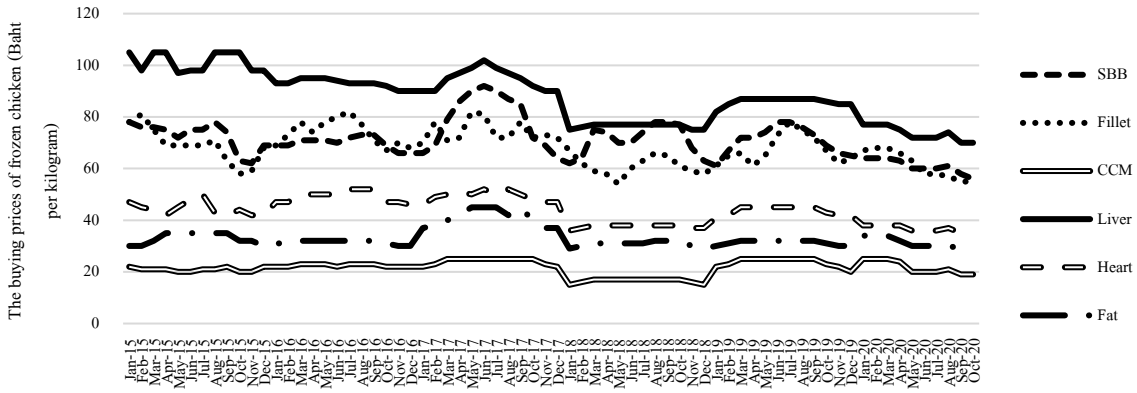


Fig. 1 Buying prices of frozen chicken raw materials from January 2015 to October 2020

จาก Fig. 1 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลราคาซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน แต่ก็มีรูปแบบฤดูกาลเล็กน้อย ดังนั้นจึงศึกษาเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาทั้งหมด 9 วิธี ประกอบด้วยวิธีสำหรับอนุกรมเวลาคงที่ 2 วิธี ได้แก่ Single moving average (SMA) และ Single exponential smoothing (SES) วิธีสำหรับอนุกรมเวลาที่มีแนวโน้ม 2 วิธี ได้แก่ Double moving average (DMA) และ Double exponential smoothing (DES) วิธีสำหรับอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล 2 วิธี ได้แก่ Seasonal additive และ Holt-Winters' additive วิธีสำหรับอนุกรมเวลาที่มีทั้งแนวโน้มและฤดูกาล 2 วิธี ได้แก่ Seasonal multiplicative และ Holt-Winters' multiplicative และวิธี ARIMA ซึ่งใช้ได้กับอนุกรมเวลาทุกรูปแบบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Oracle Crystal Ball Predictor (Oracle USA, Inc., 2011) และเลือกวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ที่น้อยที่สุด Table 1 แสดงวิธีการพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งที่เหมาะสมที่สุดและค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ Table 2 แสดงค่าพารามิเตอร์และผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองพยากรณ์ จาก Table 2 พบว่า วิธีการพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งทั้ง 6 ชิ้นส่วน มีค่า Durbin-Watson อยู่ระหว่าง 1.5-2.5 แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน และไม่มีสหสัมพันธ์ภายในตัวเอง (Autocorrelation) วิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ราคาซื้อของไขมันไก่ (Fat) และเศษเนื้อบดแกะจากซี่โครงไก่ (CCM) ได้แก่ วิธี SMA อันดับ 1 ซึ่งก็คือวิธีการพยากรณ์แบบง่าย (Naïve Method) นั่นเอง จึงมีค่า Theil's U เท่ากับ 1 แสดงว่า ค่าพยากรณ์ที่ได้มีความถูกต้องเท่ากับการคาดเดา สำหรับวิธีการพยากรณ์ราคาซื้อของชิ้นส่วนอื่นๆ มีค่า Theil's U น้อยกว่า 1 แสดงว่าค่าพยากรณ์มีความถูกต้องกว่าการคาดเดา (Oracle USA, Inc., 2011)

Table 1 Forecasts and forecasting errors of frozen chicken raw material prices

No.	Part	Methods	Average Price (Baht/kg)	RMSE (Baht/kg)	MAD (Baht/kg)	MAPE (%)
1	SBB	SARIMA(1,1,0)(0,0,1)	71.09	2.73	2.06	2.89%
2	Fillet	SARIMA(0,1,1)(1,0,0)	68.07	4.13	3.41	5.00%
3	Liver	SARIMA(1,1,1)(1,0,1)	87.91	2.75	1.72	1.96%
4	Heart	SARIMA(1,1,0)(0,0,1)	43.70	1.97	1.29	2.94%
5	Fat	Single Moving Average	33.19	1.91	1.03	3.10%
6	CCM	Single Moving Average	21.60	1.66	0.83	3.82%

Table 2 Best forecasting methods, parameters, and related statistics for frozen chicken raw material prices

No.	Part	Methods	Parameter	Value	Theil's U	Durbin-Watson
1	SBB	SARIMA(1,1,0)(0,0,1)	AR(1)	0.3435	0.70	1.82
			Seasonal MA(1)	-0.7680		
2	Fillet	SARIMA(0,1,1)(1,0,0)	MA(1)	-0.3188	0.97	2.16
			Seasonal AR(1)	-0.0109		
3	Liver	SARIMA(1,1,1)(1,0,1)	AR(1)	-0.7893	0.83	1.90
			MA(1)	-0.8534		
			Seasonal AR(1)	0.5341		
			Seasonal MA(1)	0.0009		
4	Heart	SARIMA(1,1,0)(0,0,1)	AR(1)	0.0767	0.91	2.09
			Seasonal MA(1)	0.7256		
5	Fat	Single Moving Average	Order	1	1.00	1.87
6	CCM	Single Moving Average	Order	1	1.00	1.98

ผลการพยากรณ์ราคาซื้อไก่สดแช่แข็งแต่ละชิ้นส่วนเปรียบเทียบราคาซื้อจริงและราคาพยากรณ์ รวมถึงราคาซื้อที่ได้จากการพยากรณ์ล่วงหน้า 12 เดือน แสดงดัง Figs. 2–7

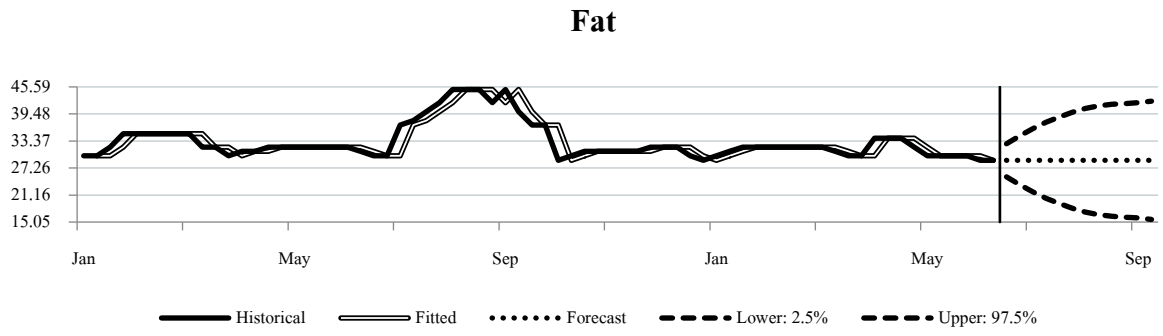


Fig. 2 Actual versus forecast buying prices of fat from single moving average method

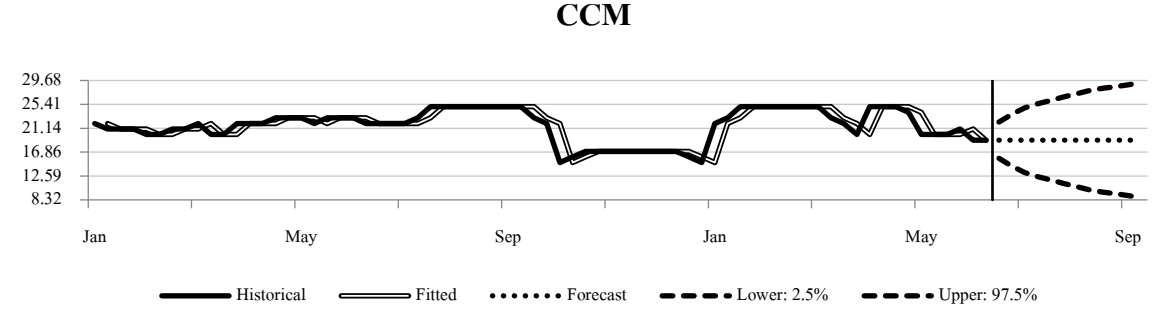


Fig. 3 Actual versus forecast buying prices of CCM from single moving average method

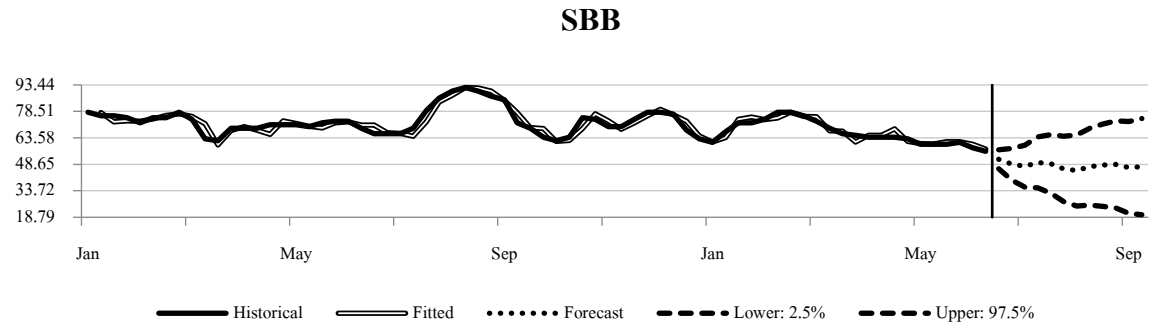


Fig. 4 Actual versus forecast buying prices of SBB from SARIMA (1,1,0)(0,0,1) model

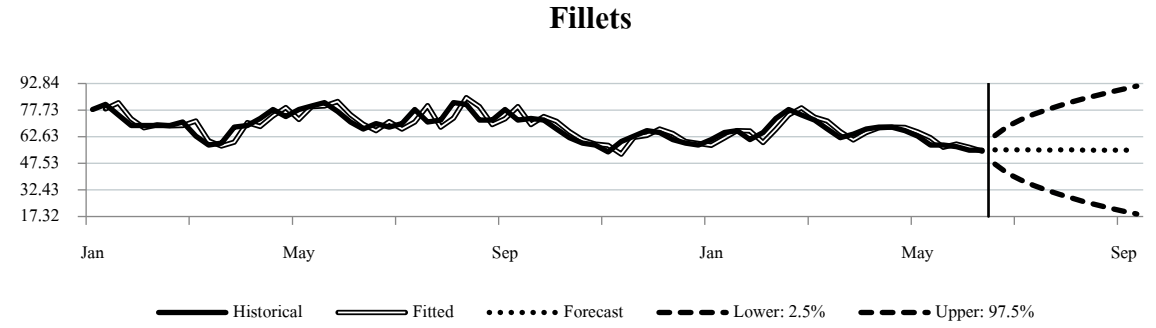


Fig. 5 Actual versus forecast buying prices of fillet from SARIMA(0,1,1)(1,0,0) model

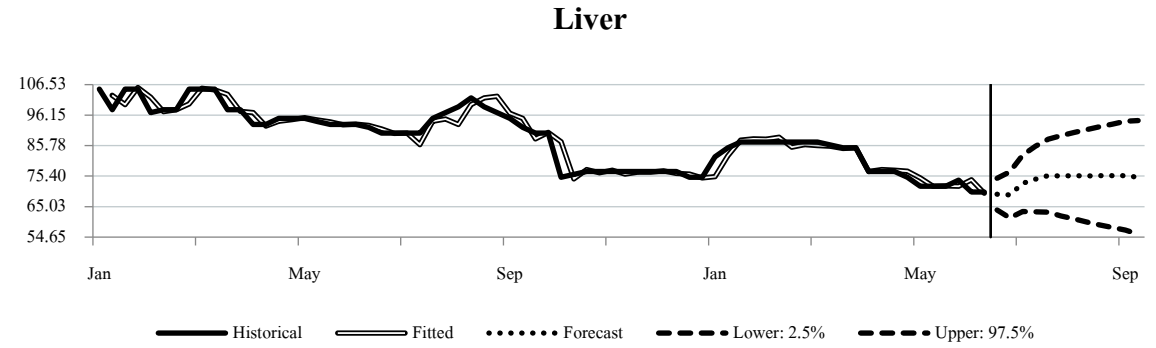


Fig. 6 Actual versus forecast buying prices of liver from SARIMA(1,1,1)(1,0,1) model

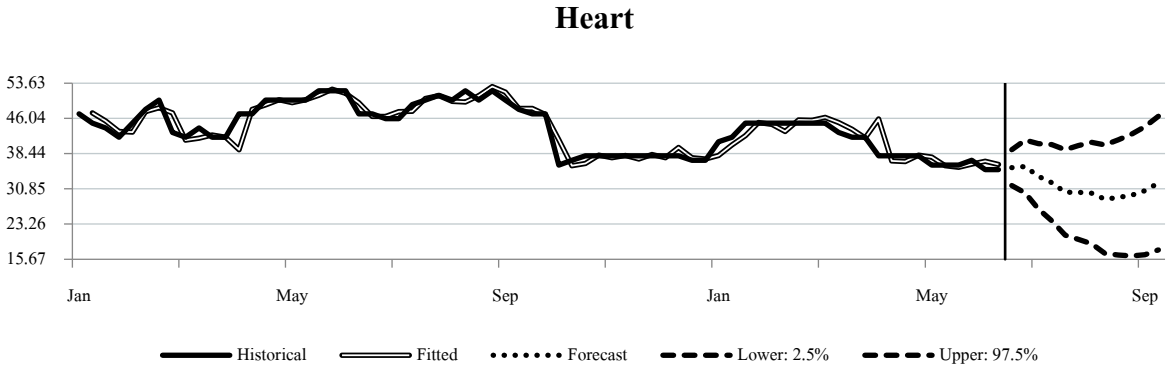


Fig. 7 Actual versus forecast buying prices of heart from SARIMA(1,1,0)(0,0,1) model

สมการพยากรณ์ราคาซื้อรายเดือนของไก่สดแช่แข็งทั้ง 6 ชิ้นส่วนแสดงได้ดังนี้

1. เทคนิคการพยากรณ์ Single Moving Average (SMA) เป็นวิธีพยากรณ์เมื่อมีข้อมูลมีรูปแบบคงที่หรือไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ซึ่งราคาของชิ้นส่วนไก่ที่เหมาะสมกับวิธีพยากรณ์นี้ ได้แก่ ไขมันไก่ (Fat) และเศษเนื้อบดแกะจากซี่โครงไก่ (CCM) สมการพยากรณ์ราคาแสดงได้ดัง Equation 1 (พรธิภา, 2562)

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-k+1}}{k} \quad (1)$$

เมื่อ k คือ จำนวนเวลาที่ใช้คำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

y_t คือ ราคาซื้อชิ้นส่วนไก่จริง ณ เวลา t

$\hat{y}_{t+1}$ คือ ราคาซื้อชิ้นส่วนไก่พยากรณ์ ณ เวลา $t+1$

2. เทคนิคการพยากรณ์ SARIMA หรือ Seasonal ARIMA เป็นวิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลาที่ซับซ้อน สามารถใช้ในการพยากรณ์อนุกรมเวลาทั้งที่มีและไม่มีองค์ประกอบแนวโน้มและฤดูกาล โดยเทคนิคนี้มีความเหมาะสมในการพยากรณ์ราคาซื้อไก่ 4 ชิ้นส่วน ได้แก่ อกไก่ลอกหนังไม่มีกระดูก (SBB) สันในไก่ (Fillets) ตับไก่ (Livers) และ หัวใจไก่ (Heart)

กำหนดให้ y_t คือ ราคาซื้อชิ้นส่วนไก่จริง ณ เวลา t

$\hat{y}_t$ คือ ราคาซื้อชิ้นส่วนไก่พยากรณ์ ณ เวลา t

B คือ backshift operator โดยที่ $B^k y_t = y_{t-k}$

สมการพยากรณ์ SARIMA(1,1,0)(0,0,1) ของราคาซื้อ SBB แสดงได้ดัง Equation 2

$$(1-\phi_1 B)(1-B)y_t = (1-\Theta_1 B^{12})e_t$$
$$(1-0.3435B)(1-B)y_t = (1+0.7680B^{12})e_t$$
$$\hat{y}_t = 1.3435y_{t-1} - 0.3435y_{t-2} + 0.7680e_{t-12} \quad (2)$$

สมการพยากรณ์ SARIMA(0,1,1)(1,0,0) ของราคาซื้อสันในไก่ แสดงได้ดัง Equation 3

$$(1-\Phi_1 B^{12})(1-B)y_t = (1-\theta_1 B)e_t$$
$$(1+0.0109B^{12})(1-B)y_t = (1+0.3188B)e_t$$
$$\hat{y}_t = y_{t-1} - 0.0109y_{t-12} - 0.0109y_{t-13} + 0.3188e_{t-1} \quad (3)$$

สมการพยากรณ์ SARIMA(1,1,1)(1,0,1) ของราคาซื้อตับไก่ แสดงได้ดัง Equation 4

$$(1-\Phi_1 B^{12})(1-\phi_1 B)(1-B)y_t = (1-\Theta_1 B^{12})(1-\theta_1 B)e_t$$
$$(1-0.5341B^{12})(1+0.7893B)(1-B)y_t = (1-0.0009B^{12})(1+0.8534B)e_t$$
$$\hat{y}_t = y_{t-1} + 0.5341y_{t-12} - 0.7893y_{t-1} + 0.4216y_{t-13} - 0.5341y_{t-13} + 0.7893y_{t-2} + 0.4216y_{t-14} - 0.0009e_{t-12} + 0.8534e_{t-1} - 0.0008e_{t-13} \quad (4)$$

สมการพยากรณ์ SARIMA(1,1,0)(0,0,1) ของราคาซื้อหัวใจไก่ แสดงได้ดัง Equation 5

$$(1-\phi_1 B)(1-B)y_t = (1-\Theta_1 B^{12})e_t$$
$$(1-0.0767B)(1-B)y_t = (1+0.7256B^{12})e_t$$
$$\hat{y}_t = 1.7256y_{t-1} - 0.7256y_{t-2} + 0.7256e_{t-12} \quad (5)$$

สรุป

จากการวิเคราะห์การพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็ง 6 ชิ้นส่วน พบว่าวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมในการพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบไขมันไก่ และ CCM คือ วิธี Single Moving Average โดยราคาซื้อไขมันไก่มีค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ RMSE เท่ากับ 1.91 บาทต่อกิโลกรัม MAD เท่ากับ 1.03 บาทต่อกิโลกรัม และ MAPE เท่ากับ 3.10% ราคาซื้อ CCM มีค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ RMSE เท่ากับ 1.66 บาทต่อกิโลกรัม MAD เท่ากับ 0.83 บาทต่อกิโลกรัม และ MAPE เท่ากับ 3.82% เทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับการพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบ SBB คือ SARIMA (1,1,0)(0,0,1) มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 2.73 บาทต่อกิโลกรัม MAD เท่ากับ 2.06 บาทต่อกิโลกรัม และ MAPE เท่ากับ 2.89% สำหรับราคาซื้อสันในไก่ เทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสม คือ SARIMA(0,1,1)(1,0,0) มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 4.13 บาทต่อกิโลกรัม MAD เท่ากับ 3.41 บาทต่อกิโลกรัม และ MAPE เท่ากับ 5.00% เทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมต่อการพยากรณ์ราคาซื้อตับไก่ ได้แก่ SARIMA(1,1,1)(1,0,1) มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 2.75 บาทต่อกิโลกรัม MAD เท่ากับ 1.72 บาทต่อกิโลกรัม และ MAPE เท่ากับ 1.96% และเทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมต่อการพยากรณ์ราคาซื้อหัวใจไก่ คือ SARIMA(1,1,0)(0,0,1) มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.97 บาทต่อกิโลกรัม MAD เท่ากับ 1.29 บาทต่อกิโลกรัม และ MAPE เท่ากับ 2.94% ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ของทั้ง 6 ชิ้นส่วนค่อนข้างต่ำ สะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองการพยากรณ์ ทั้งนี้โรงงานกรณีศึกษาสามารถนำผลการศึกษานี้เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนและในการต่อรองราคาวัตถุดิบไก่สดกับผู้ส่งมอบ รวมถึงใช้ในการวางแผนการจัดซื้อวัตถุดิบให้เหมาะสมต่อไป อนึ่ง เนื่องจากราคาวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งได้รับผลกระทบจากปัจจัยภายนอกอื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ โรงงานกรณีศึกษาต้องตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์อยู่เสมอ หากค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โรงงานกรณีศึกษาจะต้องทำการวิเคราะห์อนุกรมเวลาเพื่อปรับแบบจำลองการพยากรณ์ใหม่ เพื่อให้การพยากรณ์ราคาซื้อวัตถุดิบไก่สดแช่แข็งมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59

เอกสารอ้างอิง

พรธิภา องค์คุณารักษ์. 2562. การจัดการโซ่อุปทานในอุตสาหกรรมเกษตรเบื้องต้น. สำนักพิมพ์เดอะวันพริ้นติ้ง, กรุงเทพฯ.

พูนสิริ ยิ้มหนองโพ, ปรารถนา ปรารถนาดี. 2559. การพยากรณ์ราคาผักเมืองหนาว ณ ตลาดสี่มุมเมือง. ใน: รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 730–738.

วิจัยกรุงศรี. 2561. แนวโน้มธุรกิจอุตสาหกรรม ปี 2561–2563: ไก่สดแช่เย็นแช่แข็งและแปรรูป. https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Food-Beverage/Frozen-Processed-Chicken/IO/io-frozen-processed-chicken-20-th, 7 กุมภาพันธ์ 2564.

วิจัยกรุงศรี. 2563. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564–2566: ไก่แช่เย็น แช่แข็ง และแปรรูป. https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Food-Beverage/Frozen-Processed-Chicken/IO/io-frozen-processed-chicken, 7 กุมภาพันธ์ 2564.

วรางคณา เรียนสุทธิ์. 2560. ตัวแบบพยากรณ์ราคามังคุดคละ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 19: 31–42.

Oracle USA, Inc. 2011. Predictor User's Guide. Oracle® Crystal Ball, Fusion Edition Release 11.1.2. https://docs.oracle.com/cd/E57185_01/CBREG/ch06s02s03s04.html, 2 February 2021.

Influence of sodium chloride in marinated pork on quality of palm oil after deep-fat frying

Thanida Muangnoi, 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

Salt is commonly used in deep-fried food as a universal flavor improver to reduce bitterness but increase sweet and umami tastes. The effects of salt on palm oil deterioration during deep-fat frying were investigated. Three levels of sodium chloride (0, 1.5 and 3%) were added in pork during marinated. The quality indices of fried oil [color, acid value (AV) and peroxide value (PV)] were determined. From the experiment, it was found that 3% NaCl fried-pork oil showed cleaner appearance with higher lightness (L*) value and higher PV values during frying than other two samples (0 and 1.5% NaCl fried-pork oil). Increasing amount of salt to 1.5 and 3% NaCl, 2-fold of peroxide value was increased compared with 0% NaCl. AV values were little increased in all samples during continuous frying for 8 hrs, which 0% NaCl fried-pork oil has the highest AV value of 1.96 mg KOH/g at 8 hrs. Therefore, it could suggest that salt had little effect on the hydrolysis reaction; however, it had much influenced on the oil oxidation parameters, in particular PV values. Therefore, using of salt in meat needs to be aware since it could accelerate the oil deterioration during deep-fat frying.

Keywords: Deep-fat frying, Frying oil quality, Marinated pork, Oxidation, Sodium chloride

Introduction

Deep-fat frying can be defined as a process of soaking food in hot vegetable oil at a temperature of 150–200°C. Fried foods are popular among consumers because of their crispy texture, attractive aroma and desirable sensory attributes. As deep-fat frying is performed at high temperature and mostly in the presence of air and moisture; the frying oil undergoes physical and chemical deteriorations resulting in adverse effects on quality of fried food and may be harmful to human health. During frying process, the chemical reactions including hydrolysis, oxidation, and polymerization of oil are commonly occurred and produce volatile or nonvolatile compounds (Choe and Min, 2007). Highly hydrolyzed and oxidized oils caused the degradation of oil quality and absorbed by the fried food. Quality, safety and shelf-life of fried foods thus depend upon the quality of the oil used for frying. To reduce cost, most food industry, restaurant, street vendors reuse the deep-fried oil for further frying without discarding it. Repeated heating of the oil accelerates oxidative degradation of lipids, forming hazardous reactive oxygen species and depleting the natural antioxidant contents of the cooking oil (Leong et al., 2015). Reused frying oil can make toxic formed that effect to human such as polar compounds, hydrogen peroxide and PAHs, which cause heart disease, high blood pressure or cancer (Fernquest, 2013).

With the rapid economic growth and food structure change, meat and meat products have become daily food for consumers. In particular, fried meat products are becoming increasing popular in home, restaurant and industry due to their unique qualities. Sodium chloride which is commonly known as salt is one of the most widely used in meat products to enhance sensory properties (flavor, texture and color) and water holding capacity, contributing to the extraction of myofibrillar protein to increase tenderness and juiciness, as well as extend the shelf-life of meat products (Albarracín et al., 2011). Thus, salt is an essential compound to achieve desire product quality. On the other hand, salt is known as prooxidant which can be detrimental to fried meat and frying oil due to the sodium ion can replace the iron ions in myoglobin molecules, thus iron ions are released and accelerate the oxidation (Bess, 2011). Chu and Luo (1994) studied effect of flour dough components (water, sugar and salt) on oil deterioration during deep-fat frying found that, water has the highest impact on oil deterioration, followed by salt and sugar thus, it can be promoted that salt can deteriorate the oil quality. Most of previous studies have been focused on the advantages of salt in maintaining or improving the quality of meat products, but there are limit information on the effects of salt on oil degradation during repeated frying. Therefore, the aim of this work was to examine the effect of sodium chloride content in the marinated pork on the quality of palm oil after deep-fat frying. The research results were utilized preliminary information in food industry and household for reducing chloride which affect to oil deterioration.

Materials and Methods

Sample preparation

Fresh sirloin pork and salt were purchased from a local grocery store in Bangkok, Thailand. Pork samples were cut into small pieces (1×1×8 cm) and marinated with salt (no other seasonings are added) at three levels (0, 1.5 and 3% w/w) because these are common amounts of salt added in

the meat product. Salt marinated meat samples were kept at 4°C for 20 hours before frying. For frying process, 150 g marinated sirloin pork was fried in palm oil (2 L) into temperature-controlled deep fryer (FRI-4050, Fritel, Thailand), at temperature 180 ± 5°C for 20 minutes for each batch (2 minutes for frying and 18 minutes waiting for next frying). Each repeated frying consisted of 24 frying batches repeatedly conducted in 8 hours. Frying oil sample was collected in quantity of 200 mL at 20 minutes, 2, 4, 6 and 8 hours, the fresh oil samples was added 200 mL to the fryer after each collection to maintain the volume of oil throughout the frying. The frying oil samples were stored in the amber bottle at -20°C until being analyzed.

Color measurement

All frying oil samples were determined the color values (L*, a*, b*: CIELAB values) using colorimeter (Ultrascan pro) with D65 illuminant at 10° observation.

Acid value

The amount of acid value in oil samples were also determined based on the methods of (AOCS., 1999a). Weight the oil sample 5 g into 500 mL Erlenmeyer flask. Then, oil sample was mixed with 70 mL of methanol and 1 mL of phenolphthalein. After that, titrated with 0.5 M KOH until first pink color appear. Acid value was calculated from the Equation 1.
Acid value, expressed as mg KOH/g of fatty acid

$$= \frac{volume\ of\ KOH\ x\ 0.5\ M\ x\ 56.10}{weight\ of\ oil\ sample\ (g)} \quad (1)$$

Where M = molarity of accurately standardized potassium hydroxide solution.

Peroxide value

The amount of peroxide value in oil samples were also determined based on the methods of (AOCS., 1999b). Weight the oil sample 5 ± 0.05 g into a 250 mL glass stoppered Erlenmeyer flask. Then, added 30 mL of the acetic acid: chloroform solution (3:2) and 0.5 mL of saturated potassium iodine solution. Swirl the flask 1 minute in dark and added 30 mL of deionized water immediately. Titrate with 0.01 N sodium thiosulfate. Next, added 2 mL of 1% starch solution and titrate until the blue color disappears. Accurately peroxide value was calculated as the mL of titrant in the oil sample.
Peroxide value (milliequivalents peroxide/1000 g sample) with Equation 2;

$$= \frac{(S-B)\ x\ Normality\ (N)\ x\ 1000}{weight\ of\ oil\ sample\ (g)} \quad (2)$$

Where S = titration of sample (mL); B = titration of blank (mL)

Statistical analysis

A randomized complete block design was used in this study. All experiments were conducted in duplicate. Statistical analysis was performed using Duncan's multiple range test using the SPSS 25.0 for windows with significance decided at the 95% confidence level.

Results and Discussion

In present study, quality indices including appearance, color, peroxide value and acid value of frying oil that used to conduct frying of pork at three different levels of salt 0, 1.5 and 3%) were determined.

Appearance and color of frying oil during deep-fat frying

The appearance color values (L*, a* and b* values) of frying oil that used to conduct frying of pork contained salt at the levels of 0, 1.5 and 3% NaCl oil are shown in Table 1. The lower lightness and higher redness of all frying oil samples showed a significant decrease with longer frying time. Frying oil samples in all three levels of salt which were collected at 20 min were still similar to fresh oil. However, after 2 hr frying, the appearance and the color values of frying oil in three treatments were apparently darken by increasing the redness while the lightness were greatly decreased. Darkening of fried oil during the frying period is mostly be blamed from the combination of oxidation and polymerization which developed the non-volatile decomposition product pigments and alpha- or beta- unsaturated carbonyl compounds formed when fatty acids is oxidized and thermally decomposed (Nayak et al., 2015). Moreover, the gradual increase the darkness of frying oil during the frying period may attributed due to the Maillard reaction and the movement of brown pigments from the fried products into frying oil (Sulieman et al., 2006).

From our result, it was surprised that 0% NaCl fried-pork oil had very dark color in particular after 4 hr. When finished frying (after 8 hr), the redness value of 0% NaCl fried-pork oil were much higher while the lightness and yellowness were much lower than those of 1.5 and 3% NaCl fried-pork oils. This could be due to salt could increase water-holding capacity of meat. Chloride ion (Cl^-) that dissociated from salt caused the increase of negative charge of myosin protein in meat resulting in the increase of meat swelling and water holding capacity (Aberle et al., 2001). Moreover, salt-solubilized myofibrillar proteins form a sticky exudate on the surface of meat which bind together via hydrophobic interaction upon cooking formed a matrix of heat-coagulated protein which entraps free water inside the meat during frying (Yusop et al., 2011). Therefore, 3% NaCl pork had only smaller amount of free water evaporated while 0% NaCl pork had larger amount of free water evaporated from meat piece during frying. This evaporated water caused thermal hydrolysis reaction by attacking the ester linkage of triacylglycerols and later produces di- and mono-acylglycerols, glycerol and fatty acids (Choe and Min, 2007). Larger amounts of evaporated water, more oil is hydrolyzed rapidly caused the formation of free fatty acids which is oxidized and further thermally decomposed to possibly form nonvolatile decomposition brown pigment (Omer et al., 2014). Moreover, the iron-binding sarcoplasmic protein such as myoglobin and hemoglobin (Britannica, 2017) could be leached in oil during frying and accelerate the oxidation of oil during frying. This could explain why 0% NaCl fried-pork oil had the most darkness in color during frying period when compared with those 1.5 and 3% NaCl-fried pork oil samples.

Table 1 Color of 0, 1.5 and 3% NaCl fried-pork oil during frying for 8 hours

Deep-fat frying time	0% NaCl		1.5% NaCl		3% NaCl	
	Appearance	Color	Appearance	Color	Appearance	Color
0 hr		L* : 95.35±0.72 a* : -9.15±0.03 b* : 47.61±0.51		L* : 96.49±0.76 a* : -9.67±0.05 b* : 46.48±1.30		L* : 96.51±1.51 a* : -8.05±0.16 b* : 45.45±1.26
20 min		L* : 94.36±0.15 a* : -7.66±0.13 b* : 55.19±0.88		L* : 94.21±0.11 a* : -7.57±0.07 b* : 54.17±1.10		L* : 95.06±0.46 a* : -6.53±0.03 b* : 48.07±0.30
2 hr		L* : 78.53±0.47 a* : 9.65±0.36 b* : 79.98±0.44		L* : 87.48±0.82 a* : -0.67±0.72 b* : 66.67±2.14		L* : 89.23±0.49 a* : -1.11±0.28 b* : 64.46±0.80
4 hr		L* : 60.50±0.53 a* : 29.01±0.41 b* : 90.70±0.30		L* : 83.07±0.67 a* : 4.95±0.67 b* : 77.04±1.14		L* : 86.24±0.25 a* : 2.82±0.39 b* : 74.47±0.82

Table 1 (continued).

6 hr	L* : 38.26±0.58 a* : 38.41±0.33 b* : 64.52±1.01	L* : 78.52±0.47 a* : 10.27±0.36 b* : 84.84±0.32	L* : 82.11±0.24 a* : 8.04±0.21 b* : 83.30±0.27
8 hr	L* : 27.48±0.28 a* : 38.39±0.09 b* : 46.58±0.53	L* : 75.49±0.59 a* : 13.56±0.54 b* : 87.91±0.60	L* : 79.77±0.32 a* : 11.32±0.43 b* : 88.58±0.57

Acid value and peroxide value of frying oil during deep-fat frying

The acid value is the most prominent indicator of oil quality and widely used in international regulations. For public health concerns, the content of acid value in frying oil are no more than 2.0 mg KOH/g (Chen et al., 2013). As shown in Fig. 1, acid values of all collected frying oil samples in the present study were still lower than 2.0 mg KOH/g. Acid value and peroxide value of 0, 1.5 and 3% NaCl fried-pork oil which was collected during 8 hours frying are shown in Fig. 1 and 2, respectively. Acid value is the value used to determine the quality of the oil during frying indicated the amount of free fatty acids those hydrolyzed from triacylglycerol through thermal hydrolysis reaction. As expected, 0% NaCl fried-pork oil showed higher acid value than 1.5 and 3% NaCl fried-pork oil throughout the frying period, in particular after frying for 4 hours. This could be due to more amount of water is evaporated from 0% NaCl pork during frying as explain in previous section. Increasing amount of salt to 3% did not much influenced the acid value of oil during frying period when compared with 1.5% salt addition in meat.

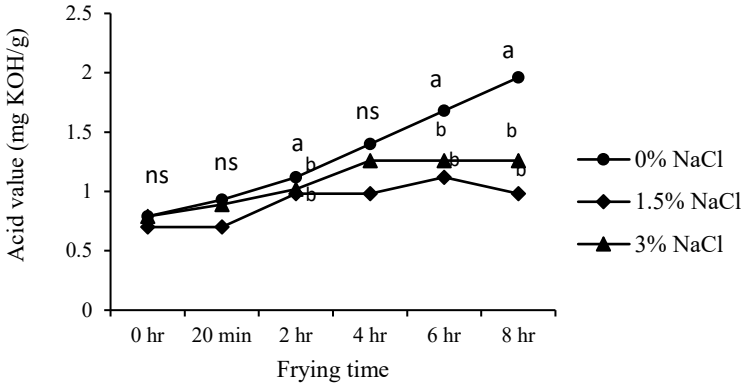


Fig. 1 Acid value (mg KOH/g) of frying oil after frying for 8 hours

[a-b] Mean values within vertical row with different subscripts indicate a significant difference ($p \leq 0.05$).

[ns] No significant difference ($p > 0.05$)

The peroxide value is the most commonly used to measure of oxidation degradation. If the peroxide value is high, the hydroperoxide is formed increased or may be reduced due to degradation that the affect to causing the rancid smell (Gordon, 2004). The peroxide value is the value used to determine the quality of the oil during frying indicated the amount of hydroperoxide which the product of primary oxidation. From our result, peroxide value of all collected frying oil samples increased between 0-4 hours after that decreased due to hydroperoxide decomposed. Increasing amount of salt to 1.5 and 3% NaCl, 2-fold of peroxide value was increased compared with 0% NaCl. This could be due to sodium ions (Na^{+}) can replace the iron ions (Fe^{2+}) that contained in the heme inside the animal tissue, and iron ions (Fe^{2+}) are released to accelerating oxidation by accelerating the decomposition of hydroperoxide (ROOH) and cause peroxyl radical ($ROO^{\bullet}$). Therefore, peroxyl radical ($ROO^{\bullet}$) could be reacts with new polyunsaturated fatty acids (PUFA) formed to hydroperoxide again

and breakdown to free radicals which these free radicals can continue to cause oxidation reaction (Min, 2006; Bess, 2011).

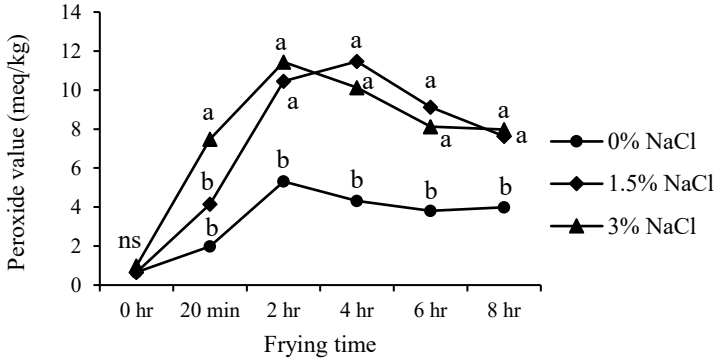


Fig. 2 Peroxide value (meq/kg) of frying oil after frying for 8 hours
[a-b] Mean values within vertical row with different subscripts indicate a significant difference ($p \leq 0.05$).
[ns] No significant difference ($p > 0.05$)

Conclusions

Overall results suggested that only one parameter in particular color or peroxide value could not be used as an indicator of oil quality deterioration. Thus, it must consider multiple parameters to judge the quality of frying oil. The presence of salt in meat could maintain the appearance of oil due to lower thermal hydrolysis, however salt could definitely accelerate oxidation resulting in deterioration of oil quality, but salt can maintain the quality of the oil in the color as the color of the fresh oil. Therefore, the amount of salt as well as the repeated frying cycles need to be minimized as possible.

Acknowledgements

This research is supported by graduate study development scholarship from the National Research Council of Thailand as of 2020 fiscal year and Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

Reference

Aberle, E.D., Forrest, J.C., Gerrard, D.E., Mills, E.W. 2001. Principles of Meat Science, 4th ed. Kendall Hunt Publishing Company. 353 pp.

Albarracín, W., Sánchez, I.C., Grau, R., Barat, J.M. 2011. Salt in food processing; usage and reduction: A review. Int. J. Food Sci. Technol. 46: 1329–1336. doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02492

AOCS. 1999a. Determination of acid value in fats and oils. AOCS Official Method 95 Cd 8–53. J. Am. Oil Chem Soc. IL, USA.

AOCS. 1999b. Determination of peroxide value in fats and oils. AOCS Official Method Cd 8–53. J. Am. Oil Chem Soc. IL, USA.

Bess, K.N. 2011. Effect of Various Salt Purity Levels on Lipid Oxidation and Sensory Characteristics of Ground Turkey and Pork. M.Sc. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, USA.

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. 2017. Myoglobin. https://www.britannica.com/science/myoglobin, 26 March 2021.

Chen, W.A., Chiu, C.P., Cheng, W.C., Hsu, C.K., Kuo, M.I. 2013. Total polar compounds and acid values of repeatedly used frying oils measured by standard and rapid methods. J. Food Drug Anal. 21: 58–65. doi.org/10.6227/jfda.2013210107

Choe, E., Min, D.B. 2007. Chemistry of deep-fat frying oils. J. Food Sci. 72. doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x

Chu, Y.H., Luo, S. 1994. Effects of sugar, salt and water on soybean oil quality during deep-frying. J. Am. Chem Soc. 71(8), 897–900. doi.org/10.1007/BF02540470

Gordon, M.H. 2004. Factors affecting lipid oxidation. Understanding and Measuring the Shelf-Life of Food. 128–141.

Fernquest, J. 2013. Fried food dangers: Govt testing to start. https://www.bangkokpost.com/learning/advanced/341551/fried-food-dangers-govt-testing-to-start, 27 November 2020.

Leong, X.-F., Ng, C.-Y., Jaarin, K., Mustafa, M. 2015. Effects of repeated heating of cooking oils on antioxidant content and endothelial function. Austin. J. Pharmacol Ther. 3: 1068.

Min, B. 2006. Mechanisms of lipid peroxidation in meats from different animal species. Ph.D. thesis, Iowa state university. Iowa, USA.

Nayak, P.K., Dash, U., Rayaguru, K., Krishnan, K.R. 2015. Physio-Chemical Changes During Repeated Frying of Cooked Oil: A Review. J. Food Biochem. 40: 371–390. doi.org/10.1111/jfbc.12215

Omer, N.M.A., Ahmed Al, E.M., Mariod, A., Mokhtar, M. 2014. Chemical reactions taken place during deep-fat frying and their products: A review. Journal of Natural and Medical Sciences. 1–17.

Sulieman, A.E.L. R. M., El-Makhzangy, A., Ramadan, M.F. 2006. Antiradical performance and physicochemical characteristics of vegetable oils upon frying of french fries: A preliminary comparative study. J. Food Lipids. 13: 259–276. doi.org/10.1111/j.1745-4522.2006.00050.x

Yusop, S.M., O'Sullivan, M.G., Kerry, J.P. 2011. In Processed Meats: Improving Safety, 1st ed. Cambridge, UK.

อิทธิพลของสายพันธุ์ยีสต์ต่อคุณภาพของเบียร์ข้าวสาลีเสริมมอลต์ข้าวไรซ์เบอร์รี่

Impact of yeast strain on the production of wheat beer added riceberry rice malt

เจนณรงค์ ประหยัด*, จิรายุ เปรมปรี, มณฑกานต์ หลีน้อย, มงคล เพ็ญสายใจ*

Jennarong Prayad*, Jirayu Preampree, Monthakarn Leenoy, Mongkol Phensaijai*

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Biology, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: jennarongprayad@gmail.com, mongkol.ph@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์คุณภาพของเบียร์ข้าวสาลีเสริมมอลต์ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ใช้สายพันธุ์ของยีสต์ในการหมักทั้งหมด 3 สายพันธุ์ได้แก่ WB-06, S-04 และ T-58 พบว่าเบียร์ที่หมักโดยเชื้อทั้ง 3 สายพันธุ์นี้มีปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์ และสีที่ใกล้เคียงกัน ผลิตภัณฑ์เบียร์ที่หมักโดยยีสต์สายพันธุ์ T-58 มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุดอยู่ที่ 437 ± 21 mg/L GAE ผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี FRAP และ DPPH Radical Scavenging Activity ของเบียร์ที่หมักโดยยีสต์สายพันธุ์ T-58 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 101 ± 6 mg $FeSO_4$ equivalent และ 80.94% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์น้ำตาลโดยวิธี HPLC ยีสต์แต่ละสายพันธุ์มีความสามารถในการบริโภคน้ำตาลที่แตกต่างกันโดยสายพันธุ์ T-58 มีความสามารถในการใช้น้ำตาลสูงที่สุด จากงานวิจัยพบว่ายีสต์สายพันธุ์ T-58 มีส่วนช่วยในการเพิ่มคุณประโยชน์ของผลิตภัณฑ์เบียร์ข้าวสาลีเสริมไรซ์เบอร์รี่ อีกทั้งการเสริมข้าวไรซ์เบอร์รี่สามารถทำให้เบียร์ข้าวสาลีมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: การต้านอนุมูลอิสระ, ข้าวไรซ์เบอร์รี่, เบียร์ข้าวสาลี, *Saccharomyces cerevisiae*

Abstract

Quality analysis of wheat beer mixed with riceberry rice fermented by using three strains of yeast; WB-06, S-04, and T-58 showed similar results in %ABV and color. However, it was found that the T-58's beer had the highest total polyphenolic content at 437 ± 21 mg / L GAE. The results of antioxidant assay tested by FRAP and DPPH Radical Scavenging methods of T-58's beer activity were also highest at 101 ± 6 mg FeSO4 equivalent and 80.94% respectively. Sugar analysis results by HPLC also showed the highest sugar consumption of T-58 yeast. The T-58 strain yeast had a high quality to be used to improve wheat beer production in addition riceberry rice malt can enhance the nutritional quality of wheat beer.

Keywords: antioxidant activity, riceberry rice, *Saccharomyces cerevisiae*, wheat beer

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทย มีแนวโน้มในการบริโภคเบียร์ที่มีความหลากหลายมากขึ้น เบียร์ข้าวสาลีเป็นเบียร์ที่ใช้ข้าวสาลีในกระบวนการผลิตแทนข้าวบาร์เลย์ เบียร์ข้าวสาลีมีการแข่งขันกันในตลาดระดับโลกที่สูง งานวิจัยของ Reginal et al. (2012) ได้กล่าวไว้ว่าข้าวนั้นมีศักยภาพที่จะใช้ในการผลิตเบียร์ได้และสามารถก่อให้ประโยชน์เพิ่มเติม เช่น สี, การต้านอนุมูลอิสระ, รสชาติ และกลิ่น ซึ่งสามารถดึงดูดผู้บริโภครายใหม่ได้

ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (*Oryza sativa* L.) เป็นข้าวซึ่งเกิดการผสมต่างสายพันธุ์ระหว่างข้าวเจ้าหอมนิลและข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจทางเลือกใหม่ของเกษตรกรไทย (Poosri et al., 2019) ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีสารต้านอนุมูลอิสระที่สูง และมีสารแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารสีที่ให้สีม่วง, แดง และน้ำเงิน ทำให้เบียร์ข้าวสาลีมีสีที่ต่างจากเบียร์ชนิดอื่นได้ (Suttiarporn et al., 2016)

ในงานวิจัยนี้จะทำการผลิตเบียร์โดยใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 สายพันธุ์ ได้แก่ WB-06 S-04 และ T-58 โดยยีสต์เหล่านี้ในทางการค้าจะมีการดัดแปลงสายพันธุ์ให้เหมาะสมกับประเภทของเบียร์ที่ผลิตโดยที่ WB-06 ใช้ในการผลิตเบียร์ข้าวสาลี S-04 ใช้ในการผลิตเบียร์ประเภท Stout และ T-58 ใช้ในการผลิตเบียร์ประเภท IPA

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ศึกษาประสิทธิภาพของยีสต์ *S. cerevisiae* ต่างสายพันธุ์โดยหมักในวัตถุดิบและสภาวะที่เหมือนกัน เพื่อตรวจสอบว่าสายพันธุ์ของยีสต์ที่ต่างกันจะให้ผลลัพธ์ของเบียร์ที่แตกต่างกันหรือไม่ อีกทั้งยังสามารถนำมาปรับใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และตอบสนองของต้องการของผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

การผลิตไรซ์เบอร์รี่มอลต์

การผลิตไรซ์เบอร์รี่มอลต์ดัดแปลงตามวิธีการของ ยุพกนิษฐ์ (2550) โดยนำเมล็ดข้าวไรซ์เบอร์รี่ 1.5 กิโลกรัม ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ และแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำเมล็ดข้าวออกมาตากลมเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้เมล็ดข้าวได้รับออกซิเจน จากนั้นทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนครบ 48 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนข้างต้นแล้วนำเมล็ดข้าวมาทำการงอก โดยนำเมล็ดข้าวใส่ในถาด คอยควบคุมความชื้นโดยการพรมน้ำ และนำไปไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง สังเกตการงอกของเมล็ดข้าวโดยให้ความยาวของรากมีความยาวประมาณ 1 เท่าของเมล็ดข้าว เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้แล้ว นำข้าวที่งอกไปให้ความร้อนที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อเป็นการหยุดการเจริญของเมล็ดข้าว แล้วชั่งน้ำหนักของมอลต์ข้าวไรซ์เบอร์รี่ภายหลังจากการอบแห้งเพื่อนำไปใช้ต่อในกระบวนการทำน้ำเวิร์ท

การเตรียมหัวเชื้อเริ่มต้น

งานวิจัยนี้ใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* แบบแห้ง ประเภท Top-fermenting มาใช้ในการหมักเบียร์ทั้งหมด 3 สายพันธุ์ ได้แก่ Safbrew WB-06, SafeAle S-04 และ Safbrew T-58 (Fermentis, Marcqen-Barœul Cedex, France) เตรียมโดยการนำเชื้อยีสต์แห้งแต่ละสายพันธุ์ ปริมาตร 0.5 กรัม ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Yeast extract – Malt

extract (YM) broth ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เพื่อทำการปลุกเชื้อ จากนั้นถ่ายเชื้อที่ผ่านการปลุกเชื้อแล้ว ลงในอาหาร Malt extract (ME) broth นำไปเพาะเลี้ยงโดยใช้เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ความเร็ว 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18–24 ชั่วโมงเพื่อให้ยีสต์เจริญอยู่ในระยะแบ่งตัว

การเตรียมน้ำเวิร์ท

เตรียมน้ำเวิร์ทโดยต้มน้ำ 20 ลิตร ให้ได้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นำมอลต์ทั้งหมด 5 กิโลกรัม แบ่งเป็นมอลต์ข้าวสาลี 4 กิโลกรัม และมอลต์ข้าวไรซ์เบอร์รี่ 1 กิโลกรัม ต้มเป็นเวลา 10 นาที เพิ่มอุณหภูมิเป็น 53 องศาเซลเซียส ต้มต่อเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบแล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 63 องศาเซลเซียส ต้มเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 72 องศาเซลเซียส ต้มเป็นเวลา 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 78 องศาเซลเซียส ต้มต่อเป็นเวลา 15 นาที ทำการแยกเศษมอลต์ออกให้เหลือเพียงน้ำเวิร์ท จากนั้นนำน้ำเวิร์ทไปต้มฆ่าเชื้อโดยการต้มเดือดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเมื่อน้ำเดือดให้จับเวลา 60 นาที ในขั้นตอนนี้จะใช้ฮอปส์สายพันธุ์ SAAZ ปริมาตร 10 กรัม ใส่ตอนเริ่มต้นเมื่อน้ำเดือด และ 5 นาทีสุดท้ายของการต้มจะใส่ฮอปส์สายพันธุ์ Huell Melon อีก 20 กรัม เพื่อเพิ่มความหอม (Ceccaroni et al., 2019)

กระบวนการหมักเบียร์

นำน้ำเวิร์ทที่ได้ผ่านการวัดค่า Total soluble solid แล้ว แบ่งใส่ถังหมักทั้งหมด 3 ถัง ถังละ 5 ลิตร นับจำนวนเซลล์ยีสต์ในอาหาร ME broth โดยใช้สไลด์นับจำนวนเซลล์ (haemacytometer) เมื่อน้ำเวิร์ทเย็นตัวลงแล้วจึงทำการเติมหัวเชื้อที่ความเข้มข้น 10^7 CFU/mL ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ สายพันธุ์ละหนึ่งถัง จากนั้นนำแต่ละถังไปหมักที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส ทำการหมักเป็นเวลา 10 วัน เมื่อครบแล้วทำการย้ายถังหมัก ทำการหมักต่อเป็นเวลา 7 วัน ในขั้นตอนการผลิตก๊าซในเบียร์ทำได้โดยเติมน้ำตาลเด็กซ์โตสลงในถังหมักแต่ละถัง บรรจุเบียร์ลงขวดแก้วสีชาขนาด 330 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน เมื่อได้ความซ่าและฟองตามที่ต้องการแล้ว ทำการพาสเจอร์ไรซ์ทั้งบรรจุภัณฑ์โดยใช้ความร้อนที่ 63 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เมื่อเบียร์เย็นตัวทำการวัดค่า Total soluble solid อีกครั้ง และนำไปวิเคราะห์คุณภาพของเบียร์

การวิเคราะห์คุณภาพของเวิร์ทและเบียร์

การวิเคราะห์สีของเบียร์จะทำตามวิธีมาตรฐานของ European Brewery Convention (EBC) (Koren et al., 2020) โดยใช้สูตรคำนวณสีของเบียร์ คือ $EBC = 25 \times D \times A_{430}$ โดยค่า D เป็นค่าความเจือจางของตัวอย่างที่นำมาวัด และ A_{430} เป็นค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ที่ 430 นาโนเมตร

การวิเคราะห์ปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC-2014, Shimadzu) ต่อกับ Auto injector (AOC-20i) ใช้คอลัมน์ DB-1 (Agilent J&W GC Column) โดยเทียบผลกับกราฟมาตรฐานเอทานอลที่มีสารละลายมาตรฐานโพรพานอลเป็นสารละลายมาตรฐานภายใน

การวิเคราะห์ Total polyphenolic content (TPC) ของเวิร์ทและเบียร์จะตรวจสอบโดยวิธี Folin-Ciocalteu และจะแสดงอยู่ในรูปของ mg/L ของกรด gallic (ฤทัยทิพย์ และคณะ, 2558) ทำได้โดยนำตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมเข้ากับสารละลาย Na_2CO_3 stock ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และผสมสารละลาย Folin stock ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 25 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร เทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก โดยผลของค่า TPC จะถูกนำมาใช้ในการประเมินความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างเวิร์ทและเบียร์โดยใช้วิธีทดสอบทั้งหมดสองวิธี ได้แก่ 2,2-diphenyl-1-picrilidrazyl (DPPH) และ The Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP)

การวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระจะดัดแปลงจากวิธีการของ ฤทัยทิพย์ และคณะ (2558) โดยวิธี DPPH ทำได้โดยนำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย DPPH 2 มิลลิลิตร ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร กับ เมทานอล โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer เทียบกับกราฟมาตรฐาน Ascorbic acid แสดงผลเป็นค่า %Radical scavenging วิธี FRAP ทำได้โดยนำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย FRAP 2 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 593 นาโนเมตร กับ Acetate Buffer เทียบกับกราฟมาตรฐาน Ferrous sulfate ($FeSo_4$)

การวิเคราะห์น้ำตาลในเบียร์จะดัดแปลงจากวิธีการของ Grembecka et al. (2014) โดยจะทำการตรวจสอบน้ำตาล 3 ชนิดได้แก่ กลูโคส มอลโทส และ ฟรักโทส ด้วยเทคนิค High performance liquid chromatography (HPLC) โดยใช้คอลัมน์ชนิด Benson polymeric (BP-8000 H+) ซึ่งมีน้ำกลั่นเป็น mobile phase ที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตร ต่อนาที และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ปริมาตรในการฉีด 20 ไมโครลิตร ทำการฉีดเป็นเวลา 30 นาที ต่อตัวอย่าง

การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส ดำเนินการทดสอบแบบ Hedonic Scaling 9 point ซึ่งดำเนินการโดยใช้ผู้ชิมที่ผ่านการเรียนรู้การทดสอบทางประสาทสัมผัสแล้วทั้งหมด 20 คน แบ่งเป็นผู้หญิง 10 คน และผู้ชาย 10 คน ทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยทดสอบในหัวข้อ สี กลิ่น รสชาติ ความขม และความชอบโดยรวม

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab (version 18) โดยใช้แผนวิเคราะห์แบบความแปรปรวนทางเดียว (ANOVA) ซึ่งแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ของเวิร์ทและเบียร์

จากการวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ของเวิร์ทและเบียร์ข้าวสาลีเสริมข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ผ่านการหมักโดยเชื้อ *S. cerevisiae* ที่ต่างสายพันธุ์กัน ได้แก่ WB-06, S-04 และ T-58 พบว่าค่าแอลกอฮอล์ของทั้ง 3 สายพันธุ์มีค่าที่

ใกล้เคียงกันดังที่แสดงใน Table 1 ซึ่งผลของค่าปริมาณแอลกอฮอล์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nele et al. (2019) ซึ่งได้มีการผลิตเบียร์ข้าวสาลีที่หมักโดยเชื้อ WB-06 พบว่ามีค่าปริมาณแอลกอฮอล์อยู่ที่ประมาณ 5% และค่า pH อยู่ที่ 4 อย่างไรก็ตามวัตถุดิบหลักของงานวิจัยครั้งนี้เป็นมอลต์ข้าวสาลีผสมไรซ์เบอร์รี่ ทำให้ได้ค่าแอลกอฮอล์ที่ไม่สูงมากนัก สำหรับผลของค่าสีของเบียร์ข้าวสาลีผสมไรซ์เบอร์รี่ที่หมักโดยเชื้อต่างสายพันธุ์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ European Brewery Convention (EBC) ดังแสดงอยู่ใน Table 1

Table 1 Wort and wheat beer quality attributes fermented by different strain of *S. cerevisiae*

Parameter	Wort	WB-06	S-04	T-58
pH	6.48 ± 0.1^{A}	4.08 ± 0.1^{C}	4.11 ± 0.1^{B}	3.74 ± 0.1^{D}
Alcohol (%ABV)		3.78 ± 0.1^{a}	3.72 ± 0.1^{b}	3.44 ± 0.1^{c}
Color (EBC-U)		14.09 ± 0.07^{A}	14.57 ± 0.13^{A}	8.99 ± 0.3^{B}
Total soluble solid (Brix%)	11.5 ± 0.7^{a}	4.90 ± 1.56^{b}	4.5 ± 0.7^{b}	5.1 ± 1.27^{b}

All values are expressed as means ± standard deviation (n = 3); EBC-U: European Brewery Convention Units. Values in the same row followed by a different letter are statistically different ($p < 0.05$)

ผลการวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระในเวิร์ทและเบียร์

จากผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารต้านอนุมูลอิสระในเวิร์ทและเบียร์ ดังแสดงใน Table 2 ผลิตภัณฑ์เบียร์ข้าวสาลีเสริมข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่หมักโดยเชื้อ WB-06, S-04 และ T-58 มีค่าปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกอยู่ที่ 422±28, 432±13 และ 437±21 mg/L ตามลำดับ และ ใน Table 2 ยังแสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าลดลงจากเวิร์ทสู่เบียร์เนื่องจากในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำสารประกอบฟีนอลจะตกตะกอน อีกทั้งสารประกอบฟีนอลิกยังมีความสัมพันธ์กับค่าการต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีรายงานวิจัยที่แสดงค่าปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกของเบียร์ข้าวสาลีเสริมไรซ์เบอร์รี่ที่หมักโดยยีสต์สายพันธุ์ข้างต้น แต่พบว่าผลของสารประกอบฟีนอลิกในเบียร์ข้าว มีค่าเท่ากับ 228±15 mg/L (Ceccaroni et al., 2019) ซึ่งค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในเบียร์ชนิดนี้มีค่าที่สูง สาเหตุหลักมาจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่เสริมไปในเบียร์เป็นสารประกอบจำพวก Polyphenol สารประกอบที่ได้จากการหมักของยีสต์แต่ละสายพันธุ์มีผลทำให้ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและค่าการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในส่วนของการวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ของ Ditrych et al. (2015) ได้รายงานผลการต้านอนุมูลอิสระเทียบกับสาร $FeSO_4$ ของเบียร์ชนิดลาเกอร์ ที่หมักโดยอุตสาหกรรมขนาดเล็กมีผลการต้านอนุมูลอิสระอยู่ที่ 2.94-3.80 mmol/L อีกทั้งยังกล่าวว่าการประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจะขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน และสัดส่วนที่แตกต่างกันของสารหลายชนิดที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระในเบียร์ และงานวิจัยของ Pai et al. (2013) ได้รายงานผลของ DPPH Radical scavenging ของเบียร์ชนิด Pale Lager ที่จำหน่ายที่ประเทศอินเดียทั้งหมด 15 ยี่ห้อซึ่งมีค่า % Radical scavenging อยู่ที่ระหว่าง 68.34 ± 0.85% ถึง 89.90 ± 0.71% เบียร์ที่มีฤทธิ์การยับยั้งสารอนุมูลอิสระที่สูงจะช่วยเพิ่มความคงตัวของรสชาติได้

เนื่องจากในระหว่างการหมักเบียร์จะมีการก่อตัวของ อัลดีไฮด์ที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการออกซิเดชั่น (Zhao et al., 2010)

Table 2 Total polyphenols and antioxidant activity in beer

Treatments	TPC GAE (mg/L)	FRAP $FeSO_4$ (mg/L)	%Radical Scavenging
Wort	452 ± 28^{A}	103 ± 10^{a}	82.76 ± 0.9^{A}
WB-06 (Control)	422 ± 28^{A}	96 ± 11^{a}	75.20 ± 28^{B}
S-04	432 ± 13^{A}	99 ± 7^{a}	79.97 ± 2.7^{A}
T-58	437 ± 21^{A}	101 ± 6^{a}	80.80 ± 1.9^{A}

All values are expressed as means ± standard deviation (n = 3); TPC: Total polyphenolic contents, GAE: Gallic acid equivalent, FRAP: Ferric reducing antioxidant power, $FeSO_4$: Ferrous Sulfate equivalent, %Radical Scavenging: The DPPH Radical scavenging activity. Values in the same column followed by a different letter are statistically different ($p < 0.05$)

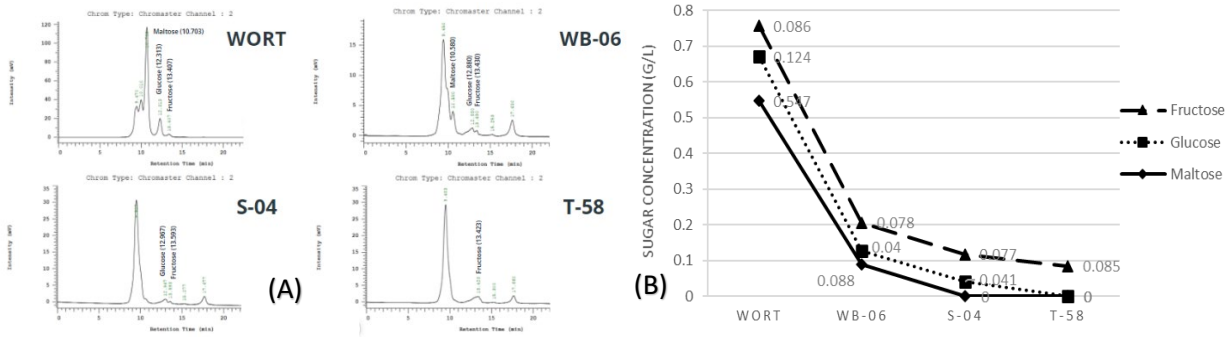


Fig.1 (A) Chromatogram of wort and beer, (B) Graph sugar concentration of wort and beer

ผลการทดสอบสารประกอบน้ำตาลในเวิร์ทและเบียร์

จากการศึกษาสารประกอบน้ำตาลในเวิร์ทและเบียร์ที่วิเคราะห์โดยวิธี HPLC เทียบกับสารมาตรฐานน้ำตาล 3 ชนิด ได้แก่ มอลโทส, กลูโคส และ ฟรักโทส ซึ่งผลโครมาโตแกรมของสารตัวอย่างจะแสดงใน Fig.1A ค่า Retention Time ของสารมาตรฐานน้ำตาลมอลโทส กลูโคส และฟรักโทส อยู่ที่ 10.70, 12.31 และ 13.91 นาที ตามลำดับ จาก Fig.1B จะเห็นได้ว่าที่สภาวะและวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักที่เหมือนกันแต่ความสามารถในการบริโภคน้ำตาลของยีสต์ T-58 จะมีความสามารถในการบริโภคน้ำตาลที่สูงกว่าสายพันธุ์อื่นซึ่งประสิทธิภาพการหมักได้แอลกอฮอล์ของยีสต์แต่ละสายพันธุ์จะถูกจำกัดโดยความสามารถในการขนส่งมอลโทสเข้าสู่เซลล์ ในผลงานวิจัยของ Heitmann et al. (2017) ได้กล่าวว่ายีสต์จะมีความสามารถในการหมักน้ำตาลกลูโคสได้สูงกว่าน้ำตาลฟรักโทส โดยในช่วงต้นของการหมักจะใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นหลัก และในระยะต่อมาจะมีการใช้มอลโทสและฟรักโทสเป็นแหล่งคาร์บอนในวิถีเมแทบอลิซึม

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยผู้ทดสอบทั้งหมด 20 คน ได้ผลดังแสดงใน Table 3 แสดงให้เห็นว่าเบียร์ที่หมักโดยเชื้อทั้ง 3 สายพันธุ์มีความชอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

Table 3 Sensorial profile of Wheat beer added riceberry rice malt

	Parameter				
	Color	Aroma	Taste	Bitterness	Overall
WB-06	6.36 ± 1.9[a]	6.63 ± 1.8[a]	5.89 ± 1.3[a]	5.84 ± 2.1[a]	6.31 ± 0.9[a]
S-04	7.15 ± 1.3[a]	6.21 ± 1.6[a]	5.78 ± 1.4[a]	5.36 ± 2.2[a]	6.42 ± 1.1[a]
T-58	6.63 ± 1.8[a]	6.36 ± 1.2[a]	5.8 ± 1.7[a]	5.26 ± 2.1[a]	6.68 ± 1.4[a]

All values are expressed as means ± standard deviation (n = 20) Values in the same column followed by a different letter are statistically different ($p < 0.05$)

สรุป

จากการวิเคราะห์คุณภาพของเบียร์ข้าวสาลีเสริมข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่หมักโดยเชื้อยีสต์ที่ต่างสายพันธุ์กันพบว่าที่วัตถุดิบและสภาวะในการหมักที่เหมือนกันแต่การใช้เชื้อที่ต่างสายพันธุ์กันในการผลิตทำให้ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันออกไปทั้งในเรื่องของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและองค์ประกอบของน้ำตาล โดยยีสต์สายพันธุ์ T-58 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นการเพิ่มตัวเลือกในการใช้ยีสต์ในการผลิตเบียร์เพื่อเพิ่มคุณประโยชน์ให้กับเบียร์ไม่มากก็น้อย สำหรับการผสมมอลต์ข้าวไรซ์เบอร์รี่ในกระบวนการผลิตยังสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับเบียร์ได้ อีกทั้งยังเป็นการยกระดับข้าวของประเทศให้มีมูลค่าที่สูงขึ้นอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

ฤทัยทิพย์ สุระเสียง, พัชราภรณ์ ถิ่นจันทร์, พุทธพร วิวาจารย์, สิทธิชัย บุญมั่น, ประชาชาติ นพเสนีย์, ศุภกฤต จันทรวิชญ์, ชลธิรา แสงศิริ, ธนพร ขจรผล. 2558. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และวิตามินซี ของใบหม่อนจำนวน 8 สายพันธุ์. ว. วิทย์. กษ. 46: 381–384.

ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล. 2550. คุณสมบัติของมอลต์และเวิร์ตจากข้าวที่ปลูกในประเทศไทยจำนวน 42 สายพันธุ์, น. 477-485. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. กรุงเทพฯ. คณะเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยรังสิต.

Ceccaroni, D., Sileoni, V., Marconi, O., Giovanni, F.D., Lee, G.E., Perretti, G. 2019. Specialty rice malt optimization and improvement of rice malt beer aspect and aroma. LWT-Food Science and Technology 99: 299–305.

Ditrych, M., Kordialik, B.E., Czyzowska A. 2015. Antiradical and reducing potential of commercial beers. Food Technology and Economy, Engineering and Physical Properties 33: 261–266.

Grembecka, M., Lebiedzinska, A., Szefer P. 2014. Simultaneous separation and determination of erythritol, xylitol, sorbitol, mannitol, maltitol, fructose, glucose, sucrose and maltose in food products by high performance liquid chromatography coupled to charged aerosol detector. Microchemical Journal 117: 77–82.

Heitmann, M. 2017. The investigation of technological, nutritional and sensorial characteristics of wheat bread, influenced by different strains of saccharomyces cerevisiae. PhD Thesis, University College Cork.

Koren, D., Vecseri, B.H., Kun, F.G., Urbin A., Nyitrai Á., Sipos L. 2020. How to objectively determine the color of beer. Journal of Food Science and Technology 57: 1189–1189.

Nele B., Ginzel M., Titze J. 2019. Precision of a small brew house by determining the repeatability of different brews to guarantee the product stability of the beer. Beverages 5: 67–75.

Pai T., Siddhi S., Arindam G., Palak C., Arpita G., Neetin D. 2013. Characterization of Indian beers: chemical composition and antioxidant potential. J. food Sci. Technol. 52: 1414–1423.

Poosri S., Thilavech T., Pasukamonset p., Suparpprom C. Wattana A. 2019. Studies on Riceberry rice (*Oryza sativa* L.) extract on the key steps related to carbohydrate and lipid digestion and absorption: A new source of natural bioactive substances. NFS Journal 17: 17–23.

Reginal, C.A., Chiba, Y., Goodfellow, V., MacKinlay J., Brosnan, J.M., Bringhurst, T.A., Bryce, J.H. 2012. Effect of germination temperatures on proteolysis of the gluten free grains rice and buckwheat during malting and mashing. Journal of Agricultural and Food Chemistry 60: 10147–10154.

Suttiarporn P., Sookwong P., Mahatheeranont S. 2016. Fractionation and identification of antioxidant compounds from bran of Thai Bback rice cv. Riceberry. International Journal of Chemical Engineering and Applications 7: 109–114.

Zhao H., Chen W., Lub J., Zhao M. 2010. Phenolic profiles and antioxidant activities of commercial beers. Food Chemistry 119: 1150–1158.

การเปรียบเทียบการทำแห้งด้วยการควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมและการตากแดดและการเปรียบเทียบการเก็บรักษาในระบบปิดและยุ้งฉางต่อคุณภาพข้าวเปลือกพันธุ์ทับทิมชุมแพ

Comparison of the drying system controlling the ambient air flow and sun drying and comparison of storage in a closed condition and a granary on the qualities of Tubtim Chumphae paddy rice

จารุวรรณ จำเนียรพล[a], พิณทิพย์ รัมภกาภรณ์[a], วีรชัย ชัยวรพฤกษ์[b], ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล[c], รติพร มั่นพรหม[d], สุดาทิพย์ แซ่ตั้น[a]*

Jaruwan Jumnianpol[a], Pinthip Rumpagaporn[a], Weerachai Chaiworapuek[b], Damrongvudhi Onwimol[c], Ratiporn Munprom[d], Sudathip Sae-tan[a]*

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[c]ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[d]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[b]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[c]Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[d]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
* Corresponding author. E-mail address: fagists@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การทำแห้งและการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญเพราะมีผลต่อคุณภาพและความปลอดภัย งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาประสิทธิภาพของการลดความชื้นด้วยการควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมและวิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยเปรียบเทียบกับวิธีการปฏิบัติเดิมของเกษตรกรต่อคุณภาพข้าวเปลือกพันธุ์ทับทิมชุมแพ ผลการทดลองพบว่าการตากด้วยแสงอาทิตย์และการลดความชื้นด้วยการควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากร้อยละ 20.97 มาตรฐานเปียก ลงมาถึงร้อยละ 9.12 มาตรฐานเปียก และจากร้อยละ 23.72 มาตรฐานเปียกลงมาถึงร้อยละ 11.86 มาตรฐานเปียกได้ภายในเวลา 30 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมงตามลำดับ หลังการเก็บรักษานาน 6 เดือน พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บในเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีความชื้นลดลงร้อยละ 27.80 ขณะที่ข้าวเปลือกที่เก็บในยุ้งฉางมีความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.69 ตามความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ข้าวเปลือกที่เก็บจากทั้ง 2 วิธีไม่พบสารอะฟลาทอกซิน แต่ทั้ง 2 วิธีไม่สามารถควบคุมการลดลงของสารฟีนอลิกรวมได้ กล่าวโดยสรุปการการทำแห้งโดยการควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมมีประสิทธิภาพในการลดความชื้นของข้าวเปลือกและการเก็บรักษาในเครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการพัฒนานวัตกรรมการลดความชื้นและเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ตอบสนองกับความต้องการของเกษตรกรยุค 4.0 ในการชะลอการจำหน่ายในช่วงราคาตกต่ำ

คำสำคัญ: การลดความชื้น, ข้าวเปลือก, ฟีนอลิก, อะฟลาทอกซิน, อากาศแวดล้อม

Abstract

Drying and storage of paddy rice are the critical steps in post-harvest handling of paddy rice because it influences the qualities and safety. This study aimed to investigate the efficacy of the drying system controlling the flow of ambient air and storage system compared to the traditional approaches of farmers on the qualities of Tubtim Chumphae paddy rice. The results showed that sun-drying and the drying system controlling the ambient air flow were able to decrease moisture content from 20.97% (wet basis) to 9.12% (wet basis) and from 23.72% (wet basis) to 11.86% (wet basis) within 30 and 8 h, respectively. After 6 months storage, the moisture of paddy rice stored in the developed machine was decreased 27.80% but the moisture of paddy rice stored in traditional granary was increased 6.69% depending on relative humidity. Paddy rice stored in both conditions was free from aflatoxin. However, both storage conditions were not able to maintain total phenolic content of paddy rice during storage. In conclusion, drying system controlling the ambient air flow and storage system are efficient to lower moisture of paddy rice after harvesting and maintain moisture during storage. However, the bigger size of innovation for drying and storage system is needed for trading retardation during price decline for Smart Farmer 4.0.

Keywords: Aflatoxin, ambient air, dehydration, paddy rice, phenolics

คำนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยโดยมีส่วนสำคัญทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก โดยปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจกับผลิตภัณฑ์อินทรีย์มากขึ้น แต่จากการวิเคราะห์สถานการณ์การตลาดผลิตภัณฑ์ข้าวในประเทศไทยด้วยวิธี BCG Matrix (Boston Consulting Group) พบว่าข้าวหลากสี และข้าวอินทรีย์มีโอกาสขยายตัวในด้านความต้องการของตลาดสูงมากเทียบเท่ากับตลาดข้าวหอมมะลิ แต่มีส่วนแบ่งทางการตลาดต่ำ (สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2558) เนื่องมากจากปริมาณการผลิต และการจัดการคุณภาพข้าวที่ไม่ดี

หลังจากเก็บเกี่ยวข้าวแล้ว จำเป็นต้องมีการลดความชื้นของเมล็ดข้าวให้เหมาะสม เนื่องจากเมล็ดมีการหายใจ ซึ่งทำให้กองข้าวมีอุณหภูมิสูง เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงต้องทำการลดความชื้นให้เหลือประมาณร้อยละ 12–14 โดยการลดความชื้นทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้แสงอาทิตย์ และการใช้เครื่องอบ (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, 2555a) โดยทั่วไปกลุ่มเกษตรกรรายเล็กที่ผลิตข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการไม่นิยมขายข้าวเปลือกเข้าโรงสีขนาดใหญ่ที่มีเครื่องอบข้าว เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีตลาดเฉพาะ อาจจะไปปนกับข้าวชนิดอื่น หากมีการใช้ร่วมกัน เกษตรกรต้องทำความสะอาดเครื่องจักรหรือเครื่องมือก่อนที่จะใช้ (ศูนย์ข้อมูลข้าวตลาดเฉพาะ, ม.ป.ป.) ดังนั้นข้าวเปลือกจากกลุ่มเกษตรกรที่ทำการปลูกข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการ จึงทำการลดความชื้นด้วยการใช้ลานตากที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลานาน ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และมีข้อจำกัดในการทำงานในฤดูฝน ข้าวมีความชื้นไม่สม่ำเสมอ การแตกร้าวในเมล็ดข้าว (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, 2555b) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ลมอุณหภูมิต่ำกว่า 43 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราในการงอกสูงถึง 85% (สมชาติ และ เพชรา, 2533) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประสิทธิภาพของการลดความชื้นด้วยการควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมและการเก็บรักษาระยะเวลา 6 เดือนในเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบกับการตากแดดและการเก็บในยุ้งฉางต่อปริมาณความชื้น ปริมาณสารฟีนอลิกรวม และปริมาณสารอะฟลาทอกซินของข้าวเปลือกพันธุ์ทับทิมชุมแพ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

เครื่องลดความชื้นด้วยการควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมขนาดบรรจุ 100 กิโลกรัม เป็นเครื่องทำแห้งที่พัฒนาขึ้นโดยจัดทิศทางการไหลของอากาศแวดล้อมผ่านแผ่นโลหะที่มีรูพรุนขนาด 8 มิลลิเมตร เพื่อให้ทิศทางการไหลของอากาศแวดล้อมเท่ากันทั้งหน้าตัดในระหว่างการทำแห้ง มีการควบคุมความเร็วลม ณ ทางเข้าอยู่ที่ 15.8 ± 4 m/s และ ณ ตำแหน่งผ่านข้าวความเร็วลมอยู่ที่ 0.5 ± 0.05 m/s ลักษณะการเก็บข้าวในเครื่องจะแบ่งเก็บเป็น 2 ส่วน (D และ E) มีลมผ่านเข้าที่ช่อง A และผ่านออกที่ช่อง B และ C (Fig 1) และเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถเก็บข้าวเปลือกที่ทำแห้งแล้วไว้ภายในเครื่องได้โดยในระหว่างการเก็บรักษาไม่มีการเปิดให้ลมผ่าน

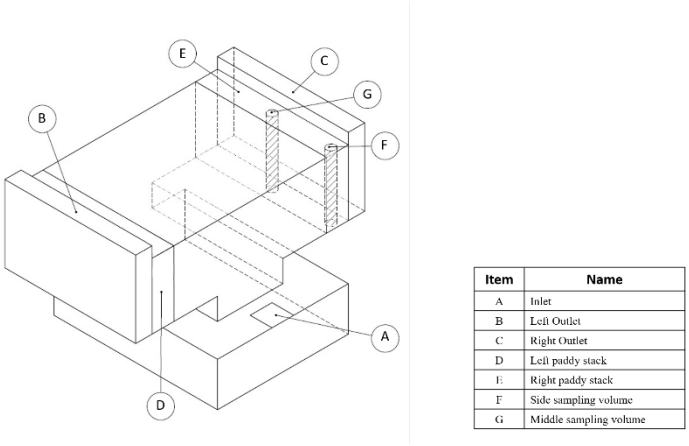
วัตถุดิบ

จัดซื้อข้าวเปลือกพันธุ์ทับทิมชุมแพจากเกษตรกร อำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี โดยเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกในช่วงเดือนพฤษภาคม 2562 หลังจากนั้นทำแห้งข้าวเปลือกโดยการตากด้วยแสงอาทิตย์และถูกเก็บในกระสอบพลาสติกที่อุณหภูมิห้องก่อนทำการทดลอง

การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อการทำแห้ง

ทำการปรับความชื้นตัวอย่างข้าวเปลือกให้มีความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 25 โดยคำนวณตาม Equation 1 (ดำรงวุฒิ, 2562)

$$\text{น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด (กรัม)} = \text{น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ด} \times \frac{(100 - \text{ความชื้นเริ่มต้น})}{(100 - \text{ความชื้นที่ต้องการ})} \quad (1)$$



Item	Name
A	Inlet
B	Left Outlet
C	Right Outlet
D	Left paddy stack
E	Right paddy stack
F	Side sampling volume
G	Middle sampling volume

Fig. 1 Schematic diagram of low temperature air-drying machine (A) Air inlet (B) Left air outlet (C) Right air outlet (D) Left paddy stack (E) Right paddy stack (F) Side sampling volume (F) Middle sampling volume

การทำแห้งข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่ผ่านการปรับความชื้นแล้วจะถูกทำแห้งด้วยสองวิธีการดังนี้

การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ นำข้าวเปลือกปริมาณ 80 กิโลกรัมที่ถูกปรับความชื้นแล้ววางบนตาข่ายสีฟ้าและวางบนพื้นซีเมนต์ เพื่อรับแสงอาทิตย์ทุกวัน โดยข้าวถูกเก็บรวมในตอนกลางคืนเพื่อความปลอดภัย ในช่วงการทำแห้งจะมีการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก 100 กรัม (จาก 5 ตำแหน่งของลานตาก) เพื่อวิเคราะห์ความชื้นของเมล็ดข้าวทุก 2 ชั่วโมง ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกเก็บในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ปิดสนิท ที่อุณหภูมิห้องก่อนนำมาวิเคราะห์

การทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งที่ควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อม นำข้าวเปลือกปริมาณ 100 กิโลกรัมที่ถูกปรับความชื้นแล้วมาทำแห้งด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้น โดยควบคุมความเร็วลม ณ ทางเข้า และ ณ ตำแหน่งผ่านข้าวตามที่กำหนดข้างต้น เก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ตัวอย่างจะถูกสุ่มที่ตำแหน่งกลางเครื่อง (ตำแหน่ง G) และด้านข้าง (ตำแหน่ง F) (Fig 1) โดยตัวอย่างถูกสุ่มตำแหน่งละ 20 กรัมด้วยหลาว (seed sampling probe)

การเก็บรักษาข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่ผ่านการทำแห้งแล้วจากทั้งสองวิธีการ จะถูกเก็บรักษาที่สภาวะต่างกันเพื่อทดสอบคุณภาพของเมล็ดข้าวดังนี้

การเก็บรักษาข้าวในยุ้งฉาง ข้าวที่ถูกลดความชื้นด้วยแสงอาทิตย์แล้ว ปริมาณ 72 กิโลกรัม จะถูกบรรจุลงในกระสอบพลาสติกและเก็บในยุ้งฉางของเกษตรกรที่ไม่มีการควบคุมบรรยากาศ ทำการเก็บรักษานาน 6 เดือน และทำการสุ่มตัวอย่าง 2 กิโลกรัมทุกเดือน ตัวอย่างถูกเก็บในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ปิดสนิท ที่อุณหภูมิห้องก่อนการวิเคราะห์ต่อไป

การเก็บรักษาข้าวในเครื่องที่พัฒนาขึ้น ข้าวที่ถูกทำแห้งด้วยเครื่องควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อม ปริมาณ 88 กิโลกรัม จะถูกเก็บในเครื่อง เนื่องจากเป็นนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อไม่ต้องมีการขนย้าย แต่สามารถทำแห้งและเก็บรักษาได้ภายในเครื่องเดียว ทำการเก็บรักษานาน 6 เดือน และทำการสุ่มตัวอย่าง 2 กิโลกรัมทุกเดือน ตัวอย่างถูกเก็บในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ปิดสนิท ที่อุณหภูมิห้องก่อนการวิเคราะห์ต่อไป

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกโดยการอบแห้งในตู้อบไฟฟ้า ตามวิธีของ AOAC (2000)

การกะเทาะเปลือกข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่ได้ถูกนำมากะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องสีข้าวขาวและข้าวกล้องนาทวี รุ่น NW1000 TURBO โดยปรับระดับลูกกลิ้งให้ห่างกันประมาณ 0.1 เซนติเมตร ทำการกะเทาะเปลือกข้าวเปลือก 1 ครั้ง จากนั้นนำข้าวกล้องที่ได้มาคัดแยกข้าวเปลือกที่ปนหลังจากการกะเทาะ ข้าวที่กะเทาะได้ถูกเก็บในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ปิดสนิท ที่อุณหภูมิ -20°C ก่อนการวิเคราะห์ต่อไป

การเตรียมสารสกัดจากเมล็ดข้าว

สกัดสารฟีนอลิกรวมจากข้าวกล้องทับทิมชุมแพโดยดัดแปลงวิธีการของ Moongngarm and Saetung (2010) ซึ่งมีวิธีโดยย่อดังนี้ บดตัวอย่างเมล็ดข้าวกล้อง 5 กรัม ให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ และใส่ลงในขวดแก้วสีชาขนาด 20 มิลลิลิตร เติมเมทานอล 12.5 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 360 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แยกส่วนกากออก ล้างส่วนกากด้วยเมทานอลปริมาณ 5 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 25 มิลลิลิตร สำหรับการวิเคราะห์ต่อไป

การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกรวม

วิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกรวม ด้วยวิธีการซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Singleton and Rossi (1965) โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของแกลลิก (gallic acid) และคำนวณปริมาณสารฟีนอลิกรวมในรูปมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิก (GAE) ต่อกรัมของน้ำหนักตัวอย่างข้าว

การวิเคราะห์สารอะฟลาทอกซิน บี 1, บี 2, จี 1 และ จี 2

ข้าวกล้องถูกวิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซินด้วยวิธี HPLC ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ AOAC (2002) Method 991.31 ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้ สกัดอะฟลาทอกซินในตัวอย่าง ด้วยเมทานอลร้อยละ 70 จากนั้นนำสารละลายที่สกัดได้มาผ่านคอลัมน์อิมมูโนแอฟฟินิตีคอลัมน์ (immunoaffinity columns) ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะเจาะจงต่อสารอะฟลาทอกซิน จากนั้นทำการชะอะฟลาทอกซินออกจากคอลัมน์ด้วยเมทานอล วิเคราะห์เทียบปริมาณอะฟลาทอกซินโดยใช้อะฟลาทอกซิน บี 1, บี 2, จี 1 และ จี 2 เป็นสารมาตรฐาน

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าคุณภาพแต่ละปัจจัยถูกทำ 3 ครั้ง (n=3) แสดงผลการวิเคราะห์เป็น ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± S.D.) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของข้อมูล โดยใช้ One-way Analysis of Variance (ANOVA) ใช้โปรแกรม SPSS version 19 โดยพิจารณาความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการทำแห้ง

จากผลจากลดความชื้นข้าวเปลือก พบว่า การทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งที่ควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจากร้อยละ 23.72 ลงถึงร้อยละ 11.86 เมื่อผ่านไป 8 ชั่วโมง โดยพบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงถึงร้อยละ 23.91 ใน 2 ชั่วโมงแรกของการลดความชื้น และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงร้อยละ 11.86 เมื่อผ่านไป 8 ชั่วโมง โดยความชื้นของข้าวเปลือกในเครื่องทำแห้งที่พัฒนาขึ้นมีความสม่ำเสมอทั้งตำแหน่งกลางและด้านข้างของเครื่อง (ไม่แสดงข้อมูล) ขณะที่ข้าวเปลือกที่ตากด้วยแสงอาทิตย์ตามวิธีปฏิบัติของเกษตรกร พบว่าความชื้นลดลงจากร้อยละ 20.97 เหลือร้อยละ 9.12 เมื่อเวลาผ่านไป 30 ชั่วโมง โดยพบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงร้อยละ 25.29 ใน 4 ชั่วโมงแรกของการตาก ซึ่งช้ากว่าการลดความชื้นด้วยเครื่องทำแห้งที่พัฒนาขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าข้าวเปลือกไม่สามารถตากอย่างต่อเนื่อง เมื่อนำมาตากด้วยแสงอาทิตย์ในวันที่สอง พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกไม่มีความสม่ำเสมอ โดย ณ ชั่วโมงที่ 28 ของการตากความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น และลดลงอีกครั้ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดความชื้นที่ไม่ลงอย่างสม่ำเสมอ (Fig. 2) ทั้งนี้การลดลงของความชื้นอย่างมากในช่วงแรกของการตากด้วยแสงอาทิตย์อาจเป็นผลจากความชื้นสัมพัทธ์ที่ จ.อุทัยธานี ต่ำ (ร้อยละ 62) เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ จ.กรุงเทพฯ ซึ่งสูงกว่า (ร้อยละ 69) (ศูนย์ภูมิอากาศ, 2563) โดยผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการทำแห้ง สามารถกล่าวได้ว่าการลดความชื้นด้วยเครื่องทำแห้งที่ควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อม มีประสิทธิภาพมากกว่าการตากด้วยแสงอาทิตย์เนื่องจากมีความสม่ำเสมอมากกว่าและใช้ระยะเวลาน้อยกว่า

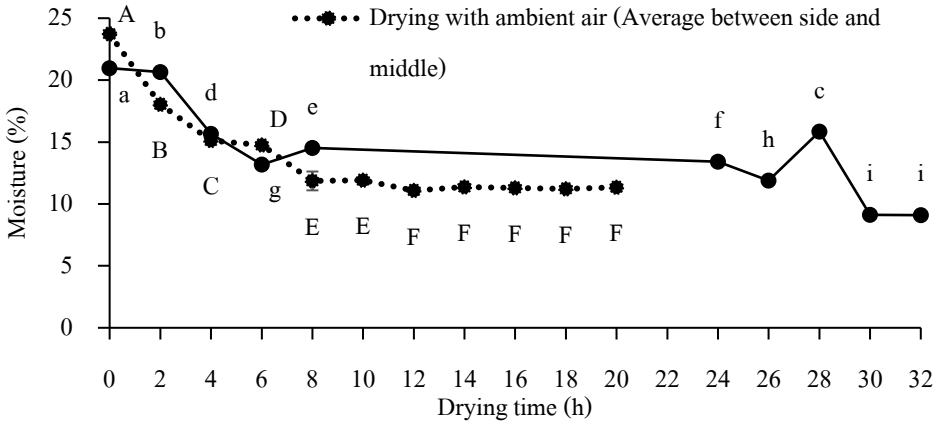


Fig. 2 Moisture content of paddy rice during drying

Mean values superscripted with different upper-case letters indicate a significant difference of moisture content during drying with ambient air; different lower-case letters indicate a significant difference of moisture content during drying with sunlight

ความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บรักษา

หลังจากลดความชื้นของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่าร้อยละ 11 ข้าวเปลือกจะถูกเก็บรักษา โดยข้าวเปลือกที่ถูกลดความชื้นด้วยเครื่องทำแห้งที่พัฒนาขึ้นถูกเก็บรักษาในเครื่อง แต่ไม่มีการเปิดลมผ่าน เนื่องจากเครื่องถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับทั้งลดความชื้นและเก็บรักษา จากผลการทดลองพบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีความชื้นลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Table 1) โดยถึงแม้ว่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพิ่มขึ้นความชื้นของข้าวเปลือกไม่เพิ่มขึ้นตาม ในขณะที่ข้าวเปลือกที่เก็บในยุ้งฉางของเกษตรกร ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงตลอดในช่วง 4 เดือนแรกของการเก็บรักษา และเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 5 และ 6 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความชื้นข้าวเปลือกสอดคล้องกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศของพื้นที่เก็บรักษา ในขณะที่ความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในเครื่องที่พัฒนาขึ้นไม่แปรตามความชื้นสัมพัทธ์อากาศ เนื่องจากในการทดลองนี้ได้มีการวางเครื่องอบแห้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การสูญเสียความชื้นจากข้าวเปลือกจึงเกิดขึ้นได้เพื่อทำให้เมล็ดข้าวมีความชื้นเข้าใกล้ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) (Grist, 1986) จากข้อมูลความชื้นของข้าวเปลือกและความชื้นสัมพัทธ์อากาศสามารถกล่าวได้ว่า เครื่องที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษาได้ดีกว่าการเก็บในยุ้งฉางของเกษตรกร

Table 1 Percentage of moisture content, relative change of rice paddy and relative humidity during storage

Storage time (Month)	Storage in a traditional granary			Storage in the drying machine		
	Moisture (%)	Relative change (%)	Relative humidity (%)	Moisture (%)	Relative change (%)	Relative humidity (%)
0	9.10 ± 0.06^{b}*	-	65.8 ± 7.0^{b}	11.35 ± 0.09^{a}	-	61.4 ± 6.5^{d}
1	8.29 ± 0.07^{e}*	-8.85 ± 0.78^{e}	60.6 ± 7.4^{c}	9.25 ± 0.03^{b}	-18.55 ± 0.23^{a}	66.5 ± 7.7^{c}
2	8.73 ± 0.04^{d}	-4.04 ± 0.40^{d}	60.8 ± 5.4^{c}	8.76 ± 0.03^{c}	-22.83 ± 0.30^{b}	62.0 ± 10.2^{d}
3	8.25 ± 0.09^{e}	-9.33 ± 0.94^{e}	59.1 ± 5.8^{bc}	8.33 ± 0.05^{f}	-26.58 ± 0.48^{e}	68.3 ± 4.6^{bc}
4	8.91 ± 0.17^{c}*	-2.01 ± 1.83^{c}	68.4 ± 6.8^{b}	8.55 ± 0.05^{d}	-24.66 ± 0.45^{c}	69.2 ± 4.4^{bc}
5	9.21 ± 0.06^{b}*	1.31 ± 0.70^{b}	75.6 ± 7.3^{a}	8.47 ± 0.03^{e}	-25.41 ± 0.24^{d}	70.6 ± 5.9^{b}
6	9.70 ± 0.04^{a}*	6.69 ± 0.47^{a}	73.9 ± 7.3^{a}	8.20 ± 0.06^{g}	-27.80 ± 0.52^{f}	75.2 ± 7.3^{a}

Percentage of relative change is calculated by $[(\%\ \text{Moisture}_{\text{month}_i} - \%\text{Moisture}_{\text{month}_0}) / \%\text{Moisture}_{\text{month}_0}] \times 100$; i = 1, 2, 3, 4, 5 and 6

* Indicate significant difference between % moisture content of rice paddy stored in different conditions at each time point

Mean values with different superscripted letters in each column are significantly different

ปริมาณสารฟีนอลิกรวมของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา

จากผลการทดสอบปริมาณสารฟีนอลิกรวมของข้าวเปลือกพบว่าปริมาณฟีนอลิกของข้าวเปลือกทั้งที่เก็บในยุ้งฉาง และในเครื่องที่พัฒนาขึ้นลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยข้าวเปลือกที่เก็บรักษานาน 6 เดือนในยุ้งฉาง มีปริมาณสารฟีนอลิกรวมลดลงร้อยละ 40.54 ในขณะที่ข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีปริมาณสารฟีนอลิกรวมลดลงร้อยละ 38.73 โดยการลดลงของปริมาณสารฟีนอลิกรวมในข้าวเปลือกจากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาในที่ศึกษาปริมาณสารฟีนอลิกรวมในข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37°C นาน 6 เดือน (Zhou et al., 2004) และงานวิจัยในข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่พบว่าตัวอย่างข้าวกล้องที่ผ่านการทำแห้งและบรรจุในถุง Nylon/LLDPE ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28-35°C) เป็นเวลา 12 เดือน ก็มีปริมาณสารฟีนอลิกรวมลดลง (ณัฐินี, 2551) เนื่องจากมีออกซิเจนในอากาศซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารฟีนอลิก (Chaaban et al., 2017)

สารอะฟลาทอกซินของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา

จากการวิเคราะห์การปนเปื้อนสารอะฟลาทอกซินในข้าวระหว่างการเก็บรักษา พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในยุ้งฉางและในเครื่องที่พัฒนาขึ้น ไม่มีการปนเปื้อนของสารอะฟลาทอกซินทั้งชนิดบี 1 บี 2 จี 1 และจี 2 ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการลดความชื้นและการเก็บรักษาข้าวเปลือก ความชื้นของข้าวเปลือกอยู่ในระดับที่ปลอดภัยที่เชื้อราไม่สามารถเจริญเติบโตและสร้างสารพิษได้ จากงานวิจัยของ Paterson and Lima (2010) และ Mannaa et al., (2017) กล่าวว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Aspergillus* ที่สามารถสร้างสารอะฟลาทอกซินได้ อยู่ที่ 26-37 องซาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ร้อยละ 85 และมีความชื้นของข้าวเปลือกอยู่ที่ร้อยละ 18 แต่อย่างไรก็ตามจากความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บในยุ้งฉางที่มีความชื้นไม่สม่ำเสมอและแปรผันตามความชื้น

สัมพัทธ์อากาศอาจจะทำให้เกิดความเสี่ยงในการเจริญของเชื้อราได้ ดังนั้นความสม่ำเสมอของการรักษาความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาด้วยเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นน่าจะลดโอกาสเสี่ยงในการเจริญของเชื้อราได้มากกว่า

Table 2 Total phenolic content of rice during storage

Storage time (Month)	TPC (mg GAE/g sample (d.b.))	
	Storage in a traditional granary	Storage in the drying machine
0	1.06 ± 0.06^{a}*	0.85 ± 0.08^{a}
1	0.89 ± 0.07^{a}*	0.64 ± 0.07^{c}
2	0.54 ± 0.01^{c}*	0.72 ± 0.08^{b}
3	0.54 ± 0.11^{c}	0.46 ± 0.07^{d}
4	0.62 ± 0.06^{b}*	0.47 ± 0.04^{d}
5	0.74 ± 0.07^{b}*	0.52 ± 0.06^{d}
6	0.63 ± 0.04^{b}	0.52 ± 0.06^{d}

* Indicate significant difference between % moisture content of rice paddy stored in different conditions at each time point

Mean values with different superscripted letters in each column are significantly different

สรุป

การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการควบคุมคุณภาพและความปลอดภัยของผลผลิตทางการเกษตร โดยการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวด้านการลดความชื้น และการรักษาระดับความชื้นของข้าวเปลือกเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพด้านเคมี และความปลอดภัยของข้าว จากงานวิจัยนี้พบว่าเครื่องทำแห้งที่ควบคุมการไหลของอากาศแวดล้อม ที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ต่อเนื่องและสม่ำเสมอกว่าการลดความชื้นด้วยการตากด้วยแสงอาทิตย์ โดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกลงต่ำกว่าร้อยละ 12 ได้ภายใน 8 ชั่วโมง

เครื่องที่พัฒนาขึ้นยังสามารถใช้ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกได้โดยสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่การเก็บข้าวเปลือกในยุ้งฉางจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นตามสภาพความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ข้าวเปลือกที่เก็บรักษาใน 2 วิธีการไม่พบสารอะฟลาทอกซิน แต่ไม่สามารถรักษาปริมาณสารฟีนอลิกรวมในข้าวได้ อย่างไรก็ตามเครื่องอบลมด้วยอากาศแวดล้อม จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อขยายขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งานของเกษตรกร ซึ่งสามารถใช้ชะลดการจำหน่ายข้าวในช่วงราคาตกต่ำได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย และภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ณัฐินี ตั้งศรีอนุกูล. 2551. ผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง *Oryza sativa* L. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล. 2562. วิธีการควบคุมความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์ข้อมูลข้าวตลาดเฉพาะ. ม.ป.ป. มาตรฐานสากลของข้าวอินทรีย์ไทย. https://www.thairicedb.com/standard-detail.php?id=9, 9 กุมภาพันธ์ 2564.

ศูนย์ภูมิอากาศ, กรมอุตุนิยมวิทยา. 2563. รายงานผลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรุงเทพมหานครของเดือนมกราคม พ.ศ. 2563 ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563.

สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2558. แผนยุทธศาสตร์กรมการข้าว พ.ศ. 2558–2562. http://www.ricethailand.go.th/web/images/pdf/Yutta.pdf, 9 กุมภาพันธ์ 2564.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, เพชรา ปรีชากุล. 2533. การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบในถังเก็บและแบบเป็นงวด: คุณภาพผลิตภัณฑ์. วารสารวิทยาสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ 24: 367–377.

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. 2555a. องค์ความรู้เรื่องข้าว วิทยาการก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวข้าว. สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=3-5.htm, 9 กุมภาพันธ์ 2564.

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. 2555b. องค์ความรู้เรื่องข้าว การผลิตข้าวอินทรีย์. สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=4-2.htm, 9 กุมภาพันธ์ 2564.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of the AOAC, 18th ed. The Association of the official Analysis Chemists. Washington, DC, USA.

AOAC Method 991.31. 2002. Official Methods of Analysis of the AOAC (18th ed.). Washington, D.C.: The Association of the official Analysis Chemists.

Chaaban, H., Ioannou, I., Paris, C., Charbonnel, C., Ghoul, M. 2017. The photostability of flavanones, flavonols and flavones and evolution of their antioxidant activity. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 336: 131–139.

Grist, D.H. 1986. Rice, 6th ed. Longman group limited. Singapore.

Moongngarm, A., Saetung, N. 2010. Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. Food Chem. 122: 782–788.

Singleton, V.L., Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture 16: 144.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., Blanchard, C. 2004. The distribution of phenolic acids in rice. Food Chem. 87: 401–406.

Effect of hydro-cooling and room-cooling on the quality of melon during storage

Prawesh Pokharel[a], Sasitorn Tongchitpakdee[a,b], Wannee Jirapakkul[a,b,*]
[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
[b]Postharvest Technology Innovation Center, Office of the Higher Education Commission, Bangkok 10400, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: wannee.ch@ku.ac.th

Abstract

Melon is a nutritious fleshy fruit with a relatively short storage life. Texture, appearance, and flavor are some of the key factors determining melon quality. Precooling of melon to 10-15°C after harvest is recommended to maintain quality. Conventional practice in Thailand is room-cooling of melon without precooling. This study was aimed to compare the hydro-cooling (5°C) time of 'orange-fleshed rocky' melon with room-cooling (10°C) and evaluate the effect of hydro-cooling on the quality of melon during storage (10°C, 85% RH). Melon was hydro-cooled with water, ice, and salt as a cooling medium and compared with non-hydro-cooled (room-cooled) melon up to 4 weeks of storage. The hydro-cooling (5°C) was 4 times faster than conventional room-cooling (10°C) to decrease the temperature of melon from 28 ± 2°C to 15°C. Hydro-cooling significantly reduced ($p \leq 0.05$) the weight loss of melon. Pulp firmness and chemical properties (total soluble solids and titratable acidity) of hydro-cooled melon were higher than room-cooled melon during storage. However, there was no significant effect of hydro-cooling on the pH and ascorbic acid content of the fruit ($p > 0.05$). In terms of appearance and decay percentage, the hydro-cooled melon was better than the room-cooled melon which suggests that hydro-cooling is more effective for maintaining the quality of melon during storage.

Keywords: Fruit quality, Hydro-cooling, Melon, Postharvest, Precooling

Introduction

Melon (*Cucumis melo* L.*)* is one of the most popular fruits worldwide and is the fifth most important fruit in the world in terms of production (Wu et al., 2019). It is a nutritious fruit having refreshing and tasty flesh with a pleasant aroma. Melon is rich in ascorbic acid, carotene, folic acid, and potassium as well as high in antioxidant, and anti-inflammatory properties and low in fat and sodium (Bianchi et al., 2016). Thailand is popular in the production of tropical fruits like melon however, these horticultural crops have a high loss because of poor postharvest treatment and handling. Some researchers estimated that about 25% of fresh fruit production is lost after harvest (Techawongstien, 2006). Melon fruits have more than 90% water content, high respiration rate, and short shelf life. They are highly perishable due to the biochemical reactions involved in metabolism, infection of pathogens, and storage conditions. Texture, appearance, and flavor are some of the key factors determining melon quality. Flesh softening is one major issue limiting the quality, acceptability, and shelf-life of melon during storage (Supapvanich et al., 2011).

Temperature is one of the most important factors affecting the postharvest life of fruits. The respiratory activity and senescence of fruit, as well as ethylene production, are influenced to a large extent by the temperature of the product. Thus, precooling which rapidly removes field heat from freshly harvested fruits is an important postharvest unit operation. Due to precooling, metabolic activity of the fruit, consequently, respiration rate and ethylene production are decreased significantly. This also reduces ripening rate, water loss, microbial activity, and decay, thus helps in preserving the quality of fruit (Azam et al., 2015). Forced air cooling, hydro-cooling, vacuum-cooling, top icing, and room-cooling are different methods applied for precooling of the fruits to the safe storage temperature. Room-cooling involves placing the warm crop in a refrigerated room for several hours or days, the rate of cooling is slow and there is high moisture loss from the commodity. Hydro-cooling is considered as one of the best methods that could quickly remove field heat through the intimate contact of the fruit with the cold water which is known to have excellent heat conduction (Cortbaoui, 2005).

'Orange-fleshed rocky' melon (*Cucumis melo* L. var. *reticulatus*) is grown commercially in Thailand. Precooling of melon to 10-15°C after harvest is recommended to maintain quality. Conventional practice in Thailand is room-cooling of melon without precooling. This study was aimed to compare the hydro-cooling (5°C) time of 'orange-fleshed rocky' melon with room-cooling (10°C) and evaluate the effect of hydro-cooling on the quality of melon during storage at 10°C and 85% relative humidity.

Material and Methods

Sample collection

'Orange-fleshed rocky' melons with fully netted rind, uniform in size, weight (1.9-2.6 kg) and free from major defects (decay, cracking, or absence of stem) were collected immediately after harvest from the 'Navita' farm situated in the Phra Nakhon Si Ayutthaya province of Thailand.

Experimental treatment

Thirty fruits were randomly divided into two treatment groups. Four random fruits were penetrated with thermocouples for recording cooling temperature by using a data logger. The first group was hydro-cooled by immersing melon fruits in the cold water at 5°C, maintained by the addition of ice and table salt. The ratio of water, ice, and salt was 73:25:2. Water temperature was also continuously monitored (±1°C). Fruits were submerged in the cold water until the core temperature decreased to 15°C. After hydro-cooling water was drained from the fruits and the fruits were made dry. The second group of melons was placed in the cold room at 10°C. To determine the cooling time of melon in room-cooling fruits were cooled until the core temperature decreased to 15°C. Both sets of fruits were stored in the cold room at 10°C with 85% relative humidity (RH) for four weeks. Fruit parameters were measured every week for up to four weeks until the fruit started to spoil.

Measurement of fruit responses

The physiological loss in weight of fruits was calculated on the initial weight basis as reported by Jawandha et al. (2016). The percent loss in weight (PLW%) after each storage interval was calculated by using Equation 1:

$$\text{PLW } \% = \frac{\text{Initial weight of sample} - \text{Weight of sample after storage}}{\text{Initial weight of sample}} \text{ X } 100 \ \% \qquad (1)$$

The firmness of the pulp was determined by the method reported by Portela and Cantwell (2001) with slight modification. Texture Analyzer TA XT Plus (Texture Technologies Corp., USA) equipped with 50 kg load cell was used for measurement. The fruit was cut transversely in half and an equatorial slice with a 2 cm thickness was made. A 6-mm diameter flat-headed cylindrical probe was moved down into the pulp to determine maximum rupture force at a velocity of 1 mm sec^{-1} to a final depth of 6 mm.

Total soluble solids of melon was measured by a hand refractometer (Atago, Japan) with a range of Brix 0-33% (least count 0.2%). The pH of the pulp was measured by a digital glass electrode pH meter (Mettler-Toledo, Thailand). Titratable acidity was determined by titration with 0.1N NaOH and phenolphthalein as an indicator following the method of Ranganna (1986). Ascorbic acid content was analyzed by titration method using 2, 6-dichlorophenol indophenol dye according to Ranganna (1986). Decay percentage was calculated by measuring the surface area of the decayed rind of the whole fruit.

Experimental design and statistical analysis

The experiment was conducted in a completely randomized 2×5 factorial design (2 levels of cooling treatment × 5 levels of storage time) with two replications. Data were analyzed by analysis of variance (ANOVA) and independent sample t-test at the 5% level of significance using IBM SPSS Statistic version 23.

Result and Discussion

Cooling time

Fig. 1 shows the change in fruit temperature of melon during hydro-cooling (5°C) and room-cooling (10°C). It took 2 hours for hydro-cooling and 8 hours for room-cooling to reduce the temperature of melon fruit from 28 ± 2°C to 15°C. The transmission of heat from solid to liquid is faster than the transmission of heat from solid to gas. Hence, cooling fruits by contact with cooled water is much faster than cooling by air. The result is in accordance with the work of Brackmann et al. (2011) on precooling of 'Hy Mark' melon where hydro-cooling was faster than room-cooling and forced air cooling to decrease the temperature of melon up to 8°C.

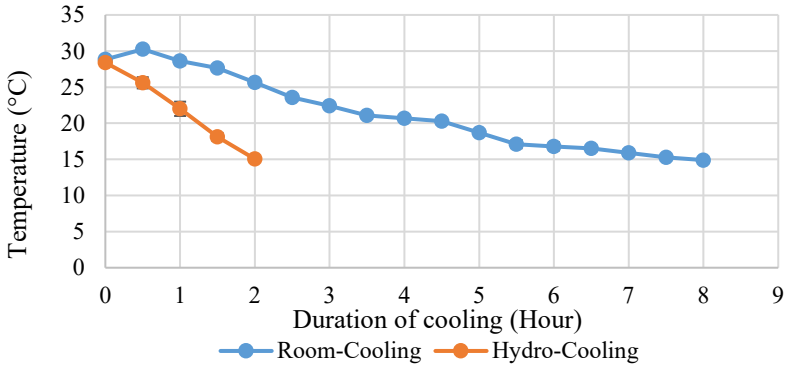


Fig. 1 Melon fruit temperature during room and hydro-cooling treatments

Percentage of weight loss

The weight loss was affected by cooling treatment. The result showed that hydro-cooled melons had significantly lower ($p \leq 0.05$) weight loss on the corresponding storage days compared to the room-cooled fruits. The percentage of weight loss of hydro-cooled melon was significantly lower ($p \leq 0.05$) than the room-cooled melon on the 7th day of storage (Fig. 2A). Similar results were found in cashew apple (Sena et al., 2019) and peach fruit (Jawandha et al., 2016) where hydro-cooling reduced the percentage of weight loss of fresh fruits compared to non-hydro-cooled fruits.

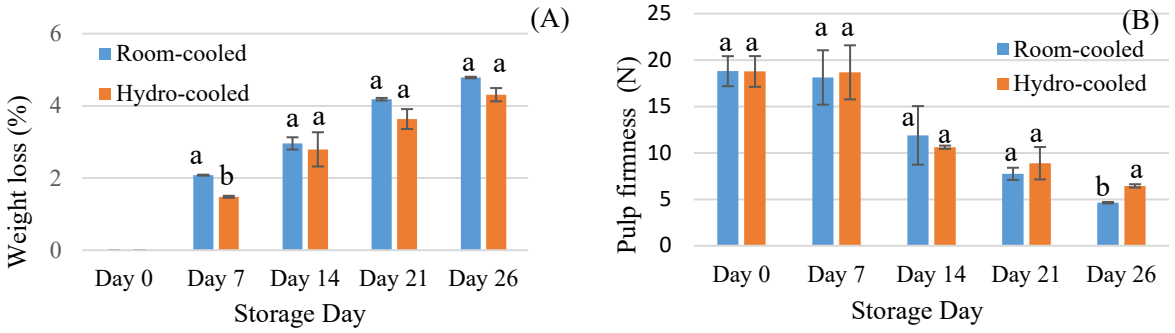


Fig. 2 (A) Weight loss and (B) pulp firmness of melon fruit after room-cooling and hydro-cooling were applied and stored at 10°C for up to 26 days.
[a-b]Means of different treatments within the same days of storage followed by the different letters are significantly different at $p \leq 0.05$.

Transpiration and respiration are the main causes of water loss, thereby loss of weight of fruits after harvest. This is because of the difference in vapor pressure between fruit and the surroundings (Wills and Golding, 2016). Hydro-cooling decreases the vapor pressure deficit between the fruit and the surrounding air and thus causes a reduction in the rate of water loss from the fruit (Nampan et al., 2006). Weight loss is an important characteristic related to the quality of the melon. It also has an economic significance since melons are sold by weight.

Pulp firmness

Pulp firmness was higher in hydro-cooled melon compared to room-cooled fruit. The pulp firmness started to decrease after the first week of storage and loss of firmness was higher in the second week. After the third week, the hydro-cooled melon had higher pulp firmness than the room-cooled melon and significantly higher ($p \leq 0.05$) on the 26th day of storage (Fig. 2B). A similar result was found by Aroucha et al. (2016) during the conservation of Torreon hybrid cantaloupe in which hydro-cooled cantaloupes retained greater firmness than non-hydro-cooled fruits. Sena et al. (2019) reported that firmness loss was much lower in hydro-cooled cashew apples than room-cooled fruits after the 25th day.

Water loss and due to that loss of turgor pressure of the cell could be the main factor of firmness loss in non-hydro-cooled melon. Hydro-cooling maintains the turgor pressure and elasticity of the fruit cell wall by preventing the loss of water by rapidly decreasing the temperature of the fruit (Zainal et al., 2019). Brackmann et al. (2011) reported that delayed cooling in 24 hours caused a significant loss of firmness of the 'Hy Mark' melon after storage.

Total soluble solids content (TSS)

Hydro-cooled melon had significantly higher ($p \leq 0.05$) total soluble solids (TSS) than room-cooled melon during storage. TSS of pulp was decreased during storage (Fig. 3A). The loss of soluble solid was significantly lower ($p \leq 0.05$) in hydro-cooled melon than room-cooled melon on the 7th day. A similar result was reported by Aroucha et al. (2016) that hydro-cooled cantaloupe had significantly higher TSS than non-hydro-cooled fruit. Sugar content in melons usually decreases after harvest due to the lack of storage carbohydrates to be hydrolyzed into simple sugars (Saltveit, 2011). If the melons are cooled to 10°C-15°C immediately after harvest, sugar loss will be lowered to approximately one-fourth of what it would have been if the melons had not been cooled (Junge et al., 1986).

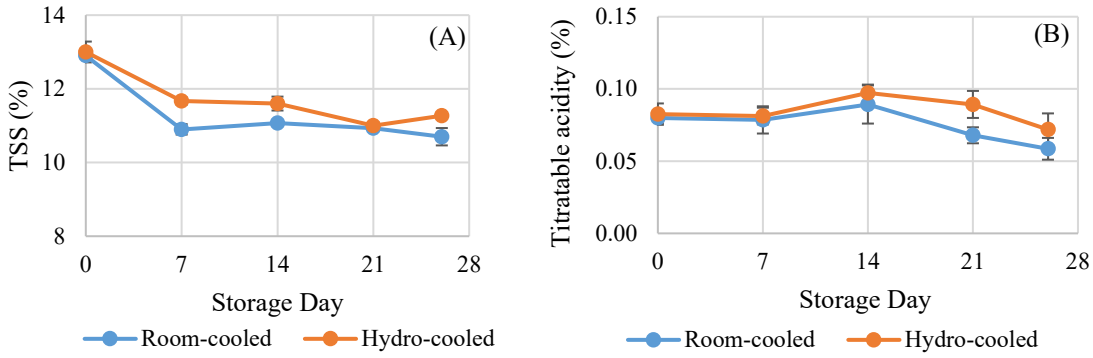


Fig. 3 (A) Total soluble solids and (B) titratable acidity of melon fruit after room-cooling and hydro-cooling were applied and stored at 10°C for up to 26 days.

Titratable acidity and pH

The titratable acidity (TA) of hydro-cooled melon was significantly higher ($p \leq 0.05$) than room-cooled melon during storage. The titratable acidity was started to decrease after the second week (Fig. 3B). After harvest, the concentration of organic acids tends to decline in most fruits due to intensive use of these compounds as respiratory substrate (Aroucha et al., 2016). The result is in agreement with the result of Liang et al. (2013) that hydro-cooling reduced respiration and maintained higher TA of litchi. Sena et al. (2019) and Jawandha et al. (2016) reported that hydro-cooling maintained the titratable acidity of fruits compared to non-hydro-cooled fruits. There was no significant effect ($p > 0.05$) of cooling treatment and storage on the pH of melon (Fig. 4A). Zainal et al. (2019) found a similar result that the pH of fruit pulp was not affected by hydro-cooling treatment of rockmelon.

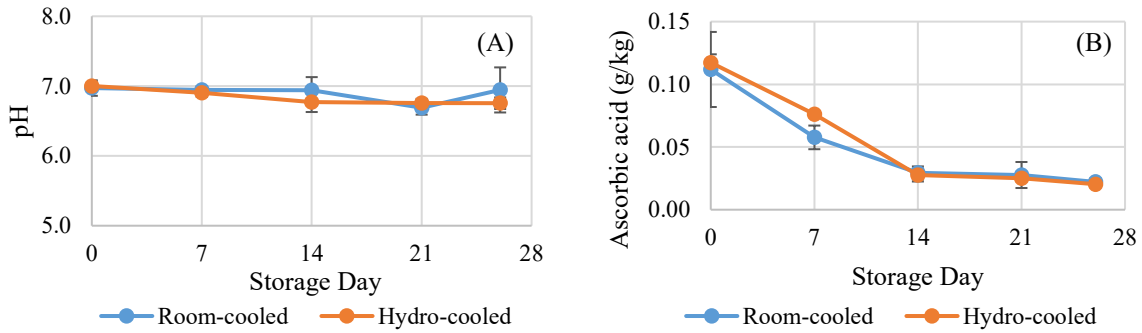


Fig. 4 (A) pH and (B) ascorbic acid content of melon fruit after room-cooling and hydro-cooling were applied and stored at 10°C for up to 26 days.

Ascorbic acid

There was no significant effect ($p > 0.05$) of cooling treatment on ascorbic acid of melon. The loss of ascorbic acid was higher in the first and second weeks of storage (Fig. 4B). The result showed that hydro-cooling treatment was not able to maintain the loss of ascorbic acid during storage except in the first week compared to room-cooling. The result is in agreement with the work of Zainal et al. (2019) in which the ascorbic acid content was not affected by different hydro-cooling treatments as hydro-cooling did not appear to prevent ascorbic acid degradation of rockmelon with a long cold storage period.

Appearance and decay

In terms of appearance, the hydro-cooled melon was better than the room-cooled melon during storage. The peduncle and rind of hydro-cooled melon were greener in appearance than room-cooled melon. Signs of decay as soft water-soaked spots and sunken areas on the rind were seen from the 3rd week of storage (Fig. 5). The percentage decay area of rind was higher in room-cooled melon than hydro-cooled melon in the 3rd and 4th week. Room-cooled melon had 4.7% decay area on the rind while hydro-cooled melon had 2.1% decay area on the 21st day. The percentage decay area was increased to 13.9% and 6.0% respectively on the 26th day. A similar result was reported by Sena et al. (2019) that hydro-cooling, by rapidly removing field heat and reducing metabolic rate, was effective in reducing the spoilage of cashew apple fruit compared to room-cooling.

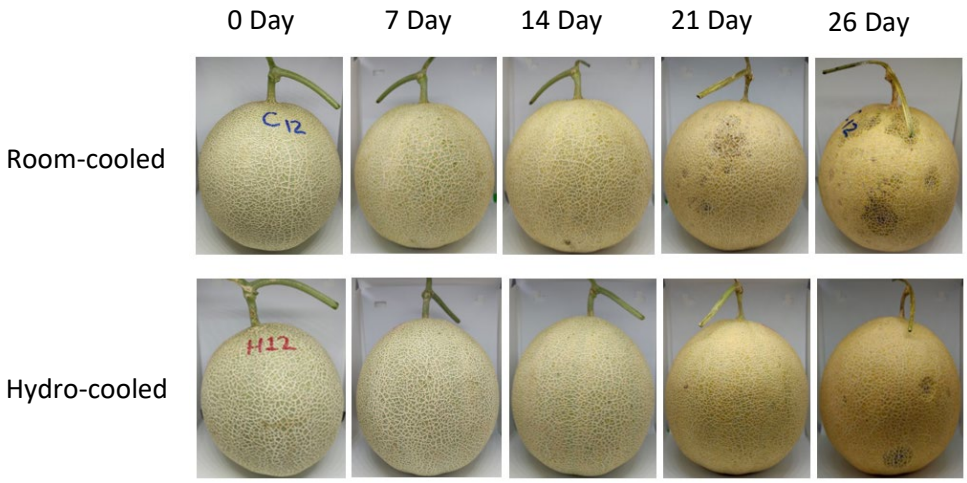


Fig. 5 The appearance of melon fruit after room-cooling and hydro-cooling were applied and stored at 10°C for up to 26 days.

Conclusion

Hydro-cooling was faster than room-cooling in reducing the post-harvest temperature of melon. The treatment was more effective to minimize the weight loss of melon during subsequent storage compared to room-cooling. Hydro-cooling was able to maintain the total soluble solids, titratable acidity, and pulp firmness of melon. However, it could not prevent the loss of ascorbic acid content of melon during a long storage period. Hydro-cooling can be applied as a suitable precooling technique to maintain the quality of melon during postharvest storage since it can slow down metabolism and reduce deterioration.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgments

The authors would like to express sincere gratitude to the National Research Council of Thailand (NRCT) for funding support and also wish to thank Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, and Thailand International Co-Operation Agency (TICA).

References

Aroucha, E.M.M., Araujo, J.M.M.D., Nunes, G.H.D.S., Negreiros, M.Z.D., Paiva C.A.D., Souza, M.S.D. 2016. Cantaloupe melon (*Cucumis melo* L.) conservation using hydrocooling. Revista Ceres. 63: 191–197.

Azam, M., Eissa, A., Hassan, A. 2015. Monitoring of change in cantaloupe fruit quality under pre-cooling and storage treatments. Journal of Food Processing & Technology. 6: 1–6.

Bianchi, T., Guerrero, L., Gratacós-Cubarsí, M., Claret, A., Argyris, J., Garcia-Mas, J., Hortós, M. 2016. Textural properties of different melon (*Cucumis melo* L.) fruit types: Sensory and physical-chemical evaluation. Sci. Hortic. 201: 46–56.

Brackmann, A., Oliveira Anese, R.D., Giehl, R.F.H., Weber, A., Eisermann, A.C., Sestari, I. 2011. Pré-resfriamento para conservação pós-colheita de melões cantaloupe 'Hy mark'. Bragantia. 70: 672–676.

Cortbaoui, P. 2005. Assessment of Precooling Technologies for Sweet Corn. McGill University Montreal.

Jawandha, S., Singh, H., Kaur, K., Arora, A. 2016. Effect of pre-cooling on storage behaviour of peach fruit. Ecology, Environment and Conservation 22 (April Suppl.): S311–S315.

Junge, K., Weimar, M., Blanton, D., Hayenga, M., Gladon, R. 1986. Precooling methods for commercial vegetable producers. Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1158&context=econ_las_staffpapers

Liang, Y.S., Wongmetha, O., Wu, P.S., Ke, L.S. 2013. Influence of hydrocooling on browning and quality of litchi cultivar Feizixiao during storage. Int. J. Refrig. 36: 1173–1179.

Nampan, K., Techavuthiporn, C., Kanlayanarat, S. 2006. Hydrocooling improves quality and storage life of 'Rong-rein' rambutan (*Nephellium lappaceum* L.) fruit. Acta hortic. 712: 763–770. doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.712.98

Portela, S., Cantwell, M. 2001. Cutting blade sharpness affects appearance and other quality attributes of fresh-cut cantaloupe melon. J. Food Sci. 66: 1265–1270.

Ranganna, S. 1986. Handbook of Analysis and Quality Control for Fruit and Vegetable products. Tata McGraw-Hill Education.

Saltveit, M.E. 2011. Melon (*Cucumis melo* L.), p. 31–45. *In*, eds. Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. Woodhead Publishing Limited.

Sena, E.d.O.A., da Silva, P.S.O., de Araujo, H.G.S., de Aragão Batista, M.C., Matos, P.N., Sargent, S.A., de Oliveira Junior, L.F.G., Carnelossi, M.A.G. 2019. Postharvest quality of cashew apple after hydrocooling and cold room. Postharvest Biol. Tec. 155: 65–71.

Supapvanich, S., Boon-Lha, K., Mhernmee, N. 2011. Quality attribute changes in intact and fresh-cut honeydew melon (*Cucumis melo* var. *inodorus*) cv. 'Honey world' during storage. Kasetsart J. (Nat. Sci.) 45: 874–882.

Techawongstien, S. 2006. Postharvest Management of Fruit and Vegetables in the Asia-Pacific Region. Asian Productivity Organization

Wills, R., Golding, J. 2016. Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit and Vegetables. UNSW Press.

Wu, Z., Tu, M., Yang, X., Xu, J., Yu, Z. 2019. Effect of cutting on the reactive oxygen species accumulation and energy change in postharvest melon fruit during storage. Sci. Hortic. 257: 1–11.

Zainal, B., Ding, P., Ismail, I.S., Saari, N. 2019. Physico-chemical and microstructural characteristics during postharvest storage of hydrocooled rockmelon (*Cucumis melo* L. *reticulatus* cv. Glamour). Postharvest Biol. Tec. 152: 89–99.

การสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติสำหรับผู้หญิงอายุ 50 ปีขึ้นไป

The survey for behavior and demand of women over 50 years of age for facial serum containing natural ingredients extract

ลาภิน หงษ์คำดี[a], หทัยรัตน์ ริมคีรี[a]*, สุพนิดา วินิจฉัย[b]

Lapin Hongkumdee[a], Hathairat Rimkeeree[a]*, Supanida Winitchai[b]

[a]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Product Development, Faculty of Agro - Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติ โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้น ผลการสัมภาษณ์นำมาสร้างแผนภาพลำดับขั้น เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะ ผลที่ได้รับและคุณค่าที่ได้จากผลิตภัณฑ์ โดยใช้กลุ่มผู้บริโภคเพศหญิง อายุ 50 ปีขึ้นไป จำนวน 30 คน พบว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติเพราะมีความปลอดภัย สำหรับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคชอบ คือ เนื้อเซรั่มมีลักษณะซึมเข้าสู่ผิวง่าย เนื้อสัมผัสมีความบางเบาและคุณลักษณะที่ผู้บริโภคต้องการมากที่สุด คือ เนื้อเซรั่มมีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์สูง สำหรับผลที่ได้รับ คือ ไม่เหนอะหนะผิว ผิวไม่แพ้ เห็นผลชัดเจนและคุณค่าที่ผู้บริโภคได้รับจากผลิตภัณฑ์เซรั่ม คือ สุขภาพผิวดีขึ้นและรู้สึกมั่นใจ นอกจากนี้ผู้บริโภคยังมีข้อเสนอแนะให้มีการใช้บรรจุภัณฑ์ที่สามารถนำเซรั่มออกมาใช้ได้หมด มีการนำสารสกัดจากธรรมชาติชนิดใหม่ๆ มาใช้และผลิตภัณฑ์มีราคาที่ถูกลง

คำสำคัญ: การสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้น, เซรั่มบำรุงผิวหน้า, แผนภาพลำดับขั้น, สารสกัดจากธรรมชาติ

Abstract

The aim of this research was to study behavior and demand of consumers for facial serum containing natural ingredients. The research started with survey of consumer behaviors and demands by laddering interview. The results were transformed to the hierarchical value map, a graphic description that interprets the relationship between attribute, consequence, and value of the product. The interviews were conducted with 30 female consumers (50 years and over). The results showed that consumers select natural product because natural product is safe. For attributes, consumers prefer attributes of easy to absorb into the skin and soft texture. The attribute that most consumers required was high concentration of active ingredients. The relationships with consequence are non - sticky to skin, no irritation to skin, and the results are obviously perceived. The value that the consumers appreciated for the product were improving skin health and making self - confidence. In addition, consumers suggested the use of packaging that easy to disperse the last bits of the product, contain new natural ingredients, and a lower price.

Keywords: facial serum, hierarchical value map, laddering interview, natural ingredient extract

คำนำ

เครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติ (natural cosmetic) คือ เครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของสารสกัดที่ได้จากพืช ผัก ดอกไม้ หรือแร่ธาตุ ในการระบุบนฉลากสามารถแบ่งได้ตามสัดส่วนของส่วนประกอบที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Product Association standard in the United States and BDIH European standard for natural) ดังนี้ “100% natural” หมายถึงไม่มีสารสังเคราะห์เป็นส่วนผสมในตำรับ “Natural” หมายถึง ส่วนผสมในตำรับ 95% มีส่วนผสมที่ได้จากธรรมชาติ ปราศจากสารเคมีต้องห้ามและอีก 5% ที่เหลือสามารถใช้สารสังเคราะห์ได้ “Made with natural ingredients” หมายถึงมีส่วนผสมจากธรรมชาติระหว่าง 70 – 95% และปราศจากสารเคมีต้องห้ามและในกรณีที่มีส่วนผสมจากธรรมชาติน้อยกว่า 70% จะไม่สามารถระบุบนฉลากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมจากธรรมชาติ แต่สามารถระบุชนิดของส่วนผสมที่ได้จากธรรมชาติได้ (Darrin, 2011) สำหรับการผลิตส่วนมากมักได้จากการผลิตแบบสภาวะธรรมชาติ (conventional condition) รวมถึงไม่จำเป็นต้องใช้เกณฑ์การผลิตแบบออร์แกนิกเสมอไป (organic production) และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องสำอางออร์แกนิก (organic cosmetic) พบว่ามีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณของส่วนผสมที่ได้มาจากธรรมชาติ โดยเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมจากสารสกัดจากธรรมชาติอาจมีส่วนผสมของสารสังเคราะห์ (synthetic raw materials) หรือสารกึ่งสังเคราะห์ (semisynthetic raw materials) ในสูตร (Fonseca – Santos et al., 2015) สำหรับประโยชน์ของเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติ คือ เครื่องสำอางนั้นมีวัตถุดิบบริสุทธิ์มากกว่าเครื่องสำอางทั่วไปรวมถึงทำให้เกิดการตกค้างจากสารเคมีอันตรายต่อโลกลดลงและเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่บริษัทที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีจำนวนเพิ่มขึ้น (Chen, 2009) สำหรับผลิตภัณฑ์เซรั่มที่ศึกษาจัดอยู่ในกลุ่มของผลิตภัณฑ์ 100% natural, Natural, Made with natural ingredients และผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมจากธรรมชาติน้อยกว่า 70% ด้วย

ผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิว คือ ผลิตภัณฑ์ดูแลผิวที่มีลักษณะเป็นเจล หรือ ครีมที่มีความบางเบา มีคุณสมบัติเป็นมอยเจอร์ไรเซอร์ (moisturizer) และสามารถนำส่งสารออกฤทธิ์เข้าสู่ผิวได้อย่างล้ำลึก ผลิตภัณฑ์เซรั่มที่ดีควรทำให้ผิวกระชับขึ้น (firmer skin) ผิวเรียบเนียน (smoother skin texture) สามารถกระชับรูขุมขนให้เล็กลง (smaller skin pores) และสามารถเพิ่มความชุ่มชื้นให้แก่ผิวได้ (Ojha et al., 2019)

แนวโน้มของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางในผู้สูงอายุ โดยองค์การสหประชาชาติได้มีคำนิยามที่เกี่ยวข้องกับสังคมผู้สูงอายุว่าหากประเทศที่มีประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไป โดยมีสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 10.0 หรือมีประชากรอายุ 65 ปีขึ้นไป โดยมีสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 7.0 ของจำนวนประชากรในประเทศทั้งหมด หมายถึงประเทศมีการก้าวสู่สังคมผู้สูงอายุ สำหรับประเทศไทยได้มีคำนิยามที่เกี่ยวข้องกับสังคมผู้สูงอายุ คือ ประชากรที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปและแนวโน้มของประชากรไทยในช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2557 – 2576) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในกลุ่มประชากรผู้สูงอายุจาก 68.1 ล้านคน เพิ่มขึ้นเป็น 73.6 ล้านคน (สามารถ, 2562) และด้วยเหตุผลนี้ผู้ทำการวิจัยจึงสนใจพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติสำหรับผู้หญิงอายุ 50 ปีขึ้นไป

การสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้น (laddering interview) เป็นการสัมภาษณ์โดยอาศัยทฤษฎีลำดับขั้นทางจิตวิทยา (Means-end chains) ที่ช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างผู้บริโภคและผลิตภัณฑ์ ในการสัมภาษณ์มักจะใช้คำถามว่า “ทำไม” และ “อย่างไร” เพื่อเป็นการขยายคำตอบให้ได้ข้อมูลอย่างลึกซึ้ง ข้อมูลที่ได้จากผู้บริโภคเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพและมักจะใช้แผนภาพลำดับขั้น (hierarchical value map) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะ (attribute) ผลที่ได้รับ (consequence) และคุณค่า (value) (Klaus et al., 2000)

การทำวิจัยครั้งนี้เริ่มต้นจากการสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติ โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้น เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะ ผลที่ได้รับและคุณค่าของผลิตภัณฑ์ และเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างแบบสอบถามเพื่อสำรวจความต้องการของผู้บริโภคต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้น

กลุ่มประชากรที่ใช้ในการสัมภาษณ์ คือ เพศหญิง ช่วงอายุ 50 ปีขึ้นไป จำนวน 30 คน โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกผู้บริโภคใช้การสุ่มแบบเจาะจง (purposive sampling) พิจารณาจากผู้บริโภคที่ใช้ผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมจากธรรมชาติและอาศัยอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร เพื่อความเหมาะสมในการทำวิจัย คำถามที่ใช้เริ่มจาก “เหตุใดจึงเลือกใช้ผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้” “ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นอย่างไร” “เมื่อใช้แล้วผลที่ได้เป็นอย่างไร” และ “มีคุณค่าอย่างไรสำหรับผู้บริโภค” โดยการสัมภาษณ์มีทั้งการสัมภาษณ์โดยตรงและการสนทนาทางโทรศัพท์ การบันทึกข้อมูลทำโดยการบันทึกเสียงและจดบันทึก และรวบรวมข้อมูลเพื่อออกแบบแผนภาพลำดับขั้นที่มีเส้นโยงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะ (attribute) ผลที่ได้รับ (consequence) และคุณค่า (value) (Fig. 1) และเส้นโยงที่หนาหมายถึงเป็นคำตอบที่ได้จากผู้บริโภคส่วนใหญ่ และสำหรับการคัดเลือกข้อมูลที่จะนำมาใส่ในแผนภาพ จะต้องมีความถี่ที่ผ่านการคัดเลือกว่าข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่สำคัญ ด้วยค่า cut off point ที่ 10% ของผู้บริโภคที่สัมภาษณ์ (Klaus et al., 2000)

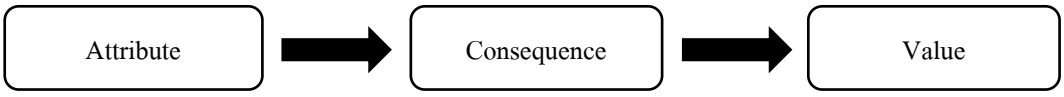


Fig. 1 The relationship between attribute, consequence and value

Source: Loiuse et al., 2015

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้นและทัศนคติของผู้บริโภคเพศหญิงที่มีอายุ 50 ปีขึ้นไปที่มีต่อผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีส่วนประกอบจากธรรมชาติ

จากการสัมภาษณ์เกี่ยวกับพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติของกลุ่มผู้บริโภคอายุ 50 ปีขึ้นไป จำนวน 30 คน ได้ข้อมูลด้านทัศนคติของผู้บริโภค พบว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่มีทัศนคติที่ดีต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติเพราะมีความปลอดภัย ข้อมูลด้านพฤติกรรมของผู้บริโภค คือ มีวัตถุประสงค์ในการใช้เพื่อลดเลือนริ้ว

รอย (n = 26) เพิ่มความชุ่มชื้นให้แก่ผิวหน้า (n = 13) ลดฝ้ากระ (n = 8) และผิวขาวขึ้น (n = 2) สถานที่เลือกซื้อผลิตภัณฑ์ คือ เคาน์เตอร์แบรนด์ (n = 11) ห้างสรรพสินค้า (n = 9) ช่องทางออนไลน์ (n = 8) ร้านความงามและสุขภาพ (n = 2) ความถี่ในการใช้ ใช้ผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าสองครั้งต่อวัน (n = 27) และใช้ผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าหนึ่งครั้งต่อวัน (n = 3) ราคาที่ซื้อต่อครั้ง คือ ราคา 500 – 1,000 บาท (n = 9) ราคา 1,001 -2,000 บาท (n = 8) ราคา 2,001 – 3,000 บาท (n = 4) ราคา 3,001 – 4,000 บาท (n = 3) ราคา 4,001 – 5,000 บาท (n = 3) และราคามากกว่า 5,000 บาท (n = 3) แสดงดัง Table 1

Table 1 Consumer consumption behavior of facial serum containing natural ingredients extract (n = 30)

Consumer consumption behavior	Frequency
Reason of product usage	
- Anti – aging	26
- Moisturizer	13
- Anti-melasma	8
- Whitening	2
Place of purchase cosmetic	
- Counter brand	11
- Shopping mall	9
- Online	8
- Beauty and health store	2
Usage frequency	
- Twice a day	27
- Once a day	3
Total purchase price per time (baht)	
- 500 – 1,000	9
- 1,001 – 2,000	8
- 2,001 – 3,000	4
- 3,001 – 4,000	3
- 4,001 – 5,000	3
- More than 5,000	3

ผลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้น นำมาสร้างแผนภาพลำดับขั้น ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของคุณลักษณะ ผลที่ได้รับและคุณค่าต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติ ซึ่งได้ผลแสดงดัง Table 2 และ Fig. 2

Table 2 Attributes, consequences and value obtained from female consumers (over 50 years of age)

Attributes	Frequency	Consequences	Frequency	Values	Frequency
Easy to absorb into skin	12	Non – sticky	15	Improve skin health	28
		No irritation to skin	11	Self – confidence	8
Soft texture	12	The results are obviously perceived	8	Safe	6
High concentrate of active ingredients	8			Save money	5
		Skin comfort	6	Save time	4
No perfume added	7	Easy to decide for purchase	5		
Natural ingredients	7				
Reasonable price	6	One – step skincare routine	4		
All in one product	4				
No alcohol	3	Absorb to skin quickly	4		
		Better skin	3		

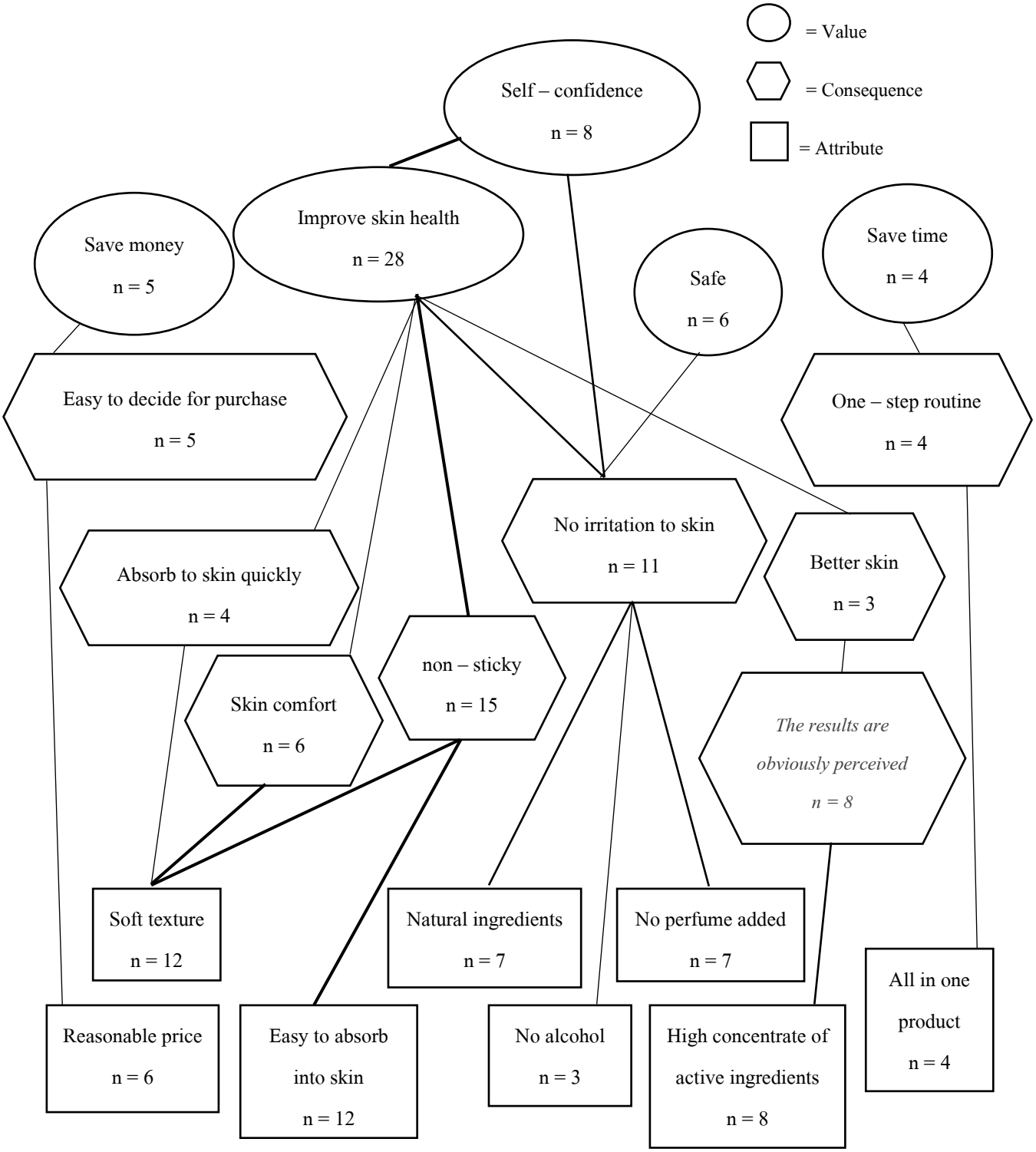


Fig. 2 Hierarchical value map of women consumers (over 50 years of age) (n = 30, cut off point = 3)

จากแผนภาพ Fig. 2 พบว่า คุณลักษณะ (attribute) ของผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติที่ผู้บริโภค เพศหญิง อายุ 50 ปีขึ้นไป ชอบและต้องการเป็นจำนวนมากที่สุด คือ เนื้อเซรั่มมีลักษณะที่ซึมเข้าสู่ผิวง่าย (n = 12) เนื้อสัมผัสมีความบางเบา (n = 12) เนื้อเซรั่มมีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์สูง (n = 8) มีสารสกัดจากธรรมชาติ (n = 7) ไม่ใส่น้ำหอม (n = 7) และราคาสมเหตุสมผล (n = 6) คุณลักษณะที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญพอสมควร คือ ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติที่ครบถ้วนและไม่ใส่แอลกอฮอล์ ผลที่ได้รับ (consequence) ที่เชื่อมโยงกับคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ผู้บริโภคให้คำตอบที่มีจำนวนมากที่สุด คือ เมื่อใช้ผลิตภัณฑ์ที่ซึมเข้าสู่ผิวง่ายและเนื้อสัมผัสมีความบางเบาทำให้ไม่รู้สึกเหนอะหนะผิว (n = 15) มีสารสกัดจากธรรมชาติและไม่ใส่น้ำหอมทำให้ผิวไม่แพ้ (n = 11) เนื้อเซรั่มที่เข้มข้นของสารออกฤทธิ์สูง ทำให้รู้สึกเห็นผลที่ชัดเจน (n = 8) และผลที่ได้รับอื่นๆ ที่เชื่อมโยงกับคุณลักษณะที่ผู้บริโภคให้จำนวนคำตอบรองลงมา คือ สามารถทำให้ตัดสินใจซื้อง่ายขึ้น สามารถใช้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนเดียว ซึมเข้าสู่ผิวรวดเร็วและเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของผิว สำหรับคุณค่า (value) ที่ผู้บริโภคคำนึงถึงและให้คำตอบเป็นจำนวนมากที่สุด คือ เมื่อใช้ผลิตภัณฑ์ที่ซึมเข้าสู่ผิวง่าย เนื้อสัมผัสบางเบา ผิวไม่แพ้ส่งผลดีต่อสุขภาพผิวให้ดีขึ้น (n = 28) รู้สึกมั่นใจมากยิ่งขึ้น (n = 8) และปลอดภัย (n = 6) ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสมเหตุสมผลส่งผลทำให้ประหยัดเงินมากขึ้น (n = 5) และมีคุณสมบัติครบถ้วนส่งผลทำให้ประหยัดเวลาในการใช้ (n = 4) ข้อเสนอแนะที่ผู้บริโภคแนะนำ คือ การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์นั้นควรเป็นลักษณะที่สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกมาใช้ได้ง่าย สามารถใช้ผลิตภัณฑ์ออกมาใช้ได้มากที่สุด ปัญหากับบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้วต้องมีความระมัดระวังขณะใช้และผลิตภัณฑ์ควรมีราคาที่ถูกลง

แนวคิดผลิตภัณฑ์ (Product concept)

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภค โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกรายบุคคลแบบลำดับขั้น นำมาสร้างแนวคิดผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้ ผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติ สำหรับผู้หญิงอายุ 50 ปีขึ้นไป เนื้อเซรั่มซึมเข้าสู่ผิวง่าย มีความบางเบา มีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์สูง ราคาสมเหตุสมผลและไม่แต่งกลิ่น

สรุป

การศึกษาพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากธรรมชาติสำหรับผู้หญิงอายุ 50 ปีขึ้นไป โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์แบบลำดับขั้น พบว่า ผู้บริโภคมีพฤติกรรมและความต้องการต่อผลิตภัณฑ์เซรั่มในทิศทางที่ใกล้เคียงกัน การเชื่อมโยงระหว่างคุณลักษณะ (attribute) ผลที่ได้รับ (consequence) และคุณค่า (value) ทำให้ทราบถึงความคิดและความรู้สึกของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์อีกทั้งยังใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคจะได้รับคุณค่าตามที่คาดหวังกับผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

สามารถ ใจเตี้ย. 2562. การเสริมสร้างสุขภาพสังคมผู้สูงอายุในยุคไทยแลนด์ 4.0. วารสารวิชาการสาธารณสุข: ปีที่ 28, ฉบับเพิ่มเติม 2. 185–194.

Chen, Q. 2009. Evaluate the Effectiveness of the Natural Cosmetic Product Compared to Chemical – Based Product. International Journal of Chemistry 1(2): 57–59.

Darrin, C. D.-S. 2011. The Natural Personal Care Market. Formulating, Packaging, and Marketing of Natural Cosmetic Product, 1st ed. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA. pp. 3–13.

Fonseca – Santos, B. Correa, A.M. Chorilli, M. 2015. Sustainability, natural and organic cosmetics: consumer, products, efficacy, toxicological and regulatory considerations. Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences. Vol.51. n.1: 17–26. doi.org/ 10.1590/ S1984 – 82502015000100002.

Klaus, G. Suzanne, C. Elin, S. 2000. Means – end Chains and Laddering. Understanding consumer decision making, 1st ed. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. Mahwah, New Jersey, USA. pp. 63–90.

Louise, C., Kremer, S., Jager, G., Stelt, J. A., Graaf, C., Gibson, P., Godfrey, J., Lawlor, J.B. 2015. That's why I take my ONS. Mean-end chain as a novel approach to elucidate the personally relevant driving ONS consumption in the nutritionally frail eldery users. Appetite 89: 33–40.

Ojha, S., Sinha, S., Chaudhuri, S.D., Chadha, H., Aggarwal B., Jain, S.M. 2019. Formulation and evaluation of face serum containing bee venom and aloe vera gel. World Journal Pharmaceutical Research 8(2): 1100–1105.

Influence of thermal processing conditions on acrylamide formation in model system and mitigation strategy

Kusumal Hirunwong, 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

Acrylamide is thermally generated toxicant formed in carbohydrate-rich foods during thermal processes. Acrylamide is mainly formed through the Maillard reaction occurred between asparagine in combination with reducing sugar at high temperature. Acrylamide formation and browning were studied in glucose-asparagine model system at three different heating temperatures (100, 130 and 160ºC). Results revealed that no acrylamide was formed at 100ºC, while heating condition at 130ºC produced 0.15 mg/L of acrylamide when the time reached 10 min. When heating at 160ºC, browning and acrylamide formation were both increased with heating time (0-20 min) and 46.93 mg/L is the highest acrylamide level found in the model system. Furthermore, acrylamide is proved as intermediate product of brown pigment that was generated by Maillard reaction and was measured by UV-VIS spectrophotometer at absorbance 294 nm and 420 nm, respectively. Moreover, inhibitory effect of chitosan had been studied for the reduction of acrylamide. Result showed that the addition of 0.25% (w/v) chitosan promoted the reduction of acrylamide formation in the model system up to 75%. Therefore, using of chitosan could be useful as a further mitigation strategy to limit the formation of acrylamide in food.

Keywords: Acrylamide, Chitosan, Maillard reaction, Model system

Introduction

Acrylamide was classified as 'probable human carcinogen' by the International Agency for Research on Cancer (IARC) in since 1994. The potentially carcinogen compound, acrylamide formed in starch-rich foods during high-temperature cooking, like a variety of baked and fried foods cooked at high temperature (Becalski et al., 2016). The European Food Safety Authority (EFSA) reported that acrylamide is found at significant levels in these carbohydrate-rich foods including cracker, French fries, potato chips, sweet taro crisp and sweet potato crisp (Komthong et al., 2012). Acrylamide occur via Maillard reaction which is the reaction between amino acid asparagine and some reducing sugars that yield the intermediate 3-aminopropioamide, schiff base and decarboxylated Amadori under low moisture system (Stadler et al., 2016). Because the food is quite complex, most of the research was initially studied in chemical model system to understand the factors affected the formation of acrylamide.

Investigation of the mitigation strategies is remarkable because of its toxicant (Li et al., 2012). Few researches study the protective effect of chitosan on acrylamide formation by the addition of chitosan into asparagine-glucose model system. The researcher reported that chitosan is a molecule, rich in amino groups which would compete with amino groups of asparagine to bind to carbonyl groups of reducing sugars and inhibit the formation of acrylamide. Low molecular weight chitosan is more effective to reduce acrylamide than high molecular weight chitosan (Chang et al., 2016). Apart from the inhibitory effect on acrylamide, it is important to understand the role of chitosan on Maillard reaction products (MRPs) including intermediate compound and brown pigment. This knowledge would be benefit for food manufacture to further apply chitosan in food to inhibit acrylamide without changing quality attributes of food. Therefore, this research aims to focus on the effects of chitosan on the formation of MRPs and acrylamide inhibition in the asparagine-glucose model system. The study was divided into two parts, the first part focused on effects of heating temperature and time on MRPs and acrylamide formation. Then, the most suitable condition would be selected and applied to study the inhibitory effects on MRPs and acrylamide in the second part.

Materials and Methods

Material

Asparagine, glucose, low molecular weight chitosan and acrylamide were purchased from Sigma Aldrich.

Influence of temperature and time on MRPs and acrylamide formation in model system

An equimolar asparagine/glucose Maillard reaction system was used to investigate the effects of temperature and time on acrylamide formation according to Cai et al. (2014). Each 15-ml test tube contained 2 ml of 1% acetic acid (pH = 6), 0.2 mmol glucose and 0.2 mmol glucose. The test tubes were heated at 100, 130 and 160ºC in oil bath installed with a magnetic stirrer for 0, 5, 10, 15 and 20 minutes. The tube was then removed and immediately immersed in ice water to stop the reaction. After cooling in ice for 10 minutes, the DI water (1 ml) was

added. The final samples were filtered through a 0.45 μm nylon syringe filter and determined for MRPs and acrylamide which are described as follows.

Influence of the addition of chitosan on MRPs and acrylamide formation in model system

The model system was prepared similar as above mentioned by selecting the most suitable condition. Each 15-ml test tube contained 2 ml of 1% acetic acid (pH = 6) with 0.25% chitosan and without chitosan as control. The MRPs and acrylamide determined as following described.

Spectrophotometric analysis of Maillard reaction products (MRPs)

The UV-absorbing intermediates and browning intensity of the MRPs were measured according to the previous methods (Rao et al., 2011). An appropriate dilution was made using distilled water until the absorbance intensity measured below 1 at OD_{294} (UV-absorbing intermediated compounds) and at OD_{420} (brown pigments).

Calculated absorbance values = actual absorbance reading (OD_{294} or OD_{420}) x dilution factor

Measurement of acrylamide

Analyses were performed by HPLC system from Shimadzu, which was composed of SPD-M20A photodiode array detector. Separation of the analyte was performed using an Inertsil ODS-3 C_{18} column. The mobile phase was prepared to contain acetonitrile: water (3.5:96.5, v/v) and was pumped at the rate of 0.5 mL/min and column temperature was set at 25ºC. Injection volume was 10 μL. Detector responses were recorded at 200-nm wavelength (Can et al., 2014). The chromatogram of acrylamide is shown in Fig.1.

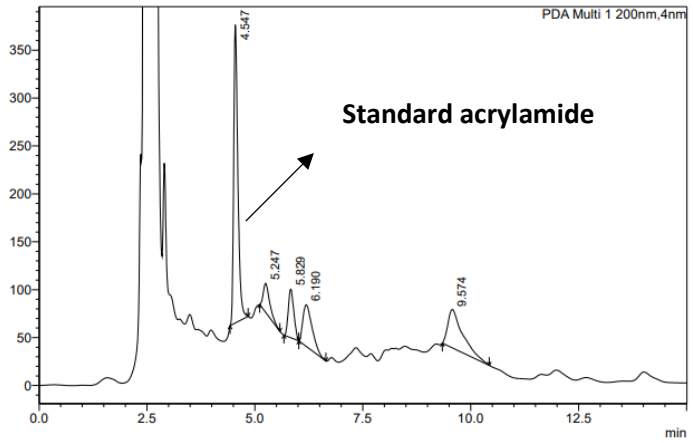


Fig. 1 The chromatogram of acrylamide (t_R = 4.547 minute)

Statistical analysis

A complete randomized design was used in this study. All experiments were performed in duplicate. Statistical analysis was performed using Duncan's multiple range test using the SPSS 25.0 for windows with significance decided at the 95% confidence level.

Results and Discussion

Influence of temperature and time on MRPs and acrylamide formation in model system

The Maillard reaction is the major pathway of acrylamide formation. Not only acrylamide but also the other MRPs including Amadori compound (brown pigment) was formed by the rearrangement of Schiff base that can analyze by using spectrophotometric at OD_{420}. The other intermediate products were measured at OD_{294} (Zhu et al., 2013). In this study, three heating temperature (100, 130 and 160ºC) was used for heating the asparagine-glucose model system; appearance, the MRPs both intermediate products (measured at OD_{294}) and final brown pigments (measured at OD_{420}) and acrylamide level were determined during heating at 0, 5, 10, 15 and 20 minutes. The color and MRPs of each heating condition are shown in Table 1 and Fig. 2. No color and very low MRPs (both intermediate and final brown pigments) were found when heating at 100ºC during 20 min. It is confirmed that the MRPs were related to the temperature and time of heating. More brown color and greater numbers of MRPs both intermediate and brown pigments were found at higher temperature and longer time.

Table 1 The color of asparagine-glucose solution at the different temperature and time of heating

temperature	time (minute)				
	0	5	10	15	20
100ºC					
130ºC					
160ºC					

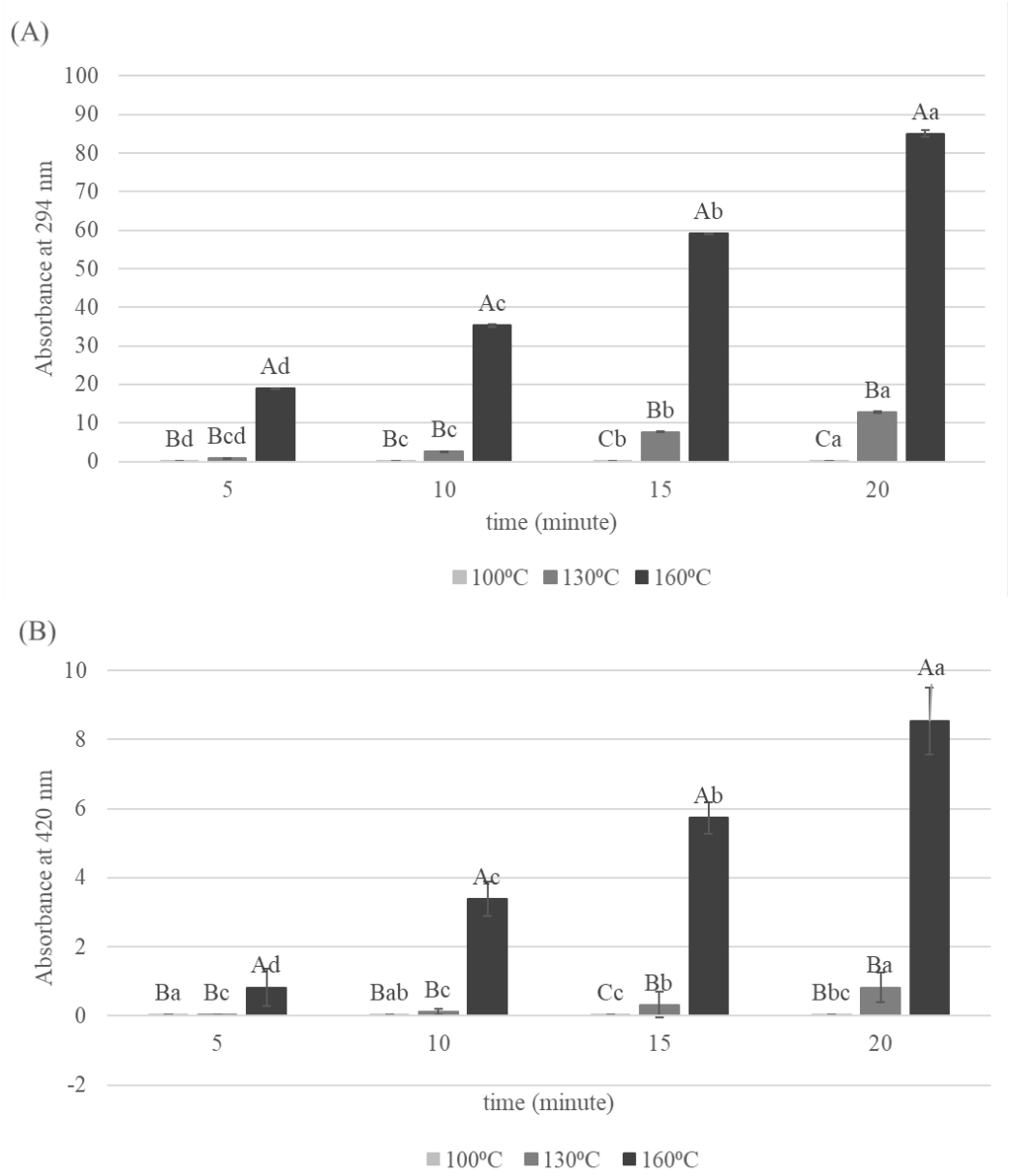


Fig. 2 UV calculated absorbance at OD_{294} (A) and browning (B) at OD_{420} of asparagine-glucose MRP solution at three different temperature and time
[A-C] Different letters mean significant difference ($p < 0.05$) between temperature for each time
[a-d] Different letters mean significant difference ($p < 0.05$) between time for each temperature

The effect of temperature and time on acrylamide content in glucose-asparagine model system is shown in Table 2. The acrylamide was not detected at 100ºC but only detected (0.15 mg/L) when the time reached 10 minutes when heating at 130ºC. When heating temperature was increased to 160ºC, acrylamide formation was increased along with heating time (0-20 minutes). The result suggested that the heating temperature must be high enough and it takes sufficient heating time for the acrylamide to be formed that was agreed with Rydberg et al. (2013) that reported acrylamide increase from around 1.6 ppm to 4 ppm when time increase from 12 minute to 16 minute heating and increase from around 0.4 ppm to 1 ppm when temperature increase from 160ºC to 180ºC. Due to the presence of acrylamide when heating

the model system along the heating time for 20 min at 160ºC. This heating condition was selected for further study to access the inhibitory effect of chitosan.

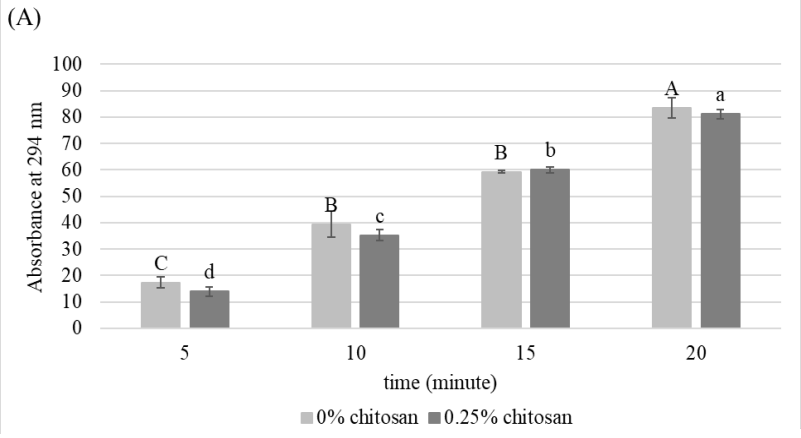
Table 2 Effect of temperature and time on acrylamide formation in model system

Heated time (minute)	Acrylamide content (mg/L) ±SD		
	100ºC	130ºC	160ºC
0	nd	nd	nd
5	nd	nd	2.78 ± 0.10^{Ad}
10	nd	0.15 ± 0.07^{Bb}	15.91 ± 1.48^{Ac}
15	nd	0.38 ± 0.11^{Bb}	33.99 ± 0.942^{Ab}
20	nd	0.68 ± 0.16^{Ba}	46.83 ± 3.86^{Aa}

[A-B] Mean values within horizontal row with different subscripts indicate a significant difference ($p < 0.05$)
[a-d] Mean values within vertical row with different subscripts indicate a significant difference ($p < 0.05$)
[nd] No detection

Influence of the addition of chitosan on MRPs and acrylamide formation in model system

The asparagine-glucose model system with and without chitosan (0.25% w/v) was heated at 160ºC for 5-20 minute to study MRPs and acrylamide formation. As shown in Fig. 3, the addition of chitosan did not significantly influence on the MRPs both intermediate and final brown pigment during 20 min. Fortunately, chitosan showed inhibitory effects of acrylamide since the heating was started. The reduction of acrylamide when chitosan was added was 76%, 34%, 17 and 20%, respectively at heating time 5, 10, 15 and 20 minutes (Fig. 4). This inhibition of acrylamide is due to chitosan contains several amino groups which compete with asparagine amino groups to bind carbonyls of reducing sugars at the first step of Maillard reaction (Chang et al., 2016).



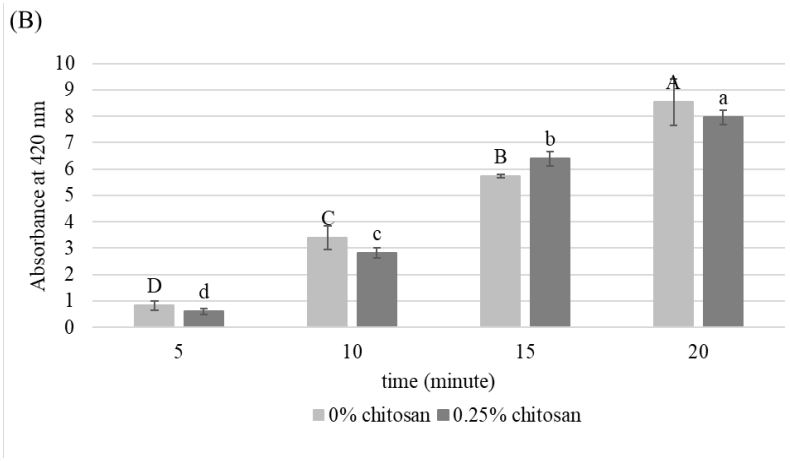


Fig. 3 UV calculated absorbance at OD_{294} (A) and browning (B) at OD_{420} of asparagine-glucose MRP solution with 0% and 0.25% chitosan
[A-D] Different letters mean significant difference ($p < 0.05$) between time of 0%chitosan
[a-d] Different letters mean significant difference ($p < 0.05$) between time of 0.25%chitosan

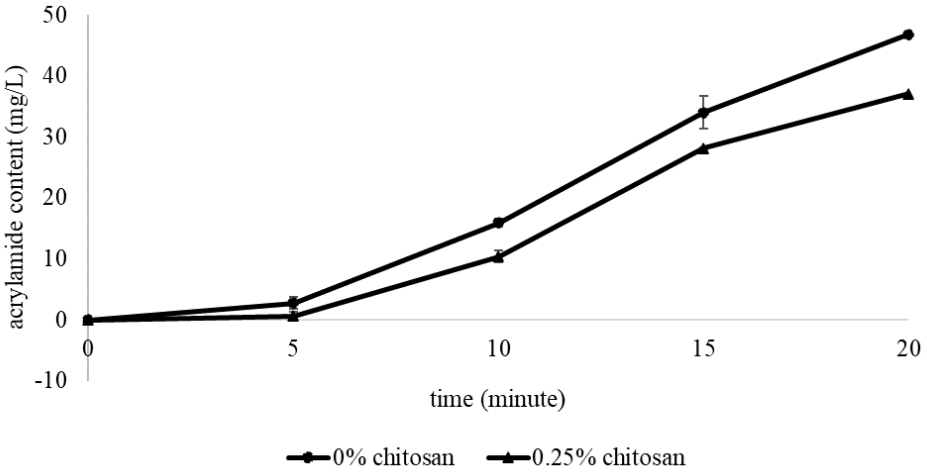


Fig. 4 Amount of acrylamide (mg/L) in the asparagine-glucose with and without chitosan solution

Conclusion

The result revealed that the formation of MRPs and acrylamide showed a strong dependence on temperature and time. Higher temperature combined with prolonged heating time produced the higher acrylamide content in asparagine-glucose model system. Addition of 0.25% (w/v) chitosan could inhibit the formation of acrylamide in model system up to 75% throughout the heating time without changing the MRPs formation. Therefore, chitosan has potential to apply in carbohydrate-rich food that was heated above 120°C to inhibit acrylamide providing more safe food products because the addition of chitosan to food does not change the browning color of the Maillard reaction, according to the MRPs result.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

Acknowledgements

This research is supported by my advisor, Asst. Prof. Dr. Kanithaporn Vangnai. I would like to thankful to her for the advice, helping and problem solving. I also thankful to the Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

References

Becalski, A., Lau, B.P.Y., Lewis, D., Seaman, S.W. 2003. Acrylamide in foods: Occurrence, sources, and modeling. J. Agric. Food Chem. 51: 802–808. doi:10.1021/jf020889y

Cai, Y., Zhang, Z., Jiang, S., Yu, M., Huang, C., Qiu, R., . . . Li, Y. 2014. Chlorogenic acid increased acrylamide formation through promotion of HMF formation and 3-aminopropionamide deamination. J. Hazard. Mater. 268: 1–5. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.067

Can, N. O., Arli, G. 2014. Analysis of acrylamide in traditional and nontraditional foods in Turkey using Hplc–Dad with Spe Cleanup. J. Liq. Chromatogr. Relat. Technol. 37: 850–863. doi:10.1080/10826076.2012.758148

Chang, Y.-W., Sung, W.-C., Chen, J.-Y. 2016. Effect of different molecular weight chitosans on the mitigation of acrylamide formation and the functional properties of the resultant Maillard reaction products. Food Chem. 199: 581–589. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.12.065

Komthong, P., Suriyaphan, O., Charoenpanich, J. 2012. Determination of acrylamide in Thai-conventional snacks from Nong Mon market, Chonburi using GC-MS technique. Food Addit Contam Part B Surveill 5: 20–28. doi:10.1080/19393210.2012.656145

Li, D., Chen, Y., Zhang, Y., Lu, B., Jin, C., Wu, X., Zhang, Y. 2012. Study on mitigation of acrylamide formation in cookies by 5 antioxidants. Int. J. Food Sci. 77: C1144–C1149. doi:10.1111/j.1750-3841.2012.02949.x

Rao, M. S., Chawla, S. P., Chander, R., Sharma, A. 2011. Antioxidant potential of Maillard reaction products formed by irradiation of chitosan–glucose solution. Carbohydr. Polym. 83: 714–719. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.045

Stadler, R. H., & Studer, A. 2016. Acrylamide formation mechanisms. Acrylamide in Food: 1–17

Zhu, K.-X., Li, J., Li, M., Guo, X.-N., Peng, W., Zhou, H.-M. 2013. Functional properties of chitosan–xylose Maillard reaction products and their application to semi-dried noodle. Carbohydr. Polym. 92: 1972–1977. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.078

Effect of glucose, monovalent salts and phenolic compounds on acrylamide formation in asparagine/glucose model system

Napasson Chaisri, 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

Formation of carcinogenic acrylamide in cooked starchy foods poses a substantial adverse health effect. Sugar and salts are basic ingredients added to enhance flavor and taste in foods. Currently, potassium chloride (KCl) is most commonly used as a salt replacer to reduce the sodium contents. Our study aimed to investigate the addition of glucose with monovalent salts and determined effect of phenolic compounds on acrylamide formation by using asparagine/glucose model system. Various amounts of glucose (0.1, 0.15 and 0.2 M), NaCl and KCl (1, 3 and 5% w/v) and phenolic compounds (quercetin, taxifolin, myricetin, kaempferol at 0.1 mg/mL) were added in the model system heated at 160ºC for 15 min, and acrylamide was determined using HPLC-DAD. The results showed that acrylamide content was detected at an initial 0.1 M of glucose concentration with a non-linear increase at higher concentrations. Presences of NaCl and KCl were effective in inhibiting acrylamide formation up to 42% and 38%, respectively. All phenolic compounds showed no mitigation effect on acrylamide in our model system. Based on the results we have confirmed that both NaCl and KCl could potentially inhibit acrylamide formation. This could be useful information for the further application in improving the safety of cooked starchy food products.

Keywords: Acrylamide, Model system, Phenolic compounds, Salt, Sugar

Introduction

Acrylamide (2-propenamide) is a food toxicant that found during high temperature cooking (120ºC) such as frying, baking, roasting and commonly found in potato chip, French fries, bakery products, coffee. Acrylamide can occur during browning process through Maillard reaction of reducing sugar with asparagine that are important reactants. Concentration of acrylamide depends on several factors including cooking temperature and time, cooking oils, amount of reducing sugar and free amino acid (stadler and studer, 2016). It is a known that acrylamide is human neurotoxin and has been classified as probably carcinogenic in humans (group 2A) by the IARC. Safety agencies recommended for both consumers and industry to minimize acrylamide in food as much possible.

At present, there are many procedures to mitigate acrylamide formation in thermally processed foods. These include pre-treatments, modification of food processing and formulation, or addition of exogenous additives. Salt is a common food additive to improve flavor and quality. The previous study reported that sodium chloride could inhibit the formation of acrylamide, however the information is still unclear. Potassium chloride can be an alternative to sodium chloride to produce more healthy alternative products for consumers who concern the over exposure of sodium. Kolek et al. (2006) studied the concentration of NaCl at 1, 5 and 10% w/w to model system, at 10% of salt had a highest acrylamide inhibition negative on the other hand that also had the negative effects in human body. Phenolic compounds are natural antioxidant found in fruits, vegetables, herbs and spices. These compounds are characterized by the presence of aromatic ring bearing one or more hydroxyl substituent. They have been proposed as one of the probable mechanisms of inhibiting acrylamide formation.

Chemical model system of asparagine and a carbonyl such as glucose in aqueous solution have been used mainly to study pathway of acrylamide formation due to reaction was untroubled by matrix food components and more understand the reasons of acrylamide reduction. The purpose of present study was to investigate the effects of glucose (0.1, 0.15 and 0.2 M), monovalent salts (1, 3 and 5% w/v) and phenolic compounds (0.1 mg/mL) on acrylamide formation in asparagine/glucose model system. The results obtained from this study would provide the knowledge on acrylamide formation and inhibition in order to successfully further applied in food system.

Material and Method

Chemical and materials

Acrylamide (≥98.0%, GC), asparagine (98%, TCL), D-glucose, potassium chloride (KCl), sodium chloride (NaCl), di-sodium hydrogen orthophosphate anhydrous, sodium dihydrogen orthophosphate, quercetin, taxifolin, myricetin, kaempferol and other HPLC grade solvents were purchased from Sigma Aldrich that used all experiments.

Preparation of asparagine/glucose model system

The solution of asparagine (0.1 M) and glucose were prepared in phosphate buffer (0.1 M, pH 7.0) at various glucose concentration (0.1, 0.15 and 0.2 M). The mixtures (2 mL) were heated in tight closed screw-capped equipped with thermometer in oil bath at 160ºC for 15 min.

Sodium chloride and potassium chloride (1, 3 and 5% w/v), four phenolic compounds (quercetin, taxifolin, myricetin, kaempferol were diluted with ethanol) at final concentration 0.1 mg/mL were added in equimolar of 0.1 M of reactants. After heating, the mixture was immediately cooled in iced water for 10 min. Then the solutions were diluted with 1 mL distillated water. The samples were then filtered through 0.45 µm nylon filters prior to HPLC-DAD analysis to determine concentration of acrylamide (Knol et al., 2005).

Analysis of Acrylamide in asparagine/glucose model system

The analysis of acrylamide was performed by HPLC-DAD based on the method described by Can and Arli (2014). Using a Prominence series of HPLC system from Shimadzu (Kyoto, Japan) with ODS-3 C_{18} column (size 250 x 4.6 mm) from GL Sciences. The samples were injected 10 µL. An isocratic elution was applied throughout the study. The mobile phase was prepared to contain acetonitrile:water (3.5:96.5 v/v) for this purpose. All solutions were degassed by sonication for 15 min. Mobile phase was pumped at the rate of 1.0 mL/min and column temperature was set 25ºC. Detector responses were recorded at 200 nm wavelength. An SPD-M20A photodiode array detector signals were recorded in the region of 200 nm–400 nm. The stock solution of standard acrylamide was prepared in distillated water. The response of DAD at 200 nm was linearly along with standard acrylamide concentration in range of 5-80 mg/kg ($y=106198x+27849$, $r^2=0.9999$).

Statistical analysis

Data analysis was performed using SPSS version 25 computer software (IBM SPSS). All experiments were conducted in duplicate and the mean and SD were reported with significance decided at the 95% confidence level.

Results and Discussion

Effect of glucose on acrylamide formation in the model system

The chromatogram of acrylamide is shown on Fig. 1. Although the effects of glucose concentration on acrylamide formation in the asparagine-glucose model system have been established in several previous publication, the formation of acrylamide in the model system could be varied depended on each experiment. In this study, we varied the concentration of glucose at 0, 0.1, 0.15 and 0.2 M to study the different of acrylamide formation and result showed that acrylamide was increased from 0 to 48.91, 65.87 and 70.22 mg/L, respectively (Fig. 2). At 0.1 M which was the lowest concentration of glucose to induce the formation of acrylamide. Among all concentration of glucose (0.1, 0.15 and 0.2 M). At 0.1 M which was the lowest concentration of glucose was enough to induce the formation of acrylamide in detectable level. Thus, glucose at concentration 0.1 M was selected as the substrate for asparagine/glucose to form acrylamide for the further study.

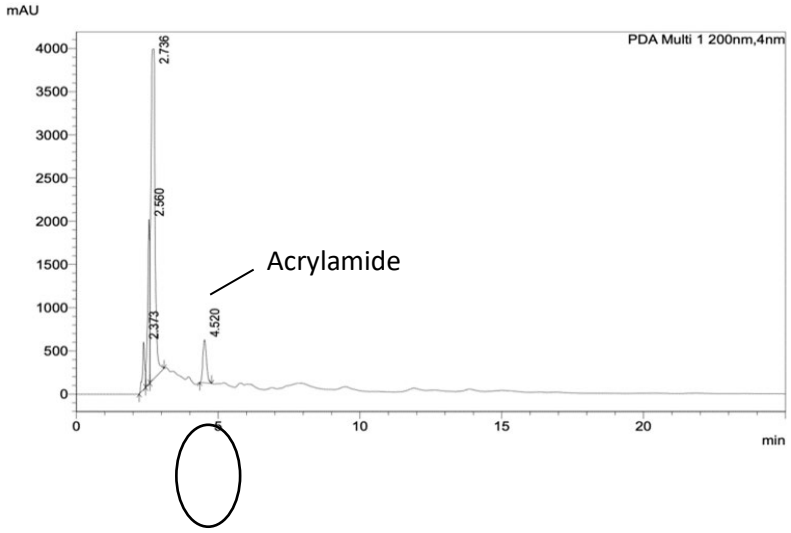


Fig. 1 HPLC-DAD chromatogram of acrylamide (10 µL injection)

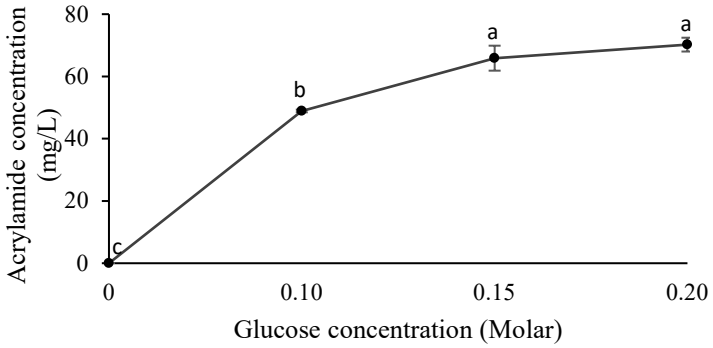


Fig. 2 Effect of glucose concentration (Molar) on acrylamide formation

Effects of salts on acrylamide in asparagine/glucose model system

In this study, 1%, 3% and 5% NaCl and KCl were added in the asparagine/glucose model system to study the effects of these monovalent salts on acrylamide. As shown in Fig. 3, the addition of 1% both NaCl and KCl did not influenced on acrylamide level when compared with control (0% salt). However, when salt concentration was increased to 3% and 5%, the reduction of acrylamide was significantly shown. The 3% NaCl and KCl could reduce acrylamide by 20.5% and 25%, respectively and 5% NaCl and KCl could reduce acrylamide up to 42% and 38%, respectively. There was no difference on the inhibitory of acrylamide between NaCl and KCl. Although, at 5% of both had the highest reduction of acrylamide, moreover excessive intake of salt by consumers has been related to development of hypertension and consequently the higher risk of development of cardio-vascular disease. The inhibitory effect of acrylamide by the addition of salt could be explained due to cations of salt influenced to the rate of decomposition of glucose which is the acrylamide reactants

significantly. When cations are increased, the rate of glucose decomposition are increased as well while asparagine remained unreacted (Gökmen and Şenyuva, 2007).

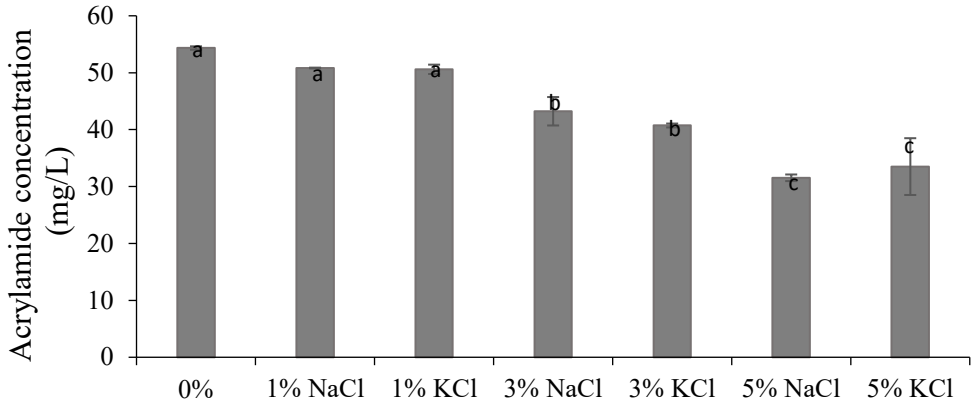


Fig. 3 Effects of NaCl and KCl on acrylamide formation in model system
[a-c]Different letters indicate a significant difference by each sample ($p < 0.05$).

Effects of phenolic compounds on acrylamide in asparagine/glucose model system

Four antioxidative compounds (quercetin, taxifolin, myricetin, kaempferol) were added in order to determine their effect on acrylamide inhibition. It is well studied that the antioxidant activity of antioxidative compounds is strongly correlated to the number and position of hydroxyl group and also their aromatic structure. Many studies investigated the effectiveness of phenolic compounds and natural antioxidant molecules which could effectively reduce acrylamide formation however, the mechanisms are still unclear. For example, Zhu et al. (2009) found a strong reduction of acrylamide by the addition of catechin (23%), gallic acid (47%) and coumaric acid (53%). Phenolic compounds with high antioxidant activity are expected to perform the inhibition of acrylamide. However, for our study as shown in Fig. 4, the addition of all four phenolic compounds did not show any reduction effect on acrylamide in our model system. It is possible that our phenolic compounds concentrations were too low. Our result here was strongly supported the study of Bassama et al. (2010) who also reported that many tested phenolic compounds (caffeic acid, catechin, cinnamic acid, ferulic acid, coumaric acid, gallic acid, epicatechin) could not be food candidates for the mitigation of acrylamide via Maillard reaction.

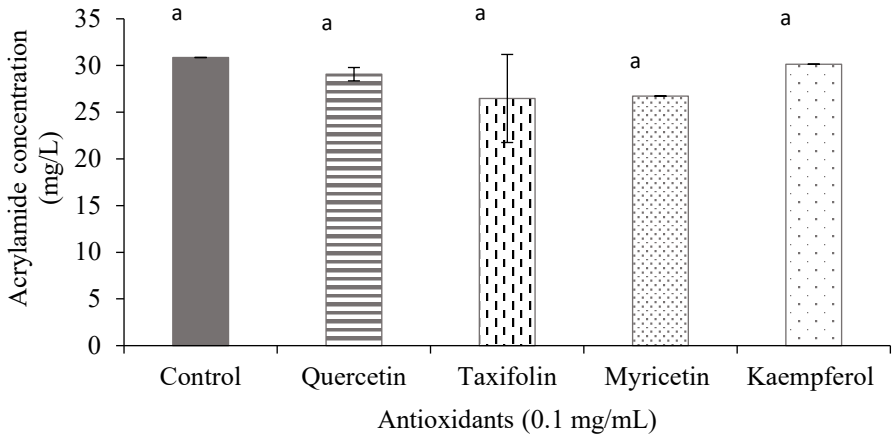


Fig. 4 Relationship between acrylamide concentration and different phenolic compounds

Conclusions

In this study, three factors including glucose concentration, salt type and concentration and phenolic compounds were studied on acrylamide formation. Acrylamide was increased along with the increase concentration of glucose. Both salts used in this study, Acrylamide formation was inhibited by 3% of NaCl and KCl (20.5% and 25%) and 5% of NaCl and KCl (42% and 38%), respectively. At 1% and 3% were recommended to apply in foods. The addition of four phenolic compounds (quercetin, taxifolin, myricetin, kaempferol) did not showed any reduction effects of acrylamide in our model system. These all results provided the knowledge on acrylamide formation and inhibition in order to successfully further applied in food system.

Acknowledgements

I would like to thank the Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasertsart University to facilitate this present study.

References

Bassama, J., Brat, P., Bohuon, P., Boulanger, R., Günata, Z. 2010. Study of acrylamide mitigation in model system: Effect of pure phenolic compounds. Food Chem. 123: 558–562. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.071

Can, N.O., Arli, G. 2014. Analysis of acrylamide in traditional and nontraditional foods in turkey using HPLC-DAD with SPE cleanup. J. Liq Chrom Relat Tech. 37: 850–863. https://doi.org/10.1080/10826076.2012.758148

Gökmen, V., Şenyuva, H.Z. 2007. Effects of some cations on the formation of acrylamide and furfurals in glucose-asparagine model system. Eur. Food Res. Technol. 225: 815–820. https://doi.org/10.1007/s00217-006-0486-7

Knol, J.J., Van Loon, W.A.M., Linssen, J.P.H., Ruck, A.L., Van Boekel, M.A.J.S., Voragen, A.G.J. 2005. Toward a kinetic model for acrylamide formation in a glucose-asparagine reaction system. J. Agric. Food Chem. 53: 6133–6139. https://doi.org/10.1021/jf050504m

Stadler, R.H., Studer, A. 2015. Acrylamide Formation Mechanisms. In Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802832-2.00001-2

Zhu, F., Cai, Y.Z., Ke, J., Corke, H. 2009. Evaluation of the effect of plant extracts and phenolic compounds on reduction of acrylamide in an asparagine/glucose model system by RP-HPLC-DAD. J. Sci. Food Agric. 89: 1674–1681. https://doi.org/10.1002/jsfa.3640

ผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อลักษณะทางกายภาพและคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของมะพร้าวน้ำหอมผง

Effect of inlet air temperature of spray dryer on physical characteristics and sensory quality of aromatic coconut powder

ยศพล แก้วคำภา[a], วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์[a]*, กิติพงษ์ รัตนาภรณ์[b], กฤษกมล ณ จอม[a]

Yossaphol Kaewkumpha[a], Waraporn Boonsupthip[a]*, Kittipong Rattanaporn[b], Kriskamol Na Jom[a]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิลมขาเข้าของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย 3 ระดับ คือ 150, 160 และ 170 °C ต่อคุณภาพมะพร้าวน้ำหอมผง พบว่า อนุภาคผงมะพร้าวทำแห้งที่อุณหภูมิลม 170 °C มีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงน้อยที่สุดและขนาดผงเฉลี่ยเล็กที่สุด (2.61 มม.) รองลงมาคือที่ 160 และ 150 °C โดยทุกตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน แต่ที่ 170 °C ผงมีค่าการเปียกสูง แต่มีค่าการละลายต่ำกว่าการทำแห้งด้วยอุณหภูมิลมต่ำกว่า และเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนง่ายกว่ามะพร้าวผงที่ 160 °C เนื่องจากมีความชื้นสูงกว่าเล็กน้อย และการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าผงที่ทำแห้งที่ 150 °C เป็นที่ยอมรับมากที่สุดในทุกด้าน รองลงมาคือ 160 และ 170 °C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาโดยรวมอุณหภูมิ 160 °C มีความเหมาะสมมากกว่า 150 °C เพราะให้สีและลักษณะปรากฏด้อยกว่าเพียงเล็กน้อย แต่คุณภาพด้านอื่นมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเกิดปัญหาการเกาะตัวกันน้อยที่สุด

คำสำคัญ: คุณภาพ, เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย, มะพร้าว, อุณหภูมิ

Abstract

The objective of this research was to study the effect of spray-dryer air inlet temperature at 3 levels: 150, 160 and 170 °C on aromatic coconut powder quality. It was found that the dried coconut powder particles at the inlet temperature of 170 °C had the smallest size distribution value and the smallest average powder size (2.61mm), followed by those at 160 and 150 °C. All samples had similar initial moisture. The powders dried at 170 °C had a higher wettability value but a lower solubility value than those at lower air inlet temperature and caking is easier than coconut powder at 160 ° C due to the slightly higher moisture content. The sensory testing showed that the powders dried at 150 °C were the most acceptable on all quality attributes, followed by those at 160 and 170 °C. Overall, the temperature of 160 °C was more suitable for the drying than 150 °C because it caused only slightly inferior color and appearance. The quality of other aspects had insignificant differences ($p > 0.05$) from those at other temperature levels and the problem of caking was the least.

Keywords: coconut, quality, spray dryer, temperature

คำนำ

มะพร้าวน้ำหอม (Aromatic coconut) เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สำคัญของประเทศไทย และมีการผลิตเพื่อบริโภคภายในประเทศและส่งออกไปยังนอกประเทศ และน้ำมะพร้าวน้ำหอม เป็นเครื่องดื่มที่เป็นที่รู้จักของคนไทยและประเทศในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และปัจจุบันมีความนิยมเพิ่มขึ้นทั่วโลกเพราะเป็นเครื่องดื่มที่มีกลิ่นหอม มีรสชาติที่ดี ดื่มแล้วรู้สึกสดชื่น และเป็นสินค้าส่งออกอันดับต้นๆ ของไทย แต่เนื่องด้วยเป็นสินค้าสด การส่งออกสินค้าจำเป็นต้องทำการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงเป็นอย่างมาก นำมาซึ่งงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการผลิตผงน้ำมะพร้าวน้ำหอมที่สามารถเก็บรักษาได้ด้วยอุณหภูมิห้อง สามารถชงดื่มได้อย่างสะดวกและยังคงกลิ่นรสและรสชาติที่ดี และคุณประโยชน์ใกล้เคียงน้ำมะพร้าวน้ำหอมสด โดยการแปรรูปให้อยู่ในรูปของมะพร้าวน้ำหอมผง ด้วยการใช้กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ผงที่เป็นที่นิยมเนื่องจากผลิตง่ายและได้ปริมาณการผลิตสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความชื้นต่ำ (Desai and Park, 2005) สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ สะดวกต่อการนำมาบริโภค และสามารถกักเก็บกลิ่นรสของวัตถุดิบได้เป็นอย่างดี การศึกษาของ Nambiar et al. (2017) พบว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอยสามารถลดประมาณความชื้นน้ำมะพร้าวผงจนมีความชื้นอยู่ในช่วง 1.3–4.5% และผลของอุณหภูมิขาเข้าของการทำแห้งส่งผลต่อความชื้นของมะพร้าวผง โดยเมื่ออุณหภูมิขาเข้าสูงขึ้นปริมาณความชื้นจะลดลง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาสภาวะของการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมต่อการผลิตมะพร้าวน้ำหอมผง โดยศึกษาผลของอุณหภูมิขาเข้าของการทำแห้งที่ส่งผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพและคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของมะพร้าวน้ำหอมผง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ

มะพร้าวน้ำหอมอายุหลังจากออกช่อดอกได้ 190–200 วัน โดยเก็บเกี่ยวจากสวนที่จังหวัดนครปฐม, ราชบุรี และสมุทรสาคร

มอลโตเดรกตริน DE 30

ถุงอลูมิเนียมฟอยด์ขนาด 18 x 12 ซม.

เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น GEA Niro A/S mobile minor Spray dry Denmark

ตะแกรงขนาด 0.35, 1.15, 1.45, 3.4, 5.35, 7.95, และ 13.6 มม.

การเตรียมตัวอย่าง

ผสมน้ำมะพร้าวน้ำหอมและมอลโตเดรกตริน (DE 30) 20% คนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้า 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิขาออกคงที่ที่ 90 องศาเซลเซียส บรรจุมะพร้าวน้ำหอมผงที่ผ่านการทำแห้งมาแล้วลงในถุงอลูมิเนียมฟอยด์ ปิดผนึกถุง เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 4 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์ความชื้น

วิเคราะห์ความชื้นด้วยวิธี AOAC (1999) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างผง 1 กรัม ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ อบแห้งด้วย hot air oven 105 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 10 นาทีในช่วง 1 ชั่วโมงแรก และทุกๆ 30 นาทีหลังจากนั้น จนน้ำหนักตัวอย่างคงที่ คำนวณความชื้นตาม Equation 1

$$MC = \frac{M1-M2}{M1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ MC คือความชื้นฐานเปียก (%)

M1 คือน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

M2 คือน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

การวิเคราะห์การละลาย

วิเคราะห์การละลายด้วยการจับเวลาที่ผงละลายจนหมด ประยุกต์ใช้วิธีของ Tulardilok (2009) โดยชั่งตัวอย่างผง 6 กรัม เทตัวอย่างลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นอยู่ 40 มล. คนตัวอย่างโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กความเร็ว 400 rpm จดบันทึกเวลาที่ตัวอย่างละลายจนหมด

การวิเคราะห์การเปียก

วิเคราะห์การเปียกของผงก่อนและหลังเกิดการกจับตัวเป็นก้อนด้วยการจับเวลาที่ผงจมจากผิวของน้ำ ประยุกต์จากวิธีของ Dacanal and Menegalli (2010) โดยชั่งตัวอย่างผง 3 กรัม เทตัวอย่างลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นอยู่ 200 มล. จับเวลาและจดบันทึกเวลาที่ตัวอย่างจมลงจากผิวน้ำจนหมด

การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง

วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงก่อนและหลังเกิดการจับตัวเป็นก้อนด้วยคัดแยกขนาดของผงด้วยตะแกรง ชั่งตัวอย่างผง 5 กรัม เทตัวอย่างลงในตะแกรงแล้วเขย่าเป็นเวลา 1 นาที ชั่งน้ำหนักผงในแต่ละชั้นและนำไปคำนวณน้ำหนักผงที่อยู่บนชั้นขนาดต่าง ๆ ตาม Equation 2

$$P = \frac{(W1-W2)}{W3} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ P คือสัดส่วนน้ำหนักผงในตะแกรงแต่ละชั้น (%)

W1 คือน้ำหนักของผงและตะแกรงแต่ละชั้น (กรัม)

W2 คือน้ำหนักของตะแกรงเปล่า (กรัม)

W3 คือน้ำหนักรวมผงเริ่มต้น (กรัม)

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

วิเคราะห์ด้วยการทดสอบประเมินเรื่องการยอมรับแบบให้คะแนนความชอบ (9-point hedonic scale) โดยผู้ทดสอบทั่วไป 30 คนที่ไม่เคยผ่านการฝึกฝน ผู้ทดสอบประเมินคะแนนความชอบโดยไม่เปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น โดยให้คะแนนด้านสี, ลักษณะปรากฏ, กลิ่น, กลิ่นรส, รสชาติ, ความหวาน และความชอบโดยรวม ให้คะแนนความชอบในช่วง 1-9 คะแนน กำหนดให้ระดับคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด, 2 หมายถึง ไม่ชอบมาก, 3 หมายถึง ไม่ชอบปานกลาง, 4 หมายถึง ไม่ชอบเล็กน้อย, 5 หมายถึง เฉย ๆ , 6 หมายถึง ชอบเล็กน้อย, 7 หมายถึง ชอบปานกลาง, 8 หมายถึง ชอบมาก และ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีของ Tukey ด้วยโปรแกรม minitab 19 ที่ความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของความชื้น

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิขาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยส่งผลต่อความชื้นของมะพร้าวน้ำหอมผง โดยเมื่อใช้อุณหภูมิขาเข้า 170 องศา ความชื้นของผงสูงกว่าอุณหภูมิขาเข้าที่ 150 และ 160 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Fig.1) ซึ่งน่าจะเป็นเพราะที่อุณหภูมิขาเข้าสูงมีผลทำให้ผิวของอนุภาคในขณะทำแห้งนั้นเกิดเป็นลักษณะคล้ายเปลือกแข็ง ส่งผลให้ความชื้นภายในอนุภาคระเหยออกมายากขึ้น ซึ่งมักเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำตาลสูง (Santhalakshmy et al., 2015)

การละลาย (Solubility)

การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าสูงขึ้นส่งผลต่อการละลายของมะพร้าวน้ำหอมผง เมื่ออุณหภูมิขาเข้าสูงขึ้นผงจะใช้เวลาในการละลายเพิ่มขึ้นสำหรับผงก่อนจับตัวกันเป็นก้อน (Fig.1) น่าจะเป็นการเกิดเป็นเปลือกแข็งที่ผิวของอนุภาคผงที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้น้ำแพร่ผ่านเข้าไปภายในอนุภาคยากขึ้นผงจะใช้เวลาในการละลายเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อผงเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนจะใช้เวลาในการละลายเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ทั้งนี้ผลของอุณหภูมิขาเข้าส่งผลต่อเวลาในการละลายของผงหลังเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน โดยเมื่ออุณหภูมิขาเข้าสูงขึ้นผงจะใช้เวลาในการละลายลดลง ซึ่งน่าจะเป็นเพราะผิวของอนุภาคผงที่กลายเป็นเปลือกแข็งที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเกาะตัวกันของผงแบบหลวม ทำให้เมื่อได้รับแรงกลจากการกวนด้วย magnetic stirrer น้ำจึงสามารถแพร่เข้าไปภายในอนุภาคได้ง่ายขึ้น (Chegini and Ghobadian, 2005)

การเปียก (Wettability)

การเปียกคือระยะเวลาที่ผงจะจมจากผิวน้ำ ซึ่งเกิดจากการที่ผงเปียกจากการดูดซับน้ำที่ผิวของผงจนเกิดการจม (Nishad et al., 2017) จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิขาเข้าสูงขึ้นส่งผลต่อการเปียกของมะพร้าวน้ำหอมผง เมื่ออุณหภูมิขาเข้าสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าการเปียกของผงสูงขึ้น (Fig.1) โดยที่อุณหภูมิ 150 และ 160 องศาเซลเซียส เวลาในการจมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ที่อุณหภูมิ 170 องศาผงจะใช้เวลาน้อยลง ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของความชื้นผงที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จะเห็นว่ามีความชื้นสูงจากการเปลือกแข็งที่ผิว ส่งผลให้อนุภาคผงมีน้ำอยู่ภายในมากและมีรูพรุนอากาศน้อยความหนาแน่นของอนุภาคผงสูง ผงจะจมเร็วขึ้น ส่งผลให้มีค่าการเปียกที่สูง สอดคล้องกับ Caliskan และ Dirim (2013) ที่รายงานผลของอุณหภูมิขาเข้าการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเปียกของผงซูมักสูงขึ้น

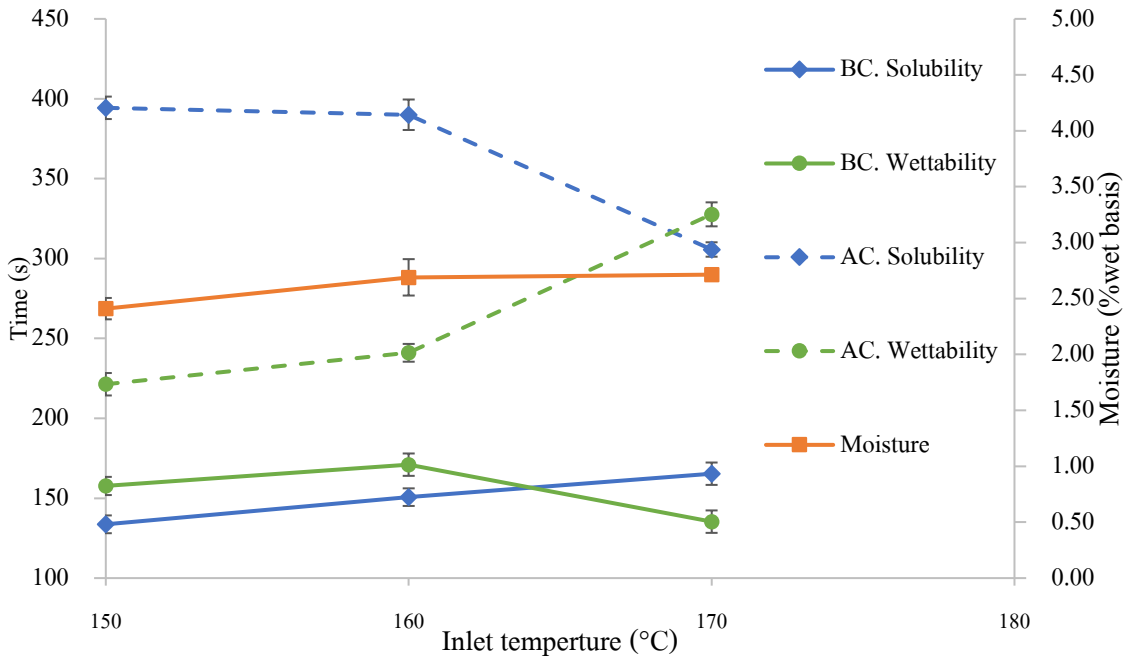


Fig. 1 Solubility, wettability and moisture content of coconut powder before (BC) and after caking (AC).

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมะพร้าวน้ำหอมผงหลังทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า ส่วนใหญ่ (64–67 %) มีขนาดอยู่ในช่วง 1.34–3.4 มม. (Fig.2) ทั้งนี้ผลของอุณหภูมิขาเข้าต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง พบว่าอุณหภูมิขาเข้าไม่ส่งผลให้เกิดการกระจายของขนาดอนุภาคผงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อผงเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนแล้ว พบว่า ผลของอุณหภูมิขาเข้าส่งผลต่อขนาดอนุภาคผงหลังเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน โดยอุณหภูมิขาเข้า 150 องศาเซลเซียส มีผงที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ในช่วง 7.95–13.6 มม.อยู่มากที่สุด (24.32 %) รองลงมาคือ 170 (19.32 %) และ 160 (10.08 %) องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะอนุภาคผงที่มีขนาดเล็ก (0.35–1.15 มม.) เกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของกึ่งแข็งกึ่งเหลวและเหนี่ยวนำได้ง่ายเนื่องจากมีสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรผงสูงกว่าผงขนาดใหญ่จึงทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นก้อนได้ง่าย ซึ่งผงที่อุณหภูมิขาเข้า 150 และ

170 องศาเซลเซียส มีปริมาณผงขนาดเล็กดังกล่าวอยู่มากกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของค่าการเปียกก่อนการจับตัวกันเป็นก้อนจะพบว่าอุณหภูมิ 150 และ 170 องศาเซลเซียส มีค่าการเปียกสูงกว่าผงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส อาจเป็นผลจากการมีผงขนาดเล็กทำให้ที่สามารถดูดซับน้ำได้เร็วและผงขนาดเล็กนี้ก็ส่งผลให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนได้ใหญ่กว่า

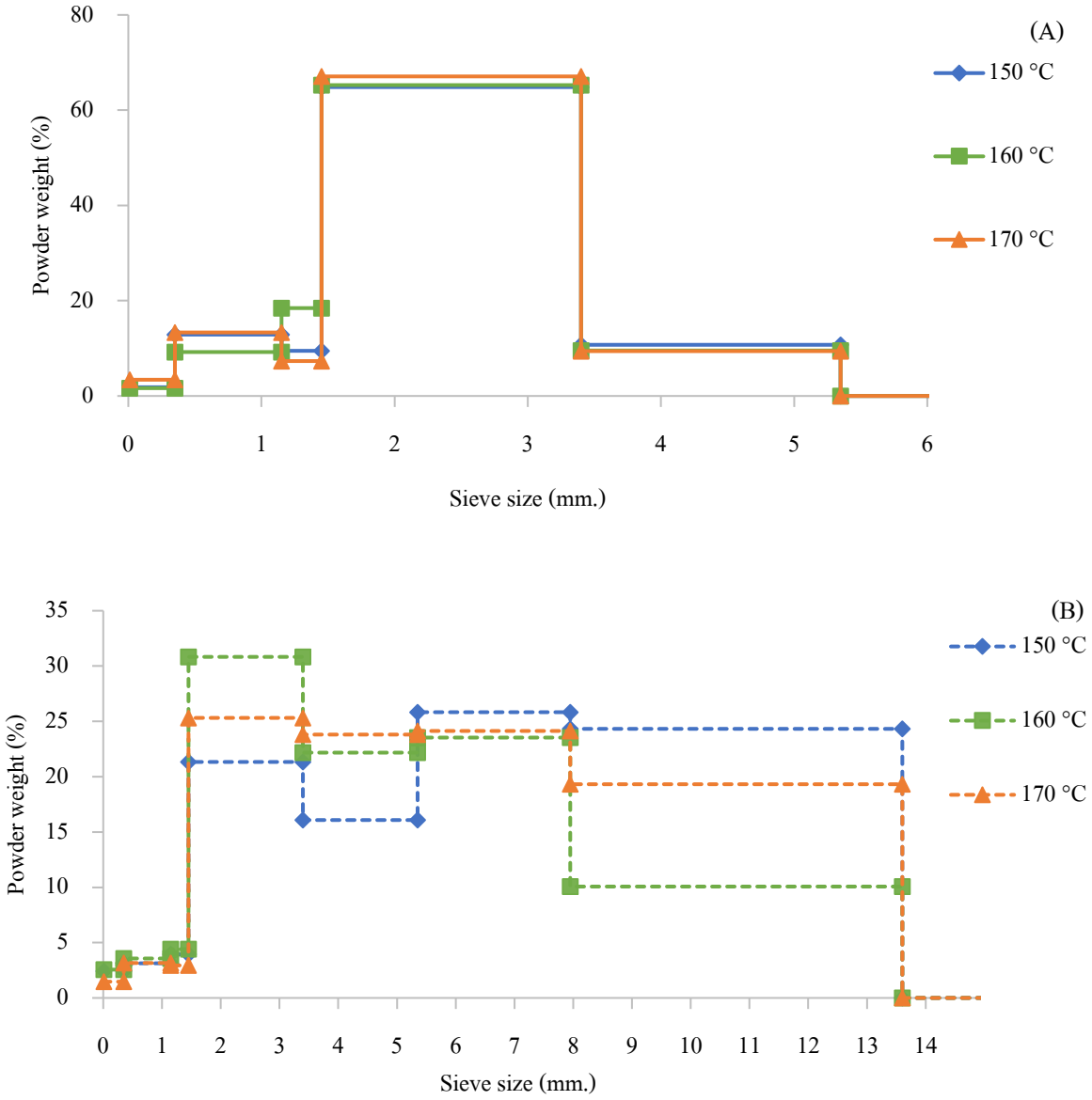


Fig. 2 Size distribution of coconut powder. (A) before caking (B) after caking.

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส พบว่า อุณหภูมิขาเข้ามีผลต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส โดยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส มีคะแนนความชอบในด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่นรส รสชาติ ความหวาน และความชอบรวมที่น้อยกว่าอุณหภูมิขาเข้า 150 และ 160 องศาเซลเซียส (Fig.3) แต่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) น่าจะเป็นเพราะว่าอุณหภูมิการทำแห้งที่สูงส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีด้านกลิ่นรสซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ถูกทำลายได้ง่ายเมื่อโดนความร้อนสูง ซึ่งถ้าพิจารณาคะแนนความชอบอุณหภูมิขาเข้า 150 และ 160

องศาเซลเซียส จะพบว่ามีคะแนนด้านกลิ่นรส, รสชาติ และความชอบรวมสูงกว่า แต่ทั้งนี้คะแนนคุณลักษณะด้านดังกล่าวของอุณหภูมิขาเข้า 150 และ 160 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

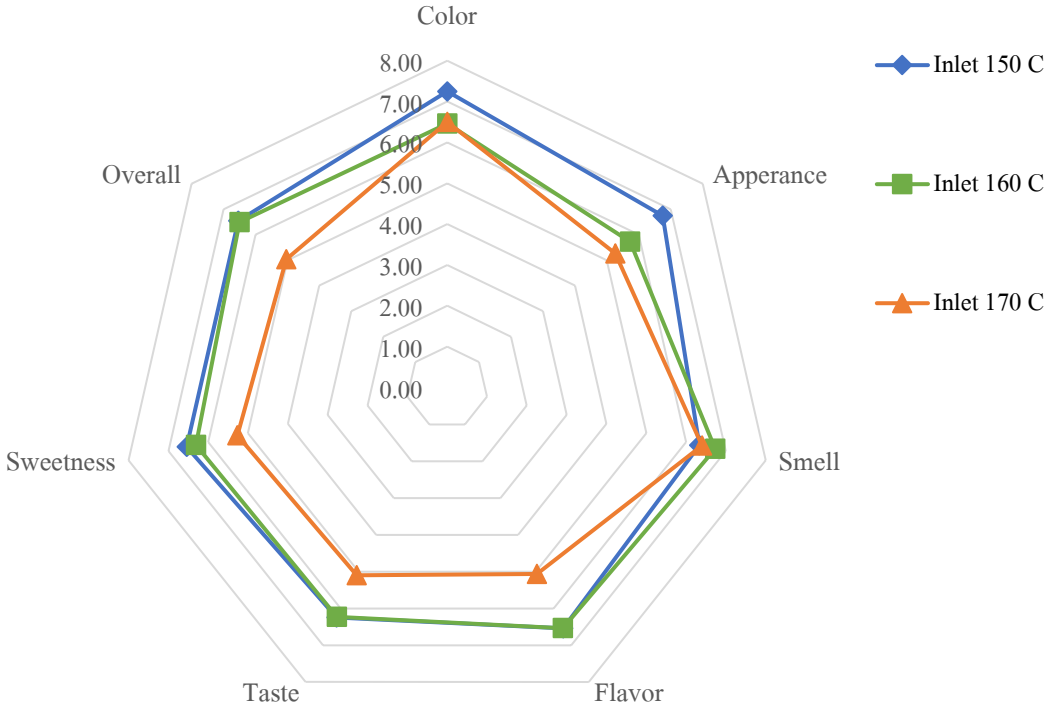


Fig.3 Sensory evaluation test of aromatic coconut powder.

สรุป

อุณหภูมิขาเข้ากระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของมะพร้าวน้ำหอมผง จากการศึกษาพบว่าความชื้นของผงสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิขาเข้าที่สูงขึ้น น่าจะเป็นเพราะว่าที่ผิวของอนุภาคผงเกิดเป็นเปลือกแข็งทำให้ความชื้นภายในของอนุภาคระเหยออกยากขึ้น และเนื่องจากลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จึงส่งผลให้น้ำภายนอกแพร่เข้าไปภายในอนุภาคได้ช้าทำให้ผงละลายน้ำได้ช้าลง แต่ทั้งนี้น้ำที่อยู่ภายในอนุภาคผงนี้ทำให้ช่องว่างอากาศถูกแทนที่ด้วยน้ำ ผงจึงจมลงจากผิวน้ำได้เร็วขึ้น เมื่อผงเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน พบว่าผลของอุณหภูมิขาเข้าเครื่องแห้งแบบพ่นฝอยที่สูงขึ้นส่งผลให้ผงใช้เวลาการละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นเพราะการเกาะกันแบบหลวมของผง ทำให้ผงกระจายตัวออกได้ง่ายเมื่อถูกแรงกวน การกระจายตัวขนาดอนุภาคผงพบว่าผลของอุณหภูมิไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส พบว่าอุณหภูมิขาเข้าไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับมะพร้าวน้ำหอมผงคืออุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดการเกาะตัวกันได้ยากที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่นจะมีคะแนนความชอบด้านประสาทสัมผัสมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตรที่สนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

เอกสารอ้างอิง

Caliskan, G., Dirim, S.N. 2013. The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. Food and Bioproducts Processing 91: 539–548.

Chegini, G., Ghobadian, B. 2005. Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder. Drying technology 23: 657–668.

Dacanal, G., Menegalli, F. 2010. Selection of operational parameters for the production of instant soy protein isolate by pulsed fluid bed agglomeration. Powder Technology 203: 565–573.

Desai, K., Park, H.J. 2005. Encapsulation of vitamin C in tripolyphosphate cross-linked chitosan microspheres by spray drying', Journal of microencapsulation 22: 179–192.

Nambiar, R.B., Sellamuthu, P.S., Perumal, A.B. 2017. Microencapsulation of tender coconut water by spray drying: effect of Moringa oleifera gum, maltodextrin concentrations, and inlet temperature on powder qualities. Food and Bioprocess Technology 10: 1668–1684.

Nishad, J., Selvan, C.J., Mir, S.A., Bosco, S.J.D. 2017. Effect of spray drying on physical properties of sugarcane juice powder (*Saccharum officinarum* L.). Journal of food science and technology 54: 687–697.

Santhalakshmy, S., Bosco, S.J.D., Francis, S., Sabeena, M. 2015. Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. Powder Technology 274: 37–43.

Tulardilok, K. 2009. Production of pickled garlic powder by foam-mat drying. Published master's thesis, Chiang Mai University. Chiang Mai, Thailand.

การศึกษาผลของสภาวะการย้อมต่อสมบัติการย้อมสีผ้าเรยอนด้วยสีย้อมสกัดจากเปลือกตะบูนขาว

Study of the effects of dyeing conditions on dyeing properties of rayon using *Xylocarpus granatum* bark extract

กนกวรรณ กุสลางกูรวัฒน์, เบญจมาศ คล้ายเครือญาติ, ธนิกา หุตะกมล, เพ็ญวิสาข์ พิสิฏฐศักดิ์*

Kanokwan Kusalangkoonwat, Benjamas Klaykruayat, Thanika Hutakamol, Penwisa Pisitsak*

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Department of Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: penwisa_p@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะในการย้อมสีผ้าเรยอนด้วยสีผงที่อุดมด้วยสารแทนนินซึ่งสกัดจากเปลือกไม้ตะบูนขาว โดยใช้การย้อมด้วยเครื่องย้อมสีแบบอินฟราเรด สารช่วยติดสีที่ใช้ ได้แก่ สารส้ม จุนสี และทิน (II) คลอไรด์ โดยใช้กระบวนการพรีมอร์แดนท์ ทำการย้อมในสภาวะกรด พบว่าผ้าที่ได้มีสีน้ำตาลแดง โดยพบว่าการใช้จุนสีมีผลให้ได้สีน้ำตาลแดงที่เข้มขึ้น ขณะที่สารส้มและทิน (II) คลอไรด์จะทำให้ได้ผ้าที่มีสีอ่อนใกล้เคียงกับผ้าที่ไม่ใช้สารช่วยติดสี สภาวะการย้อมที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ (70–90°C) เวลา (45–60 min) ความเข้มข้นของสีย้อม (5–25% owf) และสารช่วยติดสี (1–5% owf) พบว่า เมื่อตัวแปรเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น จะได้ความเข้มสีเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบความคงทนของสีพบว่าผ้ามีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับดี-ดีมาก (4–5) เนื่องจากสารช่วยติดสีทำปฏิกิริยากับสีย้อมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ ความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับปานกลาง (3) และระดับต่ำ-ปานกลาง (2–3)

คำสำคัญ: การย้อมสีธรรมชาติ, ความคงทนของสี, ตะบูนขาว, เรยอน, สารช่วยติดสี

Abstract

In this work, natural dyeing conditions of rayon fabrics with tannin-rich dye powder extracted from *Xylocarpus granatum* bark were studied. Dyeing was carried out in an infrared dyeing machine. The mordants used were alum, blue vitriol, and tin(II) chloride. A pre-mordanting technique was used and the dye solutions were acidic. The dyed fabrics were reddish-brown. Using blue vitriol produced stronger reddish-brown whereas alum and tin (II) chloride produced a weak color similar to the unmordanted fabric. Dyeing conditions including temperature (70–90°C), time (45–60 min), dye concentration (5–25% owf), and mordant concentration (1–5% owf) were studied. It was found that increasing these parameters improved the color strength. Color fastness testing revealed that washing fastness ratings of all fabrics were good to excellent (4–5) because of insoluble complex formation between the mordant and the dye. Light fastness ratings were fair (3) and poor to fair (2–3).

Keywords: color fastness, mordant, natural dyeing, rayon, *Xylocarpus granatum*

คำนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติเริ่มกลับมาเป็นที่นิยม เนื่องจากผู้บริโภคมีความตื่นตัวด้านสิ่งแวดล้อม และใส่ใจเรื่องสุขภาพและความปลอดภัยในการเลือกซื้อสินค้ามากขึ้น ซึ่งแม้ว่าสีธรรมชาติจะมีคุณสมบัติหลายประการที่ด้อยกว่าสีสังเคราะห์ แต่ผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ย้อมด้วยสีธรรมชาติก็มีลักษณะเด่น คือ โทนสีที่อบอุ่นสบายตา และสีที่แตกต่างไปในผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้นก็กลายเป็นเอกลักษณ์ที่ดึงดูดผู้บริโภคบางกลุ่ม

เนื่องจากการย้อมผ้าจากเส้นใยเซลลูโลส เช่น เรยอน นั้น ประจุลบที่ผิวของเส้นใยและประจุลบของสีธรรมชาติจะมีผลให้เส้นใยดูดซึมสีได้ค่อนข้างน้อย และใช้เวลาในการย้อมนาน อีกทั้งความคงทนของสีที่ได้มักไม่สูงนัก ดังนั้นจึงมีการนำสารช่วยติดสี (Mordant) มาใช้เพื่อปรับปรุงความเข้มสีและความคงทนของสี โดยสารช่วยติดสีที่ใช้กันแพร่หลายคือเกลือของโลหะ เช่น เกลือของทองแดง อะลูมิเนียม เหล็ก และดีบุก (Broadbent, 2001)

สำหรับการย้อมแบบดูดซึม (Exhaust dyeing) เป็นการย้อมโดยให้สีเคลื่อนที่เข้าสู่ผ้า โดยการแช่หรือหมุนผ้าในอ่างย้อม จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ปัจจัยที่มีผลต่อสีที่ได้ ได้แก่ การละลายของสีย้อม การกวน อุณหภูมิของการย้อม ระยะเวลาของการย้อม ประจุและความชอบของสีกับเส้นใย ขนาดของโมเลกุลสี ความพรุนของเส้นใย ส่วนอสัณฐานของเส้นใย การบวมตัวของเส้นใย ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของเส้นใย เป็นต้น (Chakraborty, 2010)

งานวิจัยนี้เลือกใช้เส้นใยเรยอน เพราะเป็นเส้นใยที่ได้จากเซลลูโลส ที่นำมาเข้ากระบวนการใหม่ให้มีสมบัติการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าเส้นใยฝ้าย มีสัมผัสนุ่มสบาย ส่วนสีย้อมที่ใช้นั้นเลือกใช้สารสกัดจากเปลือกไม้ตะบูนขาว ซึ่งเป็นไม้ป่าชายเลนในระเทศไทย มีสารแทนนินเป็นองค์ประกอบหลัก โดยงานวิจัยนี้รายงานอิทธิพลของสารช่วยติดสีชนิดต่างๆ และสภาวะในการย้อมต่อค่าสีของผ้าที่ได้ในระบบซีไออีแล็บ (CIELAB) และทดสอบความคงทนของสีต่อการซักและแสง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและสารเคมี

1. เปลือกต้นตะบูนขาวจากป่าชายเลน พื้นที่หมู่ 3 และหมู่ 7 จังหวัดสมุทรสาคร
2. ผ้าเรยอนทอลายขัด จากตลาดสำเพ็ง (น้ำหนักต่อพื้นที่ 88.36 g/m^2 ทำความสะอาดด้วยผงซักฟอกมาตรฐาน)
3. สารส้ม (Aluminium potassium sulphate, $AlK(SO_4)_2.12H_2O$, เกรดวิเคราะห์) ผู้ผลิต Univar
4. จุนสี (Copper (II) sulfate, $CuSO_4.5H_2O$, เกรดวิเคราะห์) ผู้ผลิต Kemaus
5. ทิน (II) คลอไรด์ (Tin (II) chloride, $SnCl_2.2H_2O$, เกรดวิเคราะห์) ผู้ผลิต Fisher Scientific
6. ผงซักฟอกมาตรฐาน (AATCC 1993 Standard Reference Detergent WOB)

การผลิตผงสีสกัดจากเปลือกไม้ตะบูนขาว

นำเปลือกไม้ที่แห้งแล้วแช่น้ำอัตราส่วนเปลือกไม้ 1 กิโลกรัม ต่อน้ำ 5 ลิตร นาน 24 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C นาน 1 ชั่วโมง กรองแยกของแข็งและนำน้ำสีที่ได้ไปทำแห้งแบบพ่นละอองฝอยที่ 180°C

การเตรียมน้ำย้อม

นำสีผงมาละลายน้ำ (5–25% owf) และกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จะได้น้ำย้อมสีน้ำตาลแดง

การเตรียมสารละลายสารช่วยติดสี

นำสารช่วยติดสีไปละลายน้ำ (1–5% owf) กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง สารละลายสารส้มจะใสไม่มีสี สารละลายจุนสีมีสีฟ้าอ่อน ส่วนสารละลายทิน (II) คลอไรด์มีสีขาวขุ่นเล็กน้อย

กระบวนการพรีมอร์แดนท์

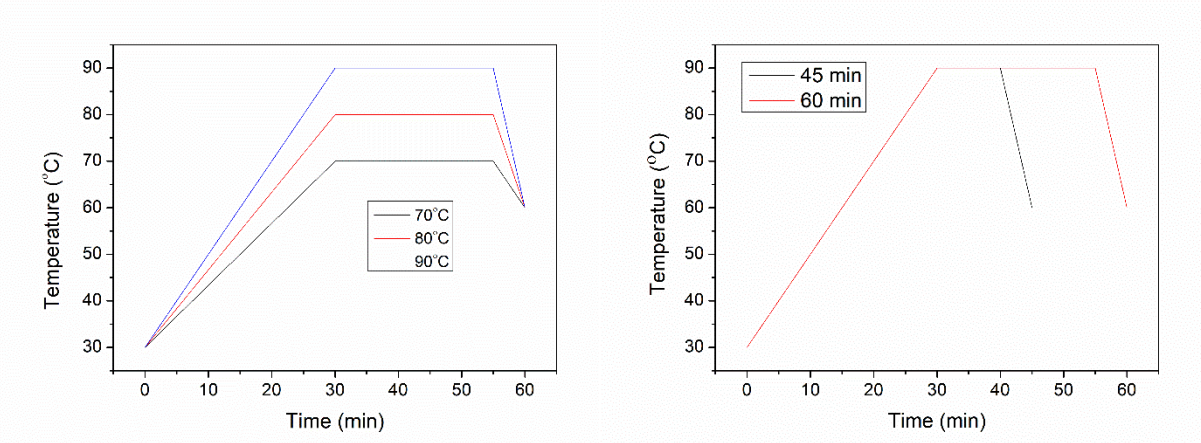
นำผ้าเรยอน (2.7 กรัม) ลงแช่ในสารช่วยติดสีที่ L:R 1:30 จากนั้นนำไปเข้าเครื่องย้อมระบบอินฟราเรด (Starlet DL-6000) เพิ่มอุณหภูมิจาก 30°C ไปที่ 80°C ภายในเวลา 10 นาที จากนั้นอยู่ที่ 80°C นาน 20 นาที แล้วจึงลดอุณหภูมิเหลือ 60°C ภายในเวลา 5 นาที เพื่อนำผ้าออกจากเครื่อง ตั้งค่าอัตราการหมุนของกระบอกบรรจุผ้าที่ 45 รอบต่อนาที

กระบวนการย้อมผ้า

ใช้เครื่องย้อมระบบอินฟราเรด ตั้งค่าการหมุนเช่นเดียวกับการทำพรีมอร์แดนท์ ตั้งค่าสภาวะต่างๆในการย้อมตาม Fig. 1 จากนั้นกำจัดสีส่วนเกินด้วยผงซักฟอกมาตรฐานเข้มข้น 2 g/L ใช้ค่า L:R 1:30 อุณหภูมิ 60°C นาน 20 นาที

การวิเคราะห์ทดสอบ

ทำการวัดค่าสีโดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (GretagMacbeth color i5) เลือกผ้าที่ย้อมด้วยสีย้อมเข้มข้น 25% owf และสารช่วยติดสี 5% owf ย้อมที่อุณหภูมิ 90°C ระยะเวลาการย้อมรวม 60 นาที มาทดสอบความคงทนของสีต่อการซักตามมาตรฐาน ISO 105-C10:2006 (E) Method A1 และความคงทนของสีต่อแสงตามมาตรฐาน ISO 105-B02:2014



(A) (B)

Fig. 1 Dyeing conditions; (A) varying temperature between 70-90°C; and (B) varying time at 45 min and 60 min

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

Table 1 แสดงค่าสีในระบบ CIELAB เมื่อย้อมผ้าเรยอนด้วยน้ำสีเข้มข้น 5-25% owf และทำการพรีมอร์แดนท์โดยใช้สารช่วยติดสีต่างๆ ความเข้มข้น 5% owf พบว่า ผ้าที่ได้มีสีน้ำตาล โดยเฉดสีไม่ต่างกันมากนัก สีมีความสม่ำเสมอดี และความเข้มสี (*K/S*) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีที่ใช้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความสว่าง (*L**) ที่ต่ำลง เนื่องจากเมื่อปริมาณโมเลกุลของสีในน้ำย้อมเพิ่มมากขึ้น ย่อมทำให้การดูดซับสีย้อมของผ้าเกิดได้มากขึ้น

กรณีที่ไม่ใช้สารช่วยติดสี หรือใช้สารช่วยติดสีชนิดสารส้ม และดีบุก จะได้ผ้าที่มีสีน้ำตาลอ่อน แต่กรณีที่ใช้จุนสี พบว่า ผ้าจะมีสีน้ำตาลเข้ม และเฉดสีแตกต่างจากตัวอย่างอื่นๆ เล็กน้อย เห็นได้จากค่า h^o ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ ส่วนค่า *K/S* ของการใช้จุนสีก็สูงกว่าตัวอย่างอื่นเช่นกัน เฉดสีที่แตกต่างกันจากการใช้สารช่วยติดสีต่างชนิดกันนั้นเกิดจากศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ของไอออนโลหะที่เป็นค่าเฉพาะตัว เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับโมเลกุลสีย้อมซึ่งเป็นสารอินทรีย์ จะมีผลให้ช่องว่างของระดับพลังงานสารประกอบเชิงซ้อนนี้เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับการดูดกลืนแสงของโมเลกุลสีย้อมอิสระ และเปลี่ยนไปขึ้นกับชนิดของไอออนโลหะ ซึ่งส่งผลต่อการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และสีที่ได้อาจแตกต่างไปจากผ้าที่ย้อมโดยไม่ใช้สารช่วยติดสี

Table 2 แสดงค่าสีของผ้าที่ย้อมโดยใช้น้ำสีที่ความเข้มข้น 25% owf และทำการพรีมอร์แดนท์ผ้าก่อนการย้อม โดยใช้สารช่วยติดสีที่ความเข้มข้นในช่วง 1% - 5% owf พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยติดสีสูงขึ้นมีผลให้สีที่ได้เข้มขึ้นในทุกกรณี อธิบายได้ว่า ปริมาณโมลกุลของสารช่วยติดสีที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ผ้าในกระบวนการพรีมอร์แดนท์มากขึ้น เมื่อผ้าเข้าสู่กระบวนการย้อมจึงเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสีย้อมได้มากขึ้น ทำให้สีมีความเข้มสูงขึ้น

Table 3 แสดงผลของอุณหภูมิในการย้อมต่อค่าสีที่ได้ พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ผ้ามีความเข้มสีมากขึ้น เห็นได้จากค่า *K/S* ที่สูงขึ้น เนื่องจากพลังงานความร้อนจะช่วยเร่งการดูดซึมสีย้อมเข้าสู่ผ้า และช่วยให้เส้นใยบวมตัวนำสีย้อมเข้าสู่เส้นใยได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ali et al. (2007)

Table 4 แสดงผลของเวลาในการย้อมต่อค่าสีที่ได้ โดยปรับเวลาในการย้อมช่วงอุณหภูมิ 90°C เป็นสองช่วงเวลาคือ 10 นาที และ 25 นาที (Fig. 1) ทำให้ระยะเวลารวมในการย้อมเป็น 45 และ 60 นาที ตามลำดับ พบว่าผ้าจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อเวลาในการย้อมนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ali et al. (2007)

Table 5 ความคงทนของสีต่อการซัก ในด้านการเปลี่ยนแปลงของสีผ้า พบว่า ผ้าทั้งหมดมีระดับความคงทนดี-ดีมาก (4–5) ไม่ว่าจะใช้สารช่วยติดสีหรือไม่ แต่ด้านการเปื้อนสีผ้า พบว่าส่วนใหญ่อยู่ในระดับดี-ดีมาก (4–5) นั่นคือแทบไม่ปรากฏการติดสีบนผ้าอื่น ยกเว้นบนผ้าฝ้าย ซึ่งผ้าที่ไม่ใช้สารช่วยติดสี และผ้าที่ใช้สารช่วยติดสีชนิดสารส้มและทิน (II) คลอไรด์ มีการเปื้อนสีเพียงเล็กน้อย อยู่ในระดับดี (4) ขณะที่จุนสีนั้น นอกจากจะให้สีที่เข้มที่สุดแล้วยังให้ความคงทนของสีต่อการซักดีที่สุดด้วย

Table 6 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง จะเห็นว่าผ้าที่ไม่ใช้สารช่วยติดสี และผ้าที่ใช้สารช่วยติดสีชนิดสารส้ม ได้ความคงทนระดับปานกลาง (3) ส่วนสารยึดติดชนิดจุนสีและทิน (II) คลอไรด์ให้ความคงทนระดับต่ำ-ปานกลาง (2–3) นั่นคือสารช่วยติดสีไม่เพิ่มความคงทนของสีต่อแสงสำหรับสีธรรมชาติชนิดนี้ ซึ่ง

สอดคล้องกับผลการทดสอบผ้าฝ้ายที่ย้อมสีชนิดเดียวกันที่คณะผู้วิจัยได้เคยรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Pisitsak et al., 2016)

Table 1 Effects of dye concentration on the color parameters of the dyed rayon fabrics (mordant conc. 5% owf, dyeing temperature 90°C, total dyeing time 60 min, L:R 1:30)

Mordant	Dye concentration (% owf)	*L**	*a**	*b**	*C**	h^o	*K/S*	Fabric image
No mordant	5	75.69	9.59	1.06	9.65	6.29	0.66	
	10	71.74	11.81	4.12	12.51	19.25	0.91	
	15	70.00	12.44	5.39	13.56	23.40	0.98	
	25	65.37	13.33	10.85	17.18	39.14	1.79	
$AlK(SO_4)_2$	5	70.62	12.15	4.07	12.81	18.50	0.85	
	10	66.14	13.19	6.48	14.69	26.15	1.16	
	15	57.63	14.72	11.26	18.54	37.40	2.06	
	25	56.63	15.75	12.17	19.90	37.70	2.48	
$CuSO_4$	5	59.02	9.72	13.89	16.95	55.02	2.42	
	10	54.33	12.22	14.56	19.01	49.99	3.05	
	15	51.41	13.07	15.15	20.01	49.22	3.64	
	25	48.39	16.01	16.27	22.83	45.45	4.55	
$SnCl_2$	5	67.71	12.85	7.66	14.96	30.81	1.40	
	10	62.73	14.74	9.67	17.63	33.27	1.83	
	15	60.86	15.43	10.11	18.44	33.23	1.99	
	25	56.79	16.23	12.95	20.76	38.59	2.67	

Table 2 Effects of mordant concentration on the color parameters of the dyed rayon fabrics (dye conc. 25% owf, dyeing temperature 90°C, total dyeing time 60 min, L:R 1:30)

Mordant	Mordant conc. (% owf)	*L**	*a**	*b**	*C**	h^o	*K/S*	Fabric image
No mordant	0	65.37	13.33	10.85	17.18	39.14	1.79	
$AlK(SO_4)_2$	1	59.67	15.22	10.55	18.52	34.72	1.95	
	2.5	59.63	15.20	10.29	18.35	34.10	1.87	
	5	56.63	15.75	12.17	19.90	37.70	2.48	
$CuSO_4$	1	53.88	14.97	13.74	20.32	42.55	2.98	
	2.5	51.24	15.07	14.76	21.09	44.40	3.56	
	5	48.39	16.01	16.27	22.83	45.45	4.55	
$SnCl_2$	1	60.69	15.55	10.19	18.59	33.24	2.03	
	2.5	59.16	16.27	10.62	19.43	33.13	2.11	
	5	56.79	16.23	12.95	20.76	38.59	2.67	

Table 3 Effects of dyeing temperature on the color parameters of the dyed rayon fabrics (mordant conc. 5% owf, dye conc. 25% owf, total dyeing time 60 min, L:R 1:30)

Mordant	Temperature	*L**	*a**	*b**	*C**	h^o	*K/S*	Fabric image
No mordant	70°C	66.91	12.48	9.07	15.43	36.02	1.34	
	80°C	66.75	13.22	9.84	16.48	36.66	1.37	
	90°C	65.37	13.33	10.85	17.18	39.14	1.79	
$AlK(SO_4)_2$	70°C	63.41	14.17	6.66	15.66	17.46	1.35	
	80°C	60.20	15.06	8.25	17.17	20.43	1.65	
	90°C	56.63	15.75	12.17	19.90	37.70	2.48	

Table 3 (continued).

$CuSO_4$	70°C	54.35	14.54	9.67	17.46	33.62	2.65	
	80°C	50.86	15.63	13.16	20.43	40.09	3.47	
	90°C	48.39	16.01	16.27	22.83	45.45	4.55	
$SnCl_2$	70°C	60.75	15.71	9.58	18.40	31.38	1.96	
	80°C	60.88	16.06	9.53	18.68	30.69	1.92	
	90°C	56.79	16.23	12.95	20.76	38.59	2.67	

Table 4 Effects of dyeing time on the color parameters of the dyed rayon fabrics (mordant conc. 5% owf, dye conc. 25% owf, dyeing temperature 90°C, L:R 1:30)

Mordant	Dyeing time	*L**	*a**	*b**	*C**	h^o	*K/S*	Fabric image
No mordant	45 min	66.64	13.26	10.91	17.17	39.45	1.41	
	60 min	65.37	13.33	10.85	17.18	39.14	1.79	
$AlK(SO_4)_2$	45 min	61.99	14.41	7.23	16.13	26.65	1.47	
	60 min	56.63	15.75	12.17	19.90	37.70	2.48	
$CuSO_4$	45 min	50.09	15.17	14.45	20.95	43.60	3.68	
	60 min	48.39	16.01	16.27	22.83	45.45	4.55	
$SnCl_2$	45 min	59.60	15.91	9.76	18.67	31.53	2.04	
	60 min	56.79	16.23	12.95	20.76	38.59	2.67	

Table 5 Color fastness to washing (ISO 105-C10 : 2006 (E) Method A(1))

Fastness properties	Mordant type			
	No mordant	$AlK(SO_4)_2$	$CuSO_4$	$SnCl_2$
Color change	4-5	4-5	4-5	4-5
Color staining				
- Acetate, nylon, polyester, acrylic, wool	4-5	4-5	4-5	4-5
- Cotton	4	4	4-5	4

Table 6 Color fastness to light (ISO105-B02: 2014(E) exposure cycle A2)

Fastness properties	Mordant type			
	No mordant	$AlK(SO_4)_2$	$CuSO_4$	$SnCl_2$
Light	3	3	2-3	2-3

สรุป

ผ้าเรยอนที่ได้จากการย้อมมีสีน้ำตาล การใช้สารช่วยติดสีชนิดจุนสีจะทำให้ได้ความเข้มสีและความคงทนต่อการซักด้านการติดเปื้อนสีสูงกว่าสารส้มและทิน (II) คลอไรด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมหรือสารช่วยติดสี รวมถึงอุณหภูมิและเวลาในการย้อมจะได้สีของผ้าเข้มขึ้น สารช่วยติดสีไม่มีผลปรับปรุงความคงทนของสีต่อการซักด้านการเปลี่ยนสี โดยทุกตัวอย่างอยู่ในระดับดี-ดีมาก (4-5) แต่ในด้านการเปื้อนสีบนผ้าฝ้ายนั้น จุนสีช่วยปรับปรุงให้อยู่ในระดับดี-ดีมาก (4-5) ขณะที่ตัวอย่างอื่นได้ระดับดี (4) สารช่วยติดสีไม่เพิ่มความคงทนของสีต่อแสงสำหรับสีธรรมชาติชนิดนี้ โดยจุนสีให้ระดับความคงทนต่ำลงเล็กน้อย ที่ต่ำ-ปานกลาง (2-3) ขณะที่ตัวอย่างอื่นๆ อยู่ที่ระดับปานกลาง (3)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านเคมีสิ่งทอและพอลิเมอร์แห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Ali, S., Nisar, N., Hussain, T. 2007. Dyeing properties of natural dyes extracted from eucalyptus. J. Text I 98(6): 559–562. doi.org/10.1080/00405000701556079

Broadbent A.D. 2001. Basic Principles of Textile Coloration. Society of Dyers and Colourists. West Yorkshire, UK. pp. 1–3, 179-190.

Chakraborty, J.N. 2014. Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles. Woodhead Publishing India PVT LTD. New Delhi, India. pp. 1–10.

Pisitsak, P., Hutakamol, J., Jeenapak, S., Wanmanee, P., Nuammaiphum, J., Thongcharoen, R. 2016. Natural dyeing of cotton with Xylocarpus granatum bark extract: Dyeing, fastness, and ultraviolet protection properties. Fiber. Polym. 17: 560–568. doi.org/10.1007/s12221-016-5702-x

Vankar, P.S. 2017. Natural Dyes for Textiles: Sources, Chemistry and Applications. Woodhead Publishing. Cambridge, UK. pp 108–109.

การสำรวจพฤติกรรมของผู้บริโภคมังสวิรัติในเขตกรุงเทพมหานครและทัศนคติของผู้บริโภคต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช

Survey of vegetarian dietary behaviors in Bangkok and consumers attitudes on the characteristics of meat analogue from plant

ชนิกานต์ กล่อมลุกษ์[a], ปารเมศ วรเศยานนท์[b], ศิวาพร โอเจริญ[a,*]

Chanikan Klomlerk[a], Parameth Vorasyanont[b], Siwaporn O'Charoen[a,*]

[a]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[a]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Graduate School of Management and Innovation, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

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

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจพฤติกรรมการบริโภค และทัศนคติของผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติต่อเนื้อเทียมจากพืช เพื่อเป็นข้อมูลพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมสำหรับผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติ โดยทำการวิจัยเชิงสำรวจ ใช้แบบสอบถามแบบมีโครงสร้างเก็บข้อมูลกลุ่มผู้บริโภคจำนวน 450 คน นำข้อมูลวิเคราะห์หา ร้อยละ ค่ากลาง ค่าเฉลี่ย และทดสอบสมมติฐานในด้านความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยส่วนบุคคลมีผลต่อพฤติกรรมการบริโภคและระดับความสำคัญต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มผู้บริโภคเป็นส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง อายุมากกว่า 45 ปี บริโภคอาหารมังสวิรัติมานานกว่า 1 ปี เหตุผลในการบริโภคต้องการมีสุขภาพที่ดีและลดการฆ่าสัตว์ ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับโภชนาการและสุขภาพมากที่สุด เช่น โปรตีนสูง เส้นใยอาหารสูง ช่วยระบบขับถ่าย ควบคุมคอเลสเตอรอลชนิด LDL การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมานพบว่า เพศ อายุ การศึกษา อาชีพ มีผลต่อระดับความสำคัญของผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ: เนื้อเทียม, โปรตีนจากพืช, ผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติ, ผลิตภัณฑ์มังสวิรัติ

Abstract

This study aimed to survey consumption behavior and vegetarian dietary attitudes toward consuming meat analogue. For information on the development of artificial meat for the vegetarian diet. The 450 vegetarian consumers were surveyed using questionnaires, then analyzed the percentage, mean, mean, and test the hypothesis on the relationship between personal factors affecting consumption behavior and the level of importance to product features. The results showed that most of the consumers were female at the age over 45 years consuming vegetarian food for more than 1 year. The reasons for consuming vegetarian food were for good health and less animal killing. The consumers paid the most attentions on nutrition and health's effect of the meat analogue, for example, high protein, high fiber, supporting defecation, and controlling level of LDL cholesterol. Furthermore, the inferential analysis of the data found that gender, age, and education levels affected occupation affected the level of product importance.

Keywords: meat analogue, plant-based protein, vegetarian food consumers, vegetarian products

คำนำ

ปัจจุบันการบริโภคอาหารมังสวิรัติในไทยเติบโตต่อเนื่อง โดยคนไทยลดการบริโภคเนื้อสัตว์และรับประทานโปรตีนจากพืชมากขึ้น เช่น ผักใบเขียวและถั่ว (กรมพัฒนาธุรกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์, 2561) อีกทั้งตลาดของผลิตภัณฑ์จากพืช(Plant-Based Food) ที่มีส่วนผสมจากพืชมีอัตราการเจริญเติบโตที่ร้อยละ 12 ต่อปี (อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิเพื่อสถาบันอาหาร, 2562) ดังนั้นผู้ประกอบธุรกิจอาหารจึงควรศึกษาพฤติกรรมของผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติ เพื่อสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค (Bangkok bank SME, 2563) การทำวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติและการให้ความสำคัญในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชและนำข้อมูลไปพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมสำหรับกลุ่มมผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติ

ประชากรศาสตร์เป็นแนวคิดที่บ่งบอกลักษณะเฉพาะของแต่ละบุคคลที่แตกต่างกันจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันไป ซึ่งพฤติกรรมเป็นการกระทำที่บ่งบอกถึงการตัดสินใจ การเลือกซื้อผลิตภัณฑ์หรือการใช้บริการและทัศนคติของผู้บริโภคแสดงออกถึงความเชื่อ ความต้องการผลิตภัณฑ์ ดังนั้นรับรู้พฤติกรรมและทัศนคติของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายจึงจะสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่อรรถประโยชน์และมีคุณค่า เพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคได้ จากการศึกษาแนวความคิดทั้ง 3 ทฤษฎีประชากรศาสตร์ พฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคและผลิตภัณฑ์ ผู้ทำวิจัยได้นำมาใช้เป็นกรอบแนวความคิดในการวิจัย โดยข้อมูลประชากรศาสตร์ของผู้บริโภคมังสวิรัติที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อพฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการวิเคราะห์สามารถทราบถึงพฤษติกรรมความต้องการผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาประชากร พฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติ

การวิจัยในรูปแบบการวิจัยเชิงสำรวจโดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยคำนวณหาจากสูตรกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรโดยใช้สูตรของ คอแครน W.G. Cochran ปี 1977 ขนาดตัวอย่างจำนวน 385 คน ที่ระดับความเชื่อมั่น ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างประชากรทั้งสิ้น 450 ตัวอย่าง โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง พิจารณาจากผู้ที่เคยบริโภคอาหารมังสวิรัติ ในเขตกรุงเทพมหานคร (กัลยา, 2546) ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ใช้แบบสอบถามแบบมีโครงสร้างปลายปิดเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูล

เก็บข้อมูลการวิจัยจากผู้บริโภคผ่านแบบทดสอบออนไลน์ 400 คน โดยกระจายแบบทดสอบ ในกลุ่มมังสวิรัติและวีแกน เช่น vegan of Thailand และกลุ่มThailand Vegetarian Society เป็นต้น และเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ สถานที่ชมรมมังสวิรัติแห่งประเทศไทย สาขาสันติอโศก 50 คน ในช่วงเดือน มีนาคม พ.ศ.2563

การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ ข้อมูลประชากรศาสตร์ พฤติกรรมการรับประทานอาหารมังสวิรัติ วิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาสถิติในรูปความถี่ ร้อยละ และการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของทัศนคติของผู้บริโภคต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยใช้การคำนวนค่าเฉลี่ยและระดับความสำคัญที่ผู้บริโภคให้กับแต่ละคำถาม และวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมานในการวิเคราะห์ปัจจัยส่วนบุคคลที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับประทาน ใช้การทดสอบไคสแควร์ของ Pearson ทดสอบความเป็นอิสระในการตรวจสอบสมมติฐาน และวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมโดยใช้ตารางแจกแจงความถี่ วิเคราะห์ปัจจัยส่วนบุคคลที่แตกต่างกันมีผลต่อระดับ

ความสำคัญของทัศนคติที่ผู้บริโภคมีต่อผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (ภควรรณ, 2552)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ข้อมูลประชากรศาสตร์

จากการสำรวจประชากรจำนวน 450 ท่าน Table 1 แสดงข้อมูลประชากรศาสตร์ผู้ตอบแบบสอบถาม ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง ช่วงอายุ 45–54 ปี รับอาชีพพนักงาน/ลูกจ้างเอกชน ระดับการศึกษาปริญญาตรี/เทียบเท่า สถานภาพโสด รายได้เฉลี่ยต่อเดือน 50,000 บาท ขึ้นไป

Table 1 Demographic data of the sample

Gender	Percentage	Status	Percentage
Female	76.40	Single	48.67
Male	23.60	Marriage	43.33
Age	Percentage	Divorce	8.00
18 - 24 years	5.10	Education level	Percentage
25 - 30 years	18.40	High school	6.90
31 - 35 years	8.00	Diploma	10.40
36 - 44 years	12.00	Bachelor’s Degrees	60.90
45 - 54 years	34.90	Master’s Degrees, Doctoral Degrees	21.80
55 years and over	21.60	Occupation	Percentage
Salary	Percentage	Student	4.22
Not more than 10,000 baht	9.78	Personnel / Private employee	32.44
10,001 – 20,000 baht	13.33	Agriculturist	1.11
20,001 – 30,000 baht	20.89	Private business	15.11
30,001 – 40,000 baht	9.78	Public servant	7.33
40,001 – 50,000 baht	10.00	State enterprise employee	31.33
50,001 baht or more	36.22	Housekeeper	8.44

พฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติ

Table 2 แสดงพฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติของผู้ตอบแบบสอบถามพบว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่มีความถี่ที่ไม่แน่นอนในการบริโภคอาหารมังสวิรัติ สอดคล้องกับงานวิทยานิพนธ์ของสักรินทร์ (2550) พบว่ากลุ่มผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติส่วนใหญ่รับประทานอาหารมังสวิรัติในโอกาสไม่แน่นอน ปัญหาของผู้บริโภคในการบริโภคอาหารมังสวิรัติคือสถานที่จำหน่ายอาหารมังสวิรัติมีปริมาณน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของของอรุโณทัย (2552) พบว่าปัญหาอาหารมังสวิรัติหาซื้อยาก สถานที่จำหน่ายน้อย ถาวร (2552) พบว่าผู้บริโภคมังสวิรัติ

ส่วนใหญ่รับประทานอาหารมังสวิรัติน้อยกว่า 10 วันต่อเดือน เนื่องจากสถานที่จำหน่ายอาหารมังสวิรัติมีสถานที่จำหน่ายน้อย

ราคา อาหารมังสวิรัติที่รับประทาน ต่อ 1 อย่าง การซื้อของผู้บริโภค ราคาที่ผู้บริโภคซื้อมากที่สุด คือ ระหว่าง 36–45 บาท ซึ่งสอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ของนัยนา (2555) พบว่าค่าใช้จ่ายต่อมื้อในการบริโภคอาหารมังสวิรัติ น้อยกว่า 100 บาท ดังนั้นราคาผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 55 บาท ต่อ 1 อย่างเป็นราคาที่ผู้บริโภคยอมรับ

สถานที่เลือกซื้ออาหารมังสวิรัติของผู้บริโภคมากที่สุด เลือกซื้อจากร้านอาหารมังสวิรัติ สอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ของสักรินทร์ (2550) ผู้บริโภคส่วนใหญ่ซื้อจากร้านขายอาหารมังสวิรัติ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมาควรวางจำหน่ายในร้านขายอาหารมังสวิรัติเป็นหลักและขยายการวางจำหน่ายไปยังร้านขายอาหารทั่วไปและซูเปอร์มาร์เก็ตเพื่อดึงดูดกลุ่มผู้บริโภครายใหม่

Table 2 Vegetarian dietary behaviors

Consumption frequency	Percentage	Distribution	Percentage
Every day	19.11	Vegetarian restaurant	39.78
1-2 times / week	10.89	Restaurant	18.11
1-2 times / month	10.67	Supermarket	17.42
Uncertain	59.33	Fresh market	24.69
Duration of food intake	Percentage	Meal	Percentage
Less than 1 month	30.89	Breakfast	26.75
1 - 6 months	11.33	Lunch	25.37
7 – 12 months	12.22	Dinner	23.89
More than 1 year	38.96	Food during the day	12.00
Duration of food intake	Percentage	Meal	Percentage
More than 5 year	8.67	Snack	12.00
Price of the purchase	Percentage	Reason to selected	Percentage
Less than 35 baht	9.78	To observe the precepts	9.10
36 - 45 baht	38.00	Reduce killed animals	16.36
46 - 55 baht	26.89	Psychological happiness	11.58
56 -65 baht	10.00	Good health	16.43
66 - 75 baht	4.22	Protect the environment	6.35
76 - 85 baht	3.78	Prevent disease	11.39
86 - 95 baht	1.56	Cure disease	3.73
96 - 105 baht	4.22	Good skin	3.53
More than 105 baht	1.56	Lose weight	7.72
Influential person	Percentage	Cultures inherited	2.09
Myself	67.71	Trend	1.96
Family	23.73	Economical price	1.96
Friend	8.55	Taste like normal food	3.40
		Balanced diet	4.38

ทัศนคติของผู้บริโภคต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช

จากTable 3 ทัศนคติของผู้บริโภคต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชพบว่าผู้บริโภคให้ระดับความสำคัญต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับมาก 15 คุณลักษณะ โดยเกี่ยวข้องกับคุณค่าทางโภชนาการ ลักษณะปรากฏ กลิ่น และเนื้อสัมผัส และพบ 1 คุณลักษณะอยู่ในระดับสำคัญปานกลาง คือ ความฉ่ำของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์เชิงอนุมานอิทธิพลของปัจจัยส่วนบุคคลกับพฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติ

สมมติฐานหลัก (H_0): ปัจจัยส่วนบุคคลไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับการตัดสินใจบริโภคอาหารมังสวิรัติ

สมมติฐานรอง (H_1): ปัจจัยส่วนบุคคลมีผลต่อพฤติกรรมการตัดสินใจรับการบริโภคอาหารมังสวิรัติ

Table 3 Average number and level of significance to artificial meat product characteristics

Product characteristics	Mean	Priority	Product characteristics	Mean	Priority
1. Meat substitution	4.07	High	9. High calcium	3.79	High
2. High protein	4.06	High	10. Iron supplement	3.73	High
3. Helps to excrete	4.00	High	11. Muscle supplement	3.68	High
4. Fat free	3.99	High	12. Odorless beans	3.68	High
5. Fully	3.93	High	13. Like meat after cooked	3.60	High
6. High fiber	3.92	High	14. Unlike meatballs	3.54	High
7. Low calories	3.92	High	15. Meat-like color	3.53	High
8. Vitamin B12	3.83	High	16. Juiciness	3.37	Medium

จาก Table 4 พบว่าผลการทดสอบสมมติฐานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปฏิเสธสมมติฐานหลัก หรือปัจจัยส่วนบุคคลมีผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติอย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติ

เพศมีผลต่อเหตุผลในการตัดสินใจเลือกรับประทานอาหารมังสวิรัติ โดยเพศหญิงเลือกซื้ออาหารมังสวิรัติเพื่อลดการฆ่าสัตว์มากกว่าเพศชาย

ช่วงอายุมีผลต่อความถี่ในการรับประทานอาหารมังสวิรัติโดยส่วนใหญ่อายุ 45–54 ปี ความถี่ในการรับประทานไม่แน่นอน อายุ 55 ปีขึ้นไป เลือกรับประทานอาหารมังสวิรัติทุกวันมากกว่าช่วงอายุอื่น รับประทานอาหารมังสวิรัติระยะเวลามากกว่า 1 ปี ราคาในการซื้ออาหารมังสวิรัติซื้อในราคาระหว่าง 36–45 บาท รับประทานมังสวิรัติเพื่อร่างกายมีสุขภาพที่ดี รักษาศีล และลดความเสี่ยงโรคภัยเฉลี่ย ผู้มีอิทธิพลต่อการการเลือกซื้ออาหารอายุ 18–24 ปี ครอบครัวมีอิทธิพลในการเลือกซื้อซึ่งสอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ของนัยนา (2555) โดยช่วงอายุวันรุ่นอิทธิพลในการเลือกซื้อคือครอบครัว

ระดับการศึกษามีผลต่อความถี่ในการรับประทานโดยระดับการศึกษาปริญญาตรีโดยรับประทาน 1–2 ครั้ง/เดือน ราคาในการซื้ออาหารมังสวิรัติระดับปริญญาตรี อยู่ในช่วงราคาซื้อระหว่าง 36-45 บาท การรับประทานอาหารช่วงเวลาแตกต่างกันพบว่าช่วงระดับการศึกษามัธยมศึกษา/เทียบเท่า รับประทานอาหารทานเล่น (ขนมขบเคี้ยว) ระดับสูงกว่าปริญญาตรีรับประทานช่วงมื้อเช้า

อาชีพมีผลต่อความถี่ในการรับประทานโดยพนักงานรัฐวิสาหกิจ และพนักงาน/ลูกจ้างเอกชนเลือกรับประทานไม่แน่นอน ระยะเวลาในการบริโภคพนักงานรัฐวิสาหกิจส่วนใหญ่รับประทานมากกว่า 1 ปี เลือกซื้ออาหารในราคา 36–45 บาท มากที่สุด และมีเหตุผลในการรับประทานอาหารมังสวิรัติเพื่อลดการฆ่าสัตว์มากที่สุด การเลือกรับประทานอาหารพบว่าอาชีพพนักงานรัฐวิสาหกิจเลือกรับประทานมื้อเช้าและเลือกซื้ออาหารจากร้านอาหารมังสวิรัติมากที่สุด นักเรียน/นักศึกษาครอบครัวมีอิทธิพลในการเลือกซื้อเป็นส่วนมาก

สถานภาพมีผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติ เหตุผลในการตัดสินใจในการเลือกรับประทานอาหารมังสวิรัติ เพื่อร่างกายมีสุขภาพที่ดี สถานภาพโสดเลือกรับประทานส่วนใหญ่เลือกไม่รับประทานช่วงเช้า

รายได้ต่อเดือนของผู้บริโภคมีผลต่อพฤติกรรมการบริโภคโดยรายได้เฉลี่ย 50,001 บาทขึ้นไปมีความถี่ในการรับประทานไม่แน่นอน ระยะเวลารับประทานมากกว่า 1 ปี เลือกซื้อที่ร้านอาหารมังสวิรัติ

การวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างปัจจัยส่วนบุคคลกับการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ "เนื้อเทียมจากพืช "ในด้านต่างๆ

สมมติฐานหลัก (H_0): ปัจจัยส่วนบุคคลที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์

สมมติฐานรอง (H_1): ปัจจัยส่วนบุคคลที่แตกต่างกัน มีผลต่อการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์

Table 4 The independence of individual factors to vegetarian dietary behaviors

Vegetarian dietary behaviors.	Gender		Age		Education level		Occupation		Status		Salary	
	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ
Consumption frequency			45.94	0.00*	21.41	0.01*	81.14	0.00*	11.47	0.04*	55.88	0.00*
Duration of food intake			65.29	0.00*			50.81	0.00*	24.19	0.00*	43.72	0.00*
Price of the purchase.			52.98	0.04*	48.75	0.00*	93.24	0.00*	39.67	0.00*	71.98	0.00*
Reason to selected												
- Good health			18.01	0.00*					9.46	0.00*		
- Reduce killed animals	11.08	0.00*					10.64	0.05*	12.10	0.00*		
- Prevent disease			18.63	0.00*								
- To observe the precepts			9.30	0.04*								
Meal- Breakfast			20.90	0.00*	8.14	0.02*	18.97	0.00*	6.79	0.02*	9.38	0.04*
- Lunch			11.93	0.01*								

Table 4 (continued).

Vegetarian dietary behaviors.	Gender		Age		Education level		Occupation		Status		Salary	
	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ	X^2	ρ
- During the day			10.07	0.02*			25.86	0.00*			23.05	0.00*
- Snack			9.30	0.04*	8.65	0.02*					9.28	0.04*
Distribution Vegetarian			27.16	0.00*			16.73	0.01*	11.40	0.00*	19.48	0.00*
- Fresh market			10.58	0.03			31.50	0.00*			21.87	0.03*
Influential - Myself			14.07	0.01*			15.26	0.01*				
- Family			12.98	0.01*			25.67	0.00*			10.54	0.03*
- Friend											9.48	0.04*

* $p < 0.05$

จาก Table 5 พบว่าผลการทดสอบสมมติฐานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปฏิเสธสมมติฐานหลัก หรือปัจจัยส่วนบุคคลที่แตกต่างกัน มีผลต่อการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ อย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติ

เพศที่แตกต่างมีผลต่อการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเพศหญิงให้ความสำคัญในด้านผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชสามารถทดแทนเนื้อสัตว์ได้อยู่ในระดับสำคัญมากกว่าเพศชาย

ช่วงอายุที่แตกต่างมีผลต่อการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าช่วงอายุ 45–54 ปี ผลิตภัณฑ์ควรมีแคลเซียม เสริมธาตุเหล็ก มีวิตามินบี 12 และปราจากไขมันเพื่อควบคุมคอเลสเตอรอล

ระดับการศึกษาที่แตกต่างมีผลต่อการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรีให้ระดับความสำคัญมากกว่า ระดับการศึกษาปริญญาตรี/เทียบเท่าในเรื่องผลิตภัณฑ์มีเส้นใยสูง เสริมสร้างกล้ามเนื้อ สามารถทดแทนเนื้อสัตว์ วิตามิน บี 12 และไม่มีกลิ่นถั่ว

อาชีพที่แตกต่างมีผลต่อการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยอาชีพพนักงานรัฐวิสาหกิจให้ระดับความสำคัญมากในเรื่องผลิตภัณฑ์มีเส้นใยสูง เสริมธาตุเหล็ก

รายได้เฉลี่ยต่อเดือนแตกต่างกันมีผลต่อการให้ความสำคัญคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดย 40,001–50,000 บาท ให้ระดับความสำคัญมากที่สุดเรื่องผลิตภัณฑ์มีโปรตีนสูง มีวิตามินบี 12 เสริมสร้างกล้ามเนื้อ และให้ความอิ่มท้อง มีแคลเซียม เสริมธาตุเหล็ก ควบคุมน้ำหนักแคลอรีต่ำและคอเลสเตอรอล ด้านสีน้ำตาลอ่อน คล้ายสีของเนื้อสัตว์ และความฉ่ำ คล้ายเนื้อสัตว์ และรายได้ มากกว่า 50,001 บาทให้ระดับความสำคัญมากที่สุดเรื่องผลิตภัณฑ์เส้นใยสูง สามารถทดแทนเนื้อสัตว์และให้ระดับความสำคัญมากผลิตภัณฑ์ไม่มีกลิ่นของถั่ว

Table 5 The differences between individual factors on the level of significance of product

Attributes of vegetarian food	Gender		Age		Education level		Occupation		Salary	
	t	ρ	F	ρ	F	ρ	F	ρ	F	ρ
Meat substitution	2.48	0.01*					3.42	0.00*	2.51	0.03*
High protein							4.22	0.00*	4.21	0.00*
Helps to excrete			2.48	0.03*	3.07	0.03*	2.43	0.03*	4.49	0.00*
Control cholesterol			2.50	0.03*			3.79	0.00*	3.64	0.00*
Iron supplement			3.20	0.01*			3.91	0.00*		
Fully							4.15	0.00*	7.43	0.00*
High fiber			3.09	0.01*	3.23	0.02*	2.83	0.01*	8.50	0.00*
Vitamin B12			4.03	0.00*	3.39	0.02*	4.13	0.00*	10.28	0.00*
High calcium			4.28	0.00*			5.17	0.00*	7.19	0.00*
Reduce anemia									7.09	0.00*
Muscle supplement					3.96	0.01*	2.56	0.02*	3.64	0.00*
Weight control, low calories							2.44	0.02*	2.91	0.01*
Odorless beans					2.92	0.03*			2.29	0.04*
Unlike meatballs									2.86	0.01*
Meat-like color									3.76	0.00*
Juiciness							2.72	0.01*	2.97	0.01*

* $p < 0.05$

สรุป

การสำรวจพฤติกรรมของผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติในเขตกรุงเทพมหานครและทัศนคติของผู้บริโภคต่อเนื้อเทียมจากพืช พบว่าลักษณะทางประชากรศาสตร์มีผลต่อพฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคอาหารมังสวิรัติ โดยลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคให้ระดับความสำคัญเกี่ยวกับสุขภาพ เช่น โปรตีนสูง มีใยอาหาร แคลอรี่ต่ำ มีวิตามินและแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลในการเลือกรับประทานของผู้บริโภคเพื่อให้ร่างกายมีสุขภาพที่ดี ความสุขทางจิตใจ ปัจจัยประชากรศาสตร์ด้านช่วงอายุมีผลต่อพฤติกรรมการบริโภคมากที่สุด และรายได้ต่อเดือนเฉลี่ยที่แตกต่างกันมีผลต่อการให้ความสำคัญของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ควารกำหนดกลุ่มเป้าหมายที่ชัดเจน เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตรสำหรับทุนสนับสนุนผลงานในการประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59 จากคณะอุตสาหกรรมเกษตรและกลุ่มผู้บริโภคมังสวิรัติในตอบแบบสอบถามทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์. 2546. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ถาวร แซ่ลิ้ม. 2552. พฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติของประชาชนในเขตเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา

นัยนา สุทิน. 2555. พฤติกรรมการบริโภคอาหารมังสวิรัติของผู้บริโภคในกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ

ภควรรณ หวังสุข. 2552. พฤติกรรมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารทะเลสำเร็จรูปแช่เยือกแข็งพร้อมรับประทานของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

สักรินทร์ ตรีวรรณไพศาล. 2550. พฤติกรรมและปัจจัยการบริโภคอาหารมังสวิรัติของประชาชนในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, จังหวัดเชียงใหม่

อรุโณทัย ใจมะโน. 2552. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรับประทานอาหารมังสวิรัติของผู้บริโภค ในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิเพื่อสถาบันอาหาร. 2562. โครงการศึกษาตลาดอาหารวีแกน (Vegan) เพื่อรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารไทย. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

Bangkok Bank SME. 2563. “วีแกน” เจาะตลาด Niche Market ทางเลือกผู้ผลิตอาหารไทย. https://www.bangkokbanksme.com/en/vegan-niche-market-thai-food-producer. 5 มกราคม 2564

การพัฒนาปรับปรุงคุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัสไส้กรอกปลาทูน่าด้วยเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิก

The texture profile development of tuna sausage by using *Sous-vide* with ultrasonic technology

ทัชชกร ทองคล้ำ*, ทานตะวัน พิรักษ์

Thachakorn Thongklam*, 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: thachakorn.th@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาอัตราส่วนและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมของซูริมิต่อเนื้อทูน่า 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ 100:0 (ชุดควบคุม), 75:25 และ 50:50 ต่อคุณภาพด้านกายภาพ เนื้อสัมผัส และประสาทสัมผัส ผลการประเมินคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้สเกลความชอบ 9 ระดับ พบว่าอัตราส่วนเนื้อปลาทูน่าต่อซูริมิที่ 75:25 อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ จากนั้นจึงคัดเลือกกระบวนการผลิต 4 วิธี ได้แก่ การต้ม (ชุดควบคุม) เทคโนโลยีซูวี อัลตราโซนิก และเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิก จากการทดลองพบว่า ไส้กรอกปลาทูน่าที่ใช้เทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิกมีค่าความเหนียว ค่าพลังงานในการกัด และความยากในการเคี้ยวสูงกว่าไส้กรอกปลาที่ใช้กระบวนการอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามค่าดัชนีความสว่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลการประเมินคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส พบว่าคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสโดยรวมและความชอบโดยรวมของไส้กรอกปลาทูน่าจากกระบวนการเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิกมีคะแนนความชอบมากกว่ากระบวนการอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: เทคโนโลยีซูวี, เทคโนโลยีอัลตราโซนิก, ทูน่า, ไส้กรอกปลา

Abstract

This research aims to determine the optimal production and the ratio of tuna and surimi in fish sausage. Three treatments with different ratios of surimi:tuna [100:0 (control), 75:25, and 50:50] were experimented. The effects of different ratios of surimi:tuna on physical, chemical, and sensory properties were analyzed. The sensory analysis using a 9-point hedonic scale test revealed that the liking score of the sausage with the ratio of 75:25 was highest and accepted by consumer. Four different cooking methods were studied including boiling (control), *Sous-vide* technology, ultrasonic technology, and *Sous-vide* with ultrasonic technology. The results showed that cohesiveness, gumminess, and chewiness of sausage produced with *Sous-vide* and ultrasonic technology significantly higher than the other samples ($p < 0.05$). However, the brightness index was not significantly different ($p > 0.05$). Sensory analysis using a 9-point hedonic scale showed the texture and overall liking score of tuna sausages from the Sous-vide with ultrasonic technology were better than other processing methods ($p < 0.05$).

Keywords: fish sausage, *Sous-Vide* technology, tuna, ultrasonic technology

คำนำ

ไส้กรอก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเนื้อสัตว์ชนิดหนึ่งซึ่งนิยมบริโภคกันมาก เนื่องจากจะมีความสะดวกและประหยัดเวลาในการบริโภคและยังมีคุณค่าทางด้านโภชนาการ ซึ่งส่วนใหญ่การผลิตไส้กรอกจะใช้เนื้อหมู วัว หรือไก่ เป็นหลัก ซึ่งในปัจจุบันผู้บริโภคบางกลุ่มได้หันมาสนใจสุขภาพมากขึ้น หลีกเลี่ยงอาหารที่ก่อโรค เช่นการบริโภคเนื้อสัตว์ที่มีกรดไขมันอิ่มตัว และหันมาบริโภคเนื้อสัตว์ เช่น เนื้อปลาที่สามารถย่อยง่าย มีโปรตีนสูง และอุดมไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว (ประดิษฐ์, 2556) ทั้งนี้เนื้อปลามีคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสที่แห้ง ไม่เกาะตัว จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ร่วมกับซูริมิ เป็นวัตถุดิบจากเนื้อปลาที่ผ่านกระบวนการที่ทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่ยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการแทนที่เนื้อทูน่ากับซูริมิ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนา ให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังได้ศึกษากระบวนการทำสุกที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันของไส้กรอกปลา โดยศึกษากระบวนการทำสุกดั้งเดิม (วิธีการต้ม) เปรียบเทียบกับกระบวนที่ใช้เทคโนโลยีมาเกี่ยวข้อง (การเทคโนโลยีซูวี และ เทคโนโลยีอัลตราโซนิค) ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการนี้ มีส่วนช่วยให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น (Lin and Huang, 2007)

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างซูริมิต่อเนื้อปลาทูน่า และหากระบวนการผลิตไส้กรอกปลาที่เหมาะสม โดยศึกษา 4 กระบวนการ คือ การต้ม เทคโนโลยีซูวี อัลตราโซนิก และ เทคโนโลยีซูวีร่วมอัลตราโซนิก ให้มีคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกปลาต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

เนื้อปลาทูน่าสด (Skipjack tuna) จากตลาดปลา จ.สมุทรสาคร ซูริมิ เกรด AA น้ำมันถั่วเหลือง แป้งมันสำปะหลัง เกลือ ไข่ขาว ผงพริกไทย ผงจันทน์เทศ ผงเมล็ดผักชี ผงกระเทียม น้ำแข็ง ไส้คอลลาเจน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว

การศึกษาคัดเลือกสูตรพื้นฐานสำหรับกระบวนการผลิตไส้กรอกปลาทูน่า

กระบวนการผลิตได้ดัดแปลงมาจากวิธีการของ (วรรณชยา, 2556) โดยผสมแป้งและเนื้อปลา สับผสม 2 นาที จากนั้นเติมน้ำแข็งและเกลือ สับผสม 2 นาที และในส่วนผสมแห้งและน้ำมันสับผสมต่ออีก 1 นาที ภายหลังได้นำมาอัดใส่ไส้คอลลาเจน และมัดเป็นท่อน ความยาวท่อนละ 5 เซนติเมตร ต้มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 20 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส 10 นาที และทำให้เย็น จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส โดยสูตรพื้นฐานดัดแปลง ดังแสดงใน Table 1 (สมฤทัย, 2558; Pranisa et al., 2001) โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design)

Table 1 The difference formulating of basic fish sausages

Ingredients	Formula 1 (%)	Formula 2 (%)
Surimi	55.9	74.4
Oil	11.2	0
Starch	6.4	3.7
Salt	1.7	2.6
Egg white	1.7	1.5
Pepper powder	0.6	1.5
Ground nutmeg	0.1	0
Garlic powder	0	0.7
Coriander powder	0	0.1
Ice	22.4	15
Sugar	0	0.4
Monosodium glutamate	0	0.1

การศึกษาสัดส่วนซูริมิต่อเนื้อปลาทูน่าที่เหมาะสมในการผลิตไส้กรอกปลาทูน่า

ศึกษาอัตราส่วนของซูริมิต่อเนื้อปลาทูน่าที่อัตราส่วน 100:0 (F1), 75:25 (F2) และ 50:50 (F3) ทั้งหมด 3 สูตรการทดลอง ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Ratio of surimi and tuna for fish sausages (% weight by weight)

Ingredients	F1	F2	F3
Surimi : Tuna (skipjack)	100:0	75:25	50:50
Starch	3.72	3.72	3.72
Salt	2.60	2.36	2.12
Pepper powder	1.49	1.49	1.49
Garlic powder	0.74	0.74	0.74
Coriander powder	0.15	0.15	0.15
Egg white	1.49	1.49	1.49
Ice	15	15	15
Sugar	0.37	0.37	0.37
Monosodium glutamate	0.15	0.15	0.15

*หมายเหตุ ปริมาณเกลือในสูตรที่ต่างกันขึ้นกับปริมาณเนื้อทูน่า โดยเนื้อทูน่า มีปริมาณเกลือเท่ากับ 2.8%

การศึกษากระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตไส้กรอกปลาทูน่า

ศึกษากระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ การต้ม (ชุดควบคุม) เทคโนโลยีซูวี อัลตราโซนิก และเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิก โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 20 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส 10 นาที

การวิเคราะห์ประเมินคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมีของไส้กรอกปลาทูน่า

สมบัติทางเคมี

ตรวจวัดค่า pH โดย pH meter ยี่ห้อ Mettler Toledo และ ค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw) โดย Water activity meter ยี่ห้อ Aqualabทำการวิเคราะห์ 5 ซ้ำต่อตัวอย่าง

สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยทำการวัดแบบ texture profile analysis ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer) โดยใช้หัววัดอะลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (P/50) ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ (Bourne, 1978) ทำการวิเคราะห์ 10 ซ้ำต่อตัวอย่าง

ค่าสี L* a* และ b* เตรียมตัวอย่างไส้กรอกปลาทูน่า นำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าสี Chroma meter ตามวิธีการของ (Jiménez-Colmenero et al, 2010) ทำการวิเคราะห์ 10 ซ้ำต่อตัวอย่าง

การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ใช้แบบทดสอบ 9-Point Hedonic scale โดยผู้ทดสอบไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน โดยตัดตัวอย่างไส้กรอกปลาทูน่าให้มีขนาดความหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร นำไปทำให้อุ่นก่อนนำไปเสิร์ฟโดยบรรจุใส่ถ้วยพลาสติกสีขาวทึบ ซึ่งทดสอบคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส ความฉ่ำ ความแน่นเนื้อ ความนุ่ม และความชอบโดยรวมโดย 9 คะแนน คือ ชอบมากที่สุด และ 1 คะแนน คือ ไม่ชอบมากที่สุด

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี ANOVA (analysis of variance) วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test และ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์การประเมินคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมีของไส้กรอกปลาเพื่อคัดเลือกสูตรพื้นฐาน พบว่า สูตรที่ 1 มีคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมีแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรที่ 2 ยกเว้นค่าความแข็ง (Hardness) และค่าพลังงานในการกัด (Gumminess) ไม่แตกต่างอย่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงใน Table 3 หลังจากนั้นได้นำไปวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า สูตรที่ 2 ได้รับคะแนนความชอบมากกว่าสูตรที่ 1 ในทุกคุณลักษณะ ดังแสดงใน Table 4 จึงได้เลือกใช้สูตรที่ 2 มาทำการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับไส้กรอกปลาทูน่าต่อไป

Table 3 Texture profile analysis, color parameter, water activity, and pH analysis of basic fish sausage

Parameter	Formula 1	Formula 2
Hardness (N)	13.595±1.61^{ns}	12.913±1.95^{ns}
Cohesiveness	0.654±0.03^{b}	0.760±0.01^{a}
Gumminess	8.879±0.97^{ns}	9.806±1.46^{ns}
Springiness	0.790±0.05^{b}	0.865±0.02^{a}
Chewiness	6.448±1.93^{b}	8.328±1.51^{a}
L*	73.48±1.1^{a}	66.31±0.6^{b}
a*	-0.09±0.1^{b}	0.69±0.2^{a}
b*	11.52±0.6^{b}	15.07±0.5^{a}
Water activity	0.990±0.00^{a}	0.981±0.00^{b}
pH	7.31±0.0^{a}	6.84±0.0^{b}

^{ns} means defined as no statistically significant difference ($p > 0.05$)

$^{a-b}$ means in the same row with different superscript are statistically different ($p \leq 0.05$)

Table 4 Sensory analysis of basic fish sausages (n=30)

Attributes	Formula 1	Formula 2
Appearance	6.57±1.19^{b}	7.67±0.92^{a}
Color	6.63±0.72^{b}	7.40±0.72^{a}
Texture	7.33±0.84^{ns}	7.53±0.73^{ns}
Odor	6.60±1.07^{b}	7.60±0.86^{a}
Taste	6.97±0.67^{b}	7.97±0.61^{a}
Overall liking	7.03±0.61^{b}	7.87±0.63^{a}

^{ns} means defined as no statistically significant difference ($p > 0.05$)

$^{a-b}$ means in the same row with different superscripts are statistically different ($p \leq 0.05$)

ในการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของซูริมิต่อเนื้อปลาทูน่าได้ทำการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ 100:0 (F1), 75:25 (F2) และ 50:50 (F3) ที่มีผลต่อคุณภาพด้านกายภาพ เนื้อสัมผัส และประสาทสัมผัส พบว่าที่อัตราส่วน 50:50 มีค่าความแข็งมากกว่าอัตราส่วนอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) พบว่าหลังจากได้วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส เพื่อเป็นตัวแทนในการกำหนดพฤติกรรมในการเคี้ยวอาหารของผู้บริโภค พบว่า ต้องใช้พลังงานในการกัด (Gumminess) และ พลังงานในการเคี้ยว (Chewiness) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการต้องใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น มีผลที่สอดคล้องกับการประเมินความชอบทางด้านประสาทสัมผัสที่ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ตามที่แสดงใน Table 5

โดยลักษณะของไส้กรอกที่ดีนั้นต้องมีความสม่ำเสมอ เรียบเนียน มีความยืดหยุ่น เนื้อไม่ยุ่ย และไม่นิ่มเกินไป จากผลการประเมินคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส พบว่า F1 ได้รับคะแนนความชอบมากที่สุด ที่ 7.53 แต่เนื่องจากงานวิจัยต้องการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ทำจากทูน่า จึงได้เลือก สูตร F2 ที่มีอัตราส่วนซูริมิต่อเนื้อปลาทูน่าที่ 75:25 และมีคะแนนความชอบรองลงมา โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ที่ 6.47 ตามแสดงใน Table 6 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตต่อไป

Table 5 Texture profile analysis, color parameter, water activity, and pH analysis of tuna sausage

Parameter	F1 (100:0)	F2 (75:25)	F3 (50:50)
Hardness (N)	19.680±5.82^{b}	20.860±5.07^{a,b}	29.290±4.67^{a}
Cohesiveness	0.713±0.09^{a}	0.713±0.02^{a,b}	0.654±0.0.2^{b}
Gumminess	14.570±4.44^{b}	14.810±3.26^{b}	19.120±3.15^{a}
Springiness	0.853±0.19^{a}	0.833±0.04^{a,b}	0.791±0.02^{b}
Chewiness	12.450±3.90^{b}	12.360±2.88^{b}	15.160±2.72^{a}
L*	64.98±1.9^{a}	59.06±3.2^{b}	58.38±1.5^{b}
a*	0.70±0.1^{c}	1.13±0.1^{b}	1.37±0.1^{a}
b*	14.57±0.3^{b}	17.07±0.6^{a}	17.75±0.5^{a}
Water activity	0.994±0.002^{a}	0.993±0.003^{a,b}	0.990±0.001^{b}
pH	6.84±0.02^{a}	6.43±0.03^{b}	6.30±0.03^{c}

$^{a\text{-}c}$ means in the same row with different superscripts are statistically different ($p \leq 0.05$)

Table 6 Sensory analysis of tuna sausage by untrained panels with 9-point hedonic scales (liking score 1-9) (n=30)

Attributes	F1 (100:0)	F2 (75:25)	F3 (50:50)
Appearance	7.33±1.03^{a}	6.33±0.96^{b}	5.10±1.40^{c}
Color	7.27±0.64^{a}	6.40±1.19^{b}	5.80±1.54^{b}
Texture	7.53±0.78^{a}	6.07±1.08^{b}	4.43±1.50^{c}
Odor	7.47±0.90^{a}	5.17±1.49^{b}	4.80±1.97^{b}
Taste	7.57±1.04^{a}	5.90±0.96^{b}	3.87±1.59^{c}
Overall liking	7.53±1.07^{a}	6.47±0.97^{b}	5.10±0.99^{c}

$^{a\text{-}c}$ means in the same row with different superscript are statistically different ($p \leq 0.05$)

กระบวนการผลิตไส้กรอกปลาทูน่าใช้กระบวนการผลิต 4 วิธี ได้แก่ การต้ม (ชุดควบคุม) เทคโนโลยีซูวีอัลตราโซนิก และ เทคโนโลยีซูวีร่วมอัลตราโซนิก จากการทดลองพบว่า ไส้กรอกปลาทูน่าที่ใช้เทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิกมีค่าความเหนียว (Cohesiveness) ค่าพลังงานในการกัด (Gumminess) และพลังงานในการเคี้ยว (Chewiness) สูงกว่าไส้กรอกปลาที่ใช้กระบวนการอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการใช้เทคโนโลยีซูวีเป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ถูกบรรจุในถุงที่อยู่สภาวะสุญญากาศไม่สัมผัสกับน้ำโดยตรง จึงทำให้ยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการ มีความนุ่ม ความฉ่ำน้ำ รวมทั้งเทคโนโลยีอัลตราโซนิคทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและเคมีของผลิตภัณฑ์ ทำให้โปรตีนเกิดการแตกตัวให้มีขนาดเล็กลง และเกิดการเสถียรของอิมัลชัน อย่างไรก็ตามค่าดัชนีความสว่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ตามแสดงใน Table 7 และผลการประเมินคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส พบว่าคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสโดยรวมและความชอบโดยรวมของไส้กรอกปลาทูน่าจากกระบวนการเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิกมีคะแนนความชอบมากกว่ากระบวนการอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมของไส้กรอกปลาทูน่าจากกระบวนการเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิกที่ 6.27 ตามแสดงใน Table 8 ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Cohesiveness) ค่าพลังงานในการกัด (Gumminess) และพลังงานในการเคี้ยว (Chewiness) ที่มากขึ้นมีผลต่อความชอบด้านเนื้อสัมผัสโดยรวมที่เพิ่มขึ้น

Table 7 Texture profile analysis, color parameter, water activity, and pH analysis of fish sausage with varies processed

Parameter	Boiling	Sous-vide	Ultrasonic	Sous-vide + Ultrasonic
Hardness (N)	15.311±8.67^{c}	19.356±5.13^{b,c}	22.454±5.13^{a,b}	25.947±4.47^{a}
Cohesiveness	0.338±0.05^{c}	0.334±0.05^{c}	0.398±0.09^{b}	0.510±0.07^{a}
Gumminess	5.266±3.04^{c}	6.442±1.98^{c}	9.191±3.53^{b}	13.451±3.86^{a}
Springiness	0.817±0.04^{ns}	0.820±0.02^{ns}	0.820±0.03^{ns}	0.839±0.01^{ns}
Chewiness	4.273±2.50^{c}	5.264±1.57^{c}	7.546±2.99^{b}	11.278±3.23^{a}
L*	59.73±1.02^{ns}	59.53±0.24^{ns}	60.02±0.91^{ns}	59.39±1.3^{ns}
a*	1.19±0.05^{b}	1.36±0.10^{a}	1.18±0.16^{b}	1.29±0.10^{a,b}
b*	18.11±0.43^{b}	18.51±0.31^{a,b}	18.14±0.31^{b}	18.70±0.32^{a}
Water activity	0.972±0.002^{a}	0.966±0.004^{b}	0.974±0.001^{a}	0.973±0.002^{a}
pH	6.27±0.02^{b}	6.31±0.03^{a}	6.32±0.02^{a}	6.28±0.01^{b}

^{ns} means defined as no statistically significant difference ($p > 0.05$)

$^{a-c}$ means in the same row with different superscript are statistically different ($p \leq 0.05$)

Table 8 Sensory analysis of tuna sausage with varies processed by untrained panels with 9-point hedonic scales (liking score 1-9) (N=30)

Attributes	Boiling	Sous-vide	Sonic	Sous-vide + Ultrasonic
Appearance	6.03±1.61^{ns}	5.93±1.66^{ns}	5.63±1.77^{ns}	6.43±1.22^{ns}
Color	6.03±1.43^{ns}	6.47±1.31^{ns}	6.10±1.60^{ns}	6.53±1.17^{ns}
Texture	5.27±20.5^{b}	5.37±1.96^{b}	4.90±2.23^{b}	6.37±1.13^{a}
Odor	5.47±2.08^{b}	6.03±1.30^{a,b}	6.00±1.46^{a,b}	6.53±1.01^{a}
Taste	3.90±1.65^{b}	4.87±1.74^{a}	4.80±1.94^{a}	5.53±1.53^{a}
Overall liking	4.70±1.84^{b}	5.40±1.73^{b}	5.27±1.68^{b}	6.27±1.05^{a}

^{ns} means defined as no statistically significant difference ($p > 0.05$)

$^{a-b}$ means in the same row with different superscript are statistically different ($p \leq 0.05$)

สรุป

ในการคัดเลือกสูตรพื้นฐาน พบว่าสูตรที่มีความความแข็ง (Hardness), ความเหนียว (Cohesiveness) และใช้พลังงานในการเคี้ยว (Chewiness) มีผลต่อความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก และเมื่อนำมาศึกษาอัตราส่วนซูริมิต่อเนื้อปลาทูน่า พบว่าที่อัตราส่วน 75:25 มีคะแนนความชอบโดยรวมรองลงมาจากการใช้ซูริมิ 100% เนื่องจากความหยืดหยุ่นที่น้อยกว่า แต่เมื่อใช้ กระบวนการซูวีที่สามารถรักษาความฉ่ำน้ำ รวมทั้งเทคโนโลยีอัลตราโซนิคที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล ทำให้ไส้กรอกปลาทูน่ามีความความแข็ง (Hardness), ความเหนียว (Cohesiveness) และ ต้องใช้พลังงานในการเคี้ยว (Chewiness) ในไส้กรอกปลาเพิ่มขึ้น มีความยืดหยุ่น เนื้อไม่ยุ่ย และไม่นิ่มเกินไป ตามลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก ซึ่งได้ส่งผลต่อความชอบทางประสาทสัมผัสที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมที่ 6.27 ซึ่งมากกว่ากระบวนการอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้กระบวนการผลิตที่แตกต่างกันทั้ง 4 วิธีไม่มีผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นไส้กรอกปลาทูน่าที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมิและเนื้อปลาทูน่าที่ 75:25 โดยใช้กระบวนการผลิตด้วยวิธีเทคโนโลยีซูวีร่วมกับอัลตราโซนิก จึงเป็นสูตรที่เหมาะสมเพื่อนำไปพัฒนาผลิตไส้กรอกปลาทูน่าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ประดิษฐ์ คำหนองไผ่. 2556. การผลิตไส้กรอกปลาดุกเพื่อสุขภาพ. สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมทานี.

วรรณชยา ศรศักดิ์ชัยสิงห์. 2556. ผลของอิมัลชันต่อคุณภาพของไส้กรอกปลาทนู่าท้องแถบ (*Katsuwonus pelamis*). ใน: วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 21 ฉบับที่ 4.

สมฤทัย สุจริตธรรม, จิราพร รุ่งเลิศเกรียงไกร, จีรวรรณ มณีโรจน์. 2557. ผลของสัดส่วนของซูริมิอิมัลชันจากน้ำมันถั่วเหลือง และแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อสมบัติทางเคมี กายภาพ และการประเมินทางประสาทสัมผัสของไส้กรอกปลาอิมัลชัน. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 53. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ,

Bourne, M.C. 1978. Texture profile analysis. Food Technol. 32: 62–66.

Kumar K. 2020. Cold Preservation and Processing. Food Processing and Preservation. pp. 23–35.

Lin, K.-W., and Huang, C.-Y. 2008. Physicochemical and textural properties of ultrasound-degraded konjac flour and their influences on the quality of low-fat Chinese-style sausage. Meat Science. 79: 615–622. doi:10.1016/j.meatsci.2007.10.026

Naveena, B., Khansole, P.S., Shashi Kumar, M., Krishnaiah, N., Kulkarni, V.V., Deepak, S. 2016. Effect of sous vide processing on physicochemical, ultrastructural, microbial and sensory changes in vacuum packaged chicken sausages. Food Science and Technology International. 23: 75–85. doi:10.1177/1082013216658580

Chuapoehuk, P., Raksakulthai, N., Worawattanamateekul, W. 2001. Process Development of Fish Sausage. Department of Fishery Products, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Thailand.

Study of sugarcane juice concentration as fermentation substrate on levan production by *Bacillus subtilis* TISTR 001

Chanyanuch Noidee, Boontiwa Ninchan*
Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: fagibin@ku.ac.th

Abstract

Levan is an exopolysaccharide of fructose linked by ß-glycosidic bonds. *Bacillus* sp. produced levansucrase as a levan producing enzyme using sucrose-based substrates. The applications of levan are widely used in many industries due to its immunomodulating, prebiotic property, and many good distinguishing properties such as low viscosity, high water solubility, and non-toxic, etc. This research aimed to study the efficiency of levan production from sugarcane juice by *Bacillus subtilis*. The sugarcane juice concentrations at 10, 15, 20, and 25 Brix were studied under fermentation conditions at initial pH 6.8 at 30°C, 150 rpm for 168 hours. The results found that the concentration of sugarcane juice at 25 Brix at 48 hr of fermentation time showed the highest efficiency of levan production that *Bacillus subtilis* had the highest levansucrase at 5.14×10^7 units/mL including produced the highest fructose polymer in the form of the total fructose content that was 3.6% (w/v).

Keywords: *Bacillus subtilis*, Fructose polymer, Levan, Levansucrase, Sugarcane juice

Introduction

Levan is a microbial fructopolymer that linked by β-2,6 and β-2,1 glycosidic bond in core and branch chains, respectively. Levan is a functional substance due to its potential biological properties such as antioxidant, immunomodulation, biocompatibility, prebiotic properties, cancer resistance, emulsifier agent, the carrier of flavors and fragrance, an encapsulation agent, etc. (Jakovljevic, 2019; Mu et al., 2021) then, levan are widely used in many industries such as food and beverage industries, pharmaceutical and medical industries, etc. Moreover, levan is a low energy sweetener with long chain of fructose derivatives then it is considered to be ingredient in food and beverage production (Sangeetha, 2005).

Levan is produced by either microbial fermentation or enzymatic synthesis by levansucrase (Sangmanee et al., 2016). There are many microorganism strains to use for levan production such as *Zymomonas mobilis*, *Bacillus subtilis, Halomonas* sp., *Pseudomonas* sp. (Gonzalez Garcinuno et al., 2017). While, levansucrase (sucrose 6-fructosyltransferase, EC 2.4.1.10), is the potential enzyme for levan production that was to hydrolyze sucrose molecules and to transfer the fructosyl residue to the growing long-chain fructose polymer (Sangmanee et al., 2016; Mu et al 2021; Raga-Carbajal et al., 2016; Santos et al., 2013; Shi et al., 2019; Tanaka et al., 2014). Fructosyltransferase type is an enzymatic transformation of fructose sugars connected by beta bonds (β-D-fructose), which are bonds that enzymes in the primary digestive tract are unable to digest. Levansucrase produced by gram-positive bacteria such as *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus reuteri*, etc., by gram-negative bacteria such as *Zymomonas mobilis*, *Halomonas* sp., *Erwiniaamyl ovora, Pseudomonas syringaee P. chlororaphis* etc., and by fungi, such as *Streptococcus mutans* and *Actinomyces viscosus* (Gonçalves et al., 2013).

B. subtilis is micro-organism which can produce levansucrase and has been certified as safe (Generally Recognized as Safe: GRAS) then it is the most popular strain to use in the fermentation industry. Moreover, it is an organism that grows both aerobic or anaerobic conditions with optimum temperature growth at 37°C, pH 5.5-8.5 (Dahl, 2000).

Generally, the production of levan and levan-like fructooligosaccharides uses sucrose as a substrate fermentation. Then, this research focused to study on the levan production using sugarcane juice as substrate that composes of rich sucrose. Sucrose is a disaccharide of glucose and fructose as the monomer-based of levan. Therefore, the main of objective was to optimize the concentration of sugarcane juice on levan production by *B. subtilis* TISTR 001.

Materials and Methods

Inoculum preparation

B. subtilis was inoculated in nutrient broth with yeast extracts at 0.3% (w/v) and peptone at 0.5% (w/v) (ATCC Medium) and 0.1%(w/v) sucrose in flask 150 mL volume and incubated at 37°C, 200 rpm for 24 hr until optical density ($OD_{600\ nm}$) reached 0.8–1.0.

Preparation of sugarcane juice concentration

Four levels of sugarcane juice concentration; 10, 15, 20 and 25 Brix were performed for each concentration, 2 repetitions. The adjusted concentration of sugarcane juice as above

required, then adjusted the optimized conditions of sugarcane juice (with pH 6.8 and adding nutrients including yeast extract, meat extract, peptone, $(NH_4)_2SO_4$, and $MgSO_4.7H_2O$). And then sugarcane juice (225 ml) was sterilized at 121°C for 15 minutes, then inoculum of *B. subtilis* at 10 % (w/v) (25 mL) was added. Fermentation at 30°C with agitation rate at 150 rpm, samples were collected at every 6 hours for 72 hours, 5 days and 7 days.

Analysis of fermentation parameters

Available cell count

Samples of fermented sugarcane juice were diluted at appropriate concentration. Then, *Bacillus* growth was investigated on nutrient agar with spread plate technique. And then incubated at 37°C for 24 hr. The microbial colonies (CFU/mL) were counted in the range of 30-300 CFU/plate.

Turbidity of cell by optical density (OD_{600})

Fermented sugarcane juice (without centrifugation) was measured the optical density at 600 nm by spectrophotometer to study the *B. subtilis* growth from turbidity in the culture medium.

Cell dry weight

The 0.5 mL samples was centrifuge at 10,000 rpm for 10 minutes. The supernatant was discarded and incubated at 55°C for 24 hr, stored in a desiccator. Then, weighed and calculated the dry cell weight.

In the research measure the cell count in 3 methods because available cell count were counted only living cell but turbidity of cell by optical density (OD_{600}) and cell dry weight were measure the cell and impurity in fermented sugarcane juice.

The reducing sugar by Somogyi-Nelson

Fermented samples after *B. subtilis* cell separation were diluted at an appropriate concentration. The 1 mL of diluted sample was added with 1 mL of Alkaline copper reagent and then boiled in hot water for 15 minutes (covered with a glass ball to remain the volume) and cooled immediately in an ice bath. And then 1 ml of Nelson Reagent solution was added and incubated at room temperature for 30 minutes (in the dark) after that 5 mL of distilled water was added. The optical density was measured at 520 nm by spectrophotometer. Glucose was the standard solution to calculate the amount of reducing sugar during the fermentation. (Nelson, 1944)

Analyzing the amount of levan content in the form of total free fructose

One mL of the fermented sugarcane juice, in which the cells had been separated, was added with 2 mL absolute ethanol in order to precipitate the occurring fructo-oligosaccharides and fructan, prior the substance was centrifuged at 10,000 rpm for 10 minutes (Hettich Rotina 35R refrigerated tabletop centrifuge, UK). Then, supernatant was discarded, and the precipitated portion was hydrolyzed with 2 mL of 0.1 N hydrochloric acid, then boiled for 30

minutes that was to break the bonds of the oligosaccharides and polymer fructan into the monosaccharides. The amount of hydrolyzed monosaccharides as reducing sugar was then analyzed by using the Somogyi–Nelson method, and using standard solution as fructose to calculate the total free fructose content used in forming a chain of oligofructans.(Wittawas, 2018)

Analyzing the levansucrase activity

Fermented juice after *B. subtilis* cell separation was considered as crude enzyme of levansucrase. The enzyme activity was analysed by preparing 1 mL of 10 % (w/v) sucrose solution (substrate) in a pH 6.8 phosphate buffer solution and incubated at 30°C for 10 minutes, later on adding raw levansucrase enzyme for an amount of 1 mL, incubated for 30 minutes, then stopped enzyme reaction by boiling in hot water for 10 minutes. The reducing sugar produced by the Somogyi–Nelson method was analyzed. The standard curves of glucose were used to analyze the free glucose produced before and after the enzyme addition. (Tian, 2011)

One Unit of enzyme was defined as the amount of enzyme that produced free glucose 1 μmol/mL in 1 minute under conditions used for enzyme activity analysis.

Results and Discussion

Available cell count, dry cell weight and the optical density during levan production.

The growth of microbes was determined by the colonization count, which was achieved by spreading technique indicating the available *B. subtilis* cell. Sugar cane juice was fermented for 7 days, sampling every 6 hours for 3 days (0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, and 72^{th} hours), 5^{th} day (120^{th} hours) and 7^{th} day (168^{th} hours) as show in Fig. 1(a). The cell growth gradually increased until 6^{th} hour and then quite steadied which showed all experiments.

Dry cell weights during the levan production of cane juice at 10,15,20 and 25 Brix were shown in Fig.1(b). The results found that the high concentration at 25 Brix showed the highest weight of dry cells that was 39 g/L. While other experiments gradually increased that positively correlated with available cell count and optical density at 600 nm as shown in Fig 1(a) and Fig 1 (c), respectively.

The optical density at 600 nm, sugarcane juice concentration 10,15,20 and 25 Brix.(Fig. 1(c)) started at 0.297,0.347,0.305 and 0.281. Then, at the 120 hour, the graph tends to be constant as the microorganisms stop growing.

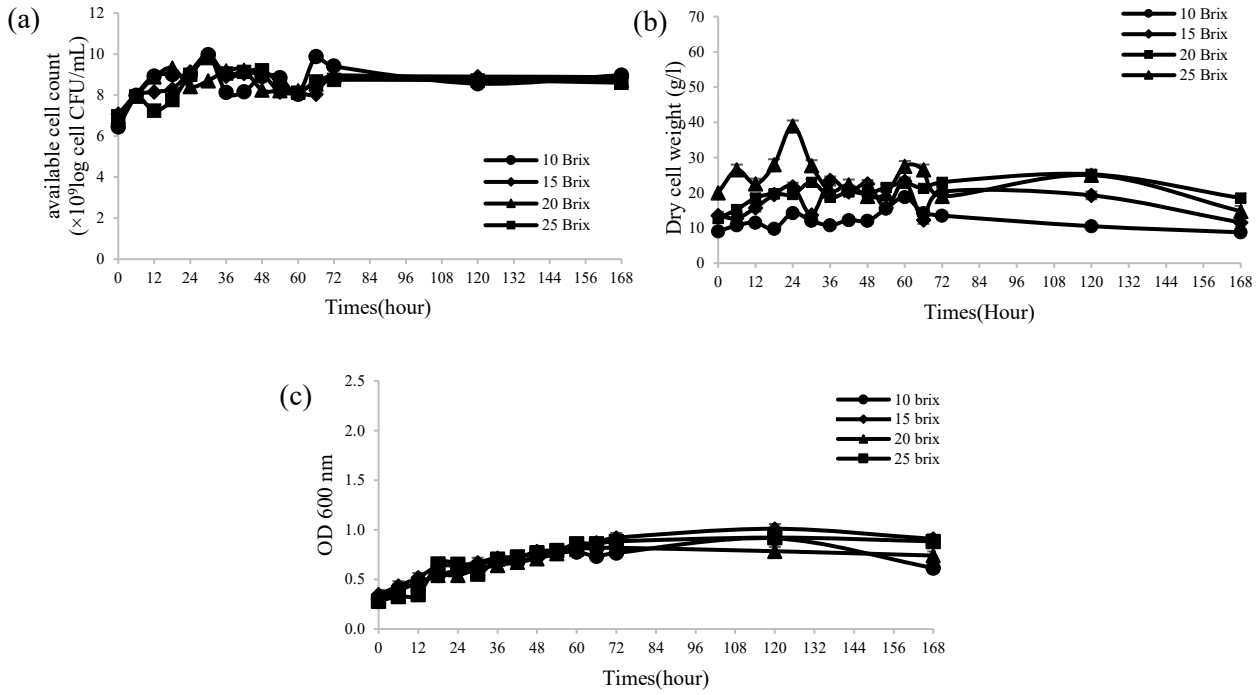


Fig. 1 Available cell count (a); dry cell weight (b); and optical density: OD600 (c); during levan fermentation at sugarcane juice concentration at 10, 15, 20, and 25 brix. at 30°C with agitation rate 150 rpm.

pH and brix during levan production

The result of pH and Brix change during levan fermentation at concentration of sugarcane juice concentration at 10,15,20 and 25 Brix as shown in Fig 2(a) and Fig 2(b), respectively. Initial pH of all experiments was proximately at 6. The pH was then gradually declined and quite steadied after 12th hr all experiments (Fig. 2(a)). while, the initial Brix of each experiment depended on juice concentration as shown in Fig. 2(b) that was 12.2, 18,19.85 and 22.75 at 10, 15, 20, and 25 brix, respectively. As Fig 2(b) showed the decreasing of soluble solid as Brix value indicating *Bacillus* cells consumed some sugars and increase the rate of cell growth.

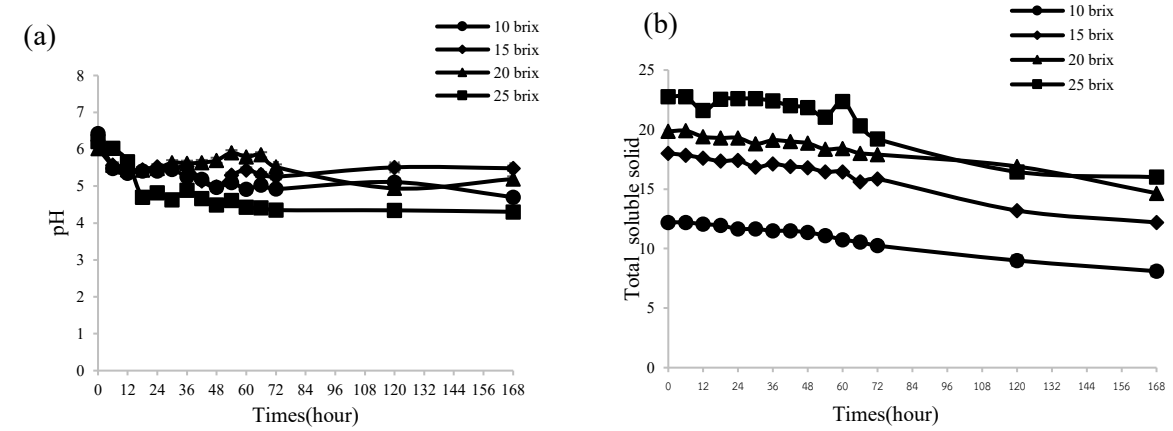


Fig. 2 change of pH (a); and total soluble solid as Brix (b); during levan fermentation at sugarcane juice concentration at 10, 15, 20 and 25 Brix at 30°C with agitation rate at 150 rpm.

Levansucrase activity, total reducing sugar, and total levan

Sugarcane juice concentrations at 10, 15, 20 and 25 Brix were fermented under the optimum condition at pH 6.8 supplementing with yeast extract (2 g/L), meat extract (3 g/L), peptone (5 g/L), $(NH_4)_2SO_4$ (2 g/L), and $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.6 g/L), whereas, the fermentation temperature at 30°C for 168 hr. The sugarcane juice concentration at 25 Brix showed obviously the maximum of levansucrase enzyme at 48th hr of fermentation that was 5.14×10^7 Units/mL (Fig. 3(a)) including positively correlated with levan content in form of free fructose (Fig 3 (c)). Total levan high at 24 and 60 hours as polymerization of levan. Furthermore, levansucrase enzymes and total reducing sugar were also correlated production.However, total reducing sugar at 20 Brix was lower than 10 and 15 Brix due to the effect of reducing sugar bonding to polymer (Fig 3 (b)).

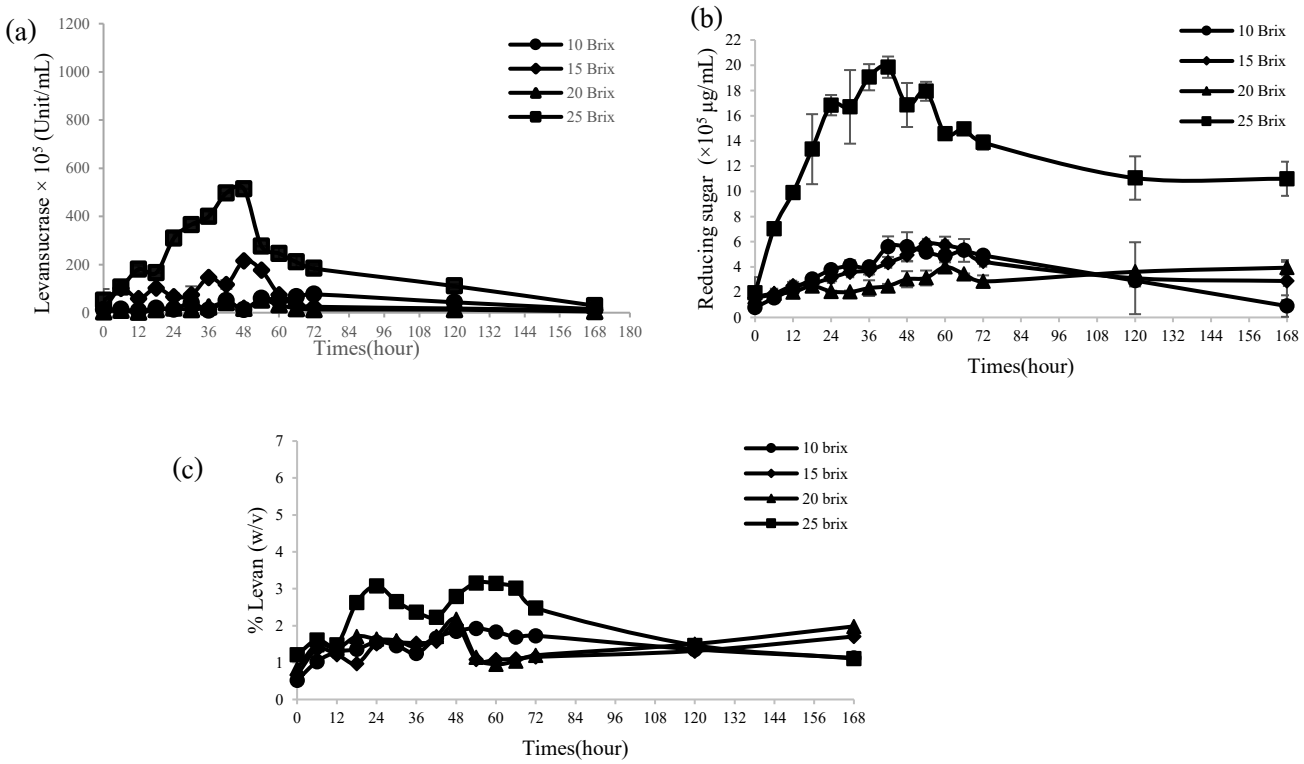


Fig. 3 Levansucrase (a); reducing sugar content (b); and levan polymer in form of total fructoses (c); during levan fermentation using *B. subtilis* TISTR 001at 10, 15, 20 and 25 brix of sugarcane juice concentration at 30°C with agitation rate at 150 rpm.

Conclusion

The results of sugarcane fermentation to produce levan polymer by *B. subtilis* TISTR001, found that concentration of sugarcane juice was directly correlated to the amount of levan polymer and levansucrase. It was found that concentration of sugarcane juice at 25 Brix yielded levan in form total free fructose that was 3.6% (w/v) with levansucrase was 5.14×10^7 Unit/mL. As the production was directly related to sugarcane juice concentration, fermentation of sugarcane juice at 25 Brix yielded product higher than fermentation of sugarcane juice at 5, 10, and 15 Brix. Moreover, fermentation at 48 hr was the most effective

fermentation period for levan production that was supported the conclusion by all results as available cell growth, reducing sugar, levansucrase, total polymer in form total fructose. The concentration of the fermented had an effect on the efficiency of lean production due to levan production that was to hydrolyze sucrose molecules and to transfer the fructosyl residue to the growing long-chain fructose polymer. Fructosyltransferase type is an enzymatic transformation of fructose sugars connected by beta bonds (β-D-fructose).

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

References

Arvidson, S.A., Rinehart, B.T., Gadala-Maria, F. 2006. Concentration regimes of solutions of levan polysaccharide from *Bacillus* sp. Carbohydrate polymers. 65: 144–149.

Chow, J. 2002. Probiotics and Prebiotics: a brief overview. Journal of Renal Nutrition. 12: 76–86.

Dahl, M.K. 2000. *Bacillus* sp. In: Robimson, R.K., Batt, C.A., Patel, P.D. (Eds.). Encyclopedia of Food Microbology, Vol.1. Academic Press. pp. 113–140.

De Boer, A.S., Priest, F., Diderichsen, B. 1994. On the industrial use of *Bacillus licheniformis*.a review. Applied Microbiology and Biotechnology 40: 595–598.

González-Garcinuño, A., Tabernero, A., Sánchez-Álvarez, J.M., Galán, A.M., Eva, M., Valle, M. 2017. Efect of bacteria type and sucrose concentration on levan yield and its molecular weight. Microbial cell and factories. 16: 91.

Gojgic-Cvijovic, G.D., Jakovljevic, D.M., Loncarevic, B.D., Todorovic, N.M., Pergal, M.V., Ciric, J., Vrvic, M.M. 2019. Production of levan by *Bacillus licheniformis* NS032 in sugar beet molasses-based medium. Biological macromolecules. 121: 142–151.

Kays, S.J., Nottingham, S.F. 2008. Biology and chemistry Jerusalem Artichoke Helianthus tuberosus L. CRC Press, Taylor & Francis Group, London. 478pp.

Kim, B.W., Choi, J.W., Yun, J.W. 1998. Selective production of GF4-fructooligosaccharide from sucrose by a new transfructosylating enzyme. Biotechnology Letters. 20: 1031–1034.

Lammens, W., Le Roy, K., Schroeven, L., Van Laere, A., Rabijns, A., Van Den Ende, W. 2014. Structural insights into glycoside hydrolase family 32 and 68 enzymes. Functional implications 60: 727–740.

Gonçalves, B.C.M., Mantovan, J., Ribeiro, M.L.L., Borsato, D., Celligoi, M.A.P.C. 2013. Applied biology & Biotechnology. 1(02): 001–008

Porras-domínguez J.R., Ávila-fernández, Á., Rodríguez-alegría, M.E., Mirandamolina, A., Escalante, A., González-cervantes, R., Olvera, C., López, A. 2014. Levantype FOS production using a Bacillus licheniformis endolevanase, Process Biochem. 49: 783–790.

Sangeetha, P.T., Ramesh, M.N., Prapulla, S.G. 2005. Maximization of Fructooligosaccharide production by two stage continuous process and its scale up. Journal of Food engineering. 68: 57–64

Sangmanee, S., Nakapong, S., Pichyangkura, R. Levan-type and Kuttiyawong K. 2016. Fructooligosaccharide production using Bacillus licheniformis RN-01 levansucrase Y246S immobilized on chitosan beads. Songklanakarin J. Sci. Technol. 38(3): 295–303

Srikanth, R., C.H.S.S.S. Reddy, G. Siddartha, M.J. Ramaiah, and K.B. Uppuluri. 2015. Review on production , characterization and applications of microbial levan, Carbohydrate Polymer. 120:102–114.

Yun, J.W. 1996. Fructooligosaccharides-Occurrence, preparation, and application. Enzyme and Microbial Technology. 19: 107–117.

Examination of natural starter cultures used for vinegar fermentation by using PCR-DGGE technique

Kullanart Tongkhao[a,*], Khemmapas Treesuwan[b], Kanokwan Yod-in[b], Jutamas Klinsoda[b], Sirinan Shompoosang[b]

[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: kullanart.t@ku.th

Abstract

A local Thai vinegar fermentation process was commonly used natural microorganisms resulted in long fermentation period with low acid production. Its fermentation period could reach 91 days with total acetic acid at 1.5% volume per volume (v/v). This study aimed to identify microorganisms related to the local vinegar fermentation process from a local Small and Medium Enterprises (SMEs) producer by using Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE) technique. Microorganisms were examined through 91 days of fermentation period from a surface of a fermentation tank and a fermented vinegar product. The PCR-DGGE results revealed various microorganisms involved in the process including: mold such as *Penicillium* sp.; yeasts such as *Saccharomycopsis fibuligera*, *Brettanomyces bruxellensis*, *Dekkera bruxellensis*, *Candida glabrata* and *Pichia manshurica*; and bacteria such as *Lactococcus lactis*, *Pediococcus pentosaceus*, *Clostridium tyrobutyricum, Clostridium thermopalmarium* and *Acetobacteraceae bacterium*. Microorganisms revealed by this study suggested that the SMEs should carefully selected a starter culture strain that better support their vinegar fermentation process.

Keywords: Acetic acid, Fermentation, Microorganisms, Natural starter, PCR-DGGE, Vinegar

Introduction

Vinegar is fermented liquid produced from two-stage fermentation. The first stage is ethanolic fermentation followed by acetous fermentation as the second stage. In the ethanolic fermentation, sugar in raw materials is converted into ethanol by yeast. Then, in the acetous fermentation, ethanol is converted into acetic acid by acetic acid bacteria (Ozturk et al., 2015). The vinegar production can be traditionally performed as a surface fermentation process which is normally used natural microorganism from a raw material. It is normally made from randomly mixture of microbial strains which lack of quality control on strain type and its mixture-ratio (Xu et al., 2011). To understand the microbial communities involved in food fermentations, many molecular tools based on the study of the DNA or RNA have regularly been implemented. Among these, high-throughput sequencing techniques and Polymerase Chain Reaction - Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE) are shown to be able to detect major and minor microbial components, as well as identified a single microbial strain, especially when they are used in combination (Milanović et al., 2018). Hence, the present study aims to reveal microbial biota during vinegar production of the local Small and Medium Enterprises (SMEs) that could provide an information for the manufacturer to better control their production processes.

Materials and Methods

Raw material

Natural starter culture and traditional rice vinegar (TRV) samples were obtained from SMEs vinegar producer located in Bangkok, Thailand. The vinegar was prepared as a submerged system by mixing the starter culture with rice sugar syrup according to the SMEs protocol. The mixture was set for 3 months as an ending of the fermentation.

Natural starter culture analysis for microbial isolation

Two batches of natural starter culture (Loog-Pang) generally used by the SMEs vinegar producer were examined for microbial analysis for viable plate counts of bacteria, yeast and mold, and acetobacter strains on Plate Count Agar (PCA), Potato Dextrose Agar (PDA) and deMan-Rogosa-Sharpe (MRS) agar, respectively, according to BAM (1998, 2000) and Haghshenas et al. (2015), respectively. The viable cell counts were reported as log CFU/gram of Loog-Pang sample. All isolated colonies were observed for colony morphology, cell morphology under light microscope and Gram Stain characterization.

Traditional rice vinegar analysis

The traditional rice vinegar (TRV) samples were collected weekly during fermentation process at the SMEs' factory until the end of the fermentation process. After sampling, TRV samples were transported at 4ºC to a laboratory at Kasetsart University for further chemical and microbiological analysis.

TRV Chemical analysis

The TRV samples were determined for pH, total soluble solids (TSS), ethanol content, and titratable acidity (TA). The pH was measured by pH meter (Denver, model UB-10, Japan).

TSS was determined using hand refractometer (Atago, model N-1E, Japan). The ethanol content was determined following Schumaker et al. (2019) by using an ebulliometer (Dujardin-Salleron, No. 81117, Paris, France). The ebulliometer was thorough rinsed with the sample. After that the boiling chamber was filled with approximately 50 ml of the sample. The boiling points of the sample and distilled water (control) were recorded. The ethanol content was interpreted by ebulliometer calculation disc. TA was determined by titration sample with 0.1 N sodium hydroxide (NaOH) using phenolphthalein as an indicator (AOAC, 2000).

TRV microbiological viable count

The traditional rice vinegar sample was ten-fold serially diluted and subjected to viable counts of bacteria, yeast and mold, and acetobacter strains on PCA, PDA, MRS as mentioned earlier, respectively. The viable cell counts were reported as log CFU/mL of vinegar sample.

Microbial community analysis through PCR-denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE)

The microorganism community of TRV was investigated by PCR-DGGE methods. The first step of PCR-DGGE assay is the DNA extraction process which was carried out with the NucleoSpin (commercial DNA extraction kit, Microbial DNAI). Then DNA extract was stored at -20ºC until used. The DNA extract was amplified with 338f (5′-ACT CCT ACG GGA GGC AGC AG-3′; nt 338-357) and 518r (5′-ATT ACC GCG GCT GCT GG-3′; nt 518-534) primers for bacterial DNA (Muyzer et al., 1993), and NL1 (5′-GCC ATA TCA ATA AGC GGA GGA AAA G-3′; nt 63-88) and LS2 (5′-ATT CCC AAA CAA CTC GAC TC-3′; nt 266-285) primers for mold and yeast (Cocolin et al., 2000). PCR mixture was performed in a final volume at 50 µL containing 25 µL of 2x Tag PCR Master Mix, 1 µL of each primer (10 mM), 5 µL of DNA extract from TRV, and 18 µL of dH_2O (Milli Q water). In case of bacteria, PCR was performed using an initial denaturation temperature at 95ºC for 5 min, followed by 35 cycles with a temperature profile of 95ºC for 0.5 min, annealing at 60ºC for 0.5 min, and elongation at 72ºC for 0.5 min. The final elongation was performed at 72ºC for 10 min at the end of the 35 cycles. Besides, mold and yeast were performed using the initial denaturation temperature and time at 95ºC for 5 min. The process was repeated for 30 cycles with a temperature profile of 95ºC for 1 min, annealing at 52ºC for 2 min, elongation at 72ºC for 2 min. The last elongation was carried out at the end of 30 cycles at 72 ºC for 7 min. The PCR products were run through electrophoresis in 0.5X TAE agarose gel (1% weight per volume (w/v)) containing ethidium bromide, and visualized under UV light by UV transilluminator. Their image was recorded using Gel Documentation (Benchtip UV Transilluminator, Cambridge, UK). DGGE of PCR product was performed on 0.8 mM polyacrylamide gel (8% (w/v) of 37.5:1 acrylamide/bisacrylamide) with urea and formamide as denaturants. The denaturing gradients for bacteria and yeast and mold were between 50–60% and 30–60%, respectively. Electrophoresis was performed at 60°C at constant voltage of 70 V for 18 h. After that, DNA bands were stained with SYBR Gold solution for 15 min and visualized under UV light by UV transilluminator. The image was photographed by Gel Documentation (Rantsiou et al., 2004). Individual PCR-DGGE bands were cut out from the gel by aseptic technique and incubated in 20 µL dH_20 (MilliQ water) at 4°C for 24 h. Subsequently, the DNA products were amplified by PCR with the same primer set in DGGE assay but without GC-clamp (Spano et al., 2007). Then the amplified PCR products were sent to Ward Medic Ltd., Thailand for DNA

sequencing. The obtained sequences were aligned with DNA database available in GenBank to get accession numbers (http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/).

Results and Discussion

Natural starter culture (Loog-Pang) viable count

The microbial counts of natural starter culture or Loog-Pang on PCA, PDA, and MRS agar were 5.38±4.45, 3.00±0.00, and 4.78±3.75 Log CFU/gram, respectively. Moreover, the colony appearance on solid media and cells appearance under light microscope were observed (data not shown). The different eight colony appearance on solid media suggested that the microorganism in Loog-Pang were mixed cultures of bacteria, yeast, and mold; as the high amount of viable bacterial count from PCA agar, slightly low amount of yeast and mold from PDA agar, and relatively high amount of acetic acid bacteria from MRS agar. The obtained colonies were identified from its colony and cell morphology and Gram Stain characterization. The results were similar with Luangkhlaypho et al. (2014). The diversity of microorganisms in 57 samples of Loog-Pang in Thailand were reported.

Traditional rice vinegar (TRV)

Chemical and microbial properties of traditional rice vinegar during fermentation process.

The chemical properties of TRV including total soluble solid (TSS) content, ethanol content, total acidity (TA) content in the form of acetic acid, and numbers of microbial counts during fermentation process were shown in Fig. 1. The TSS of TRV during fermentation stage was between 6.6–8.3°Brix. The highest TSS was observed at the initial date of fermentation and slightly decrease over the fermentation time. The ethanol content of TRV was not found until 30 days of fermentation time with 0.1% volume per volume (v/v). The highest content was observed at 49 days of fermentation with 0.3% (v/v). After that the content of ethanol decreased to 0.2% (v/v) and steady until 91 days of fermentation. The total acidity content was found slightly increased to reach 0.53% (v/v) at 15 days of fermentation stage. The highest of acidity content was observed after 49 days of fermentation stage as 1.60% (v/v) and constant until end of the fermentation which less than 4% (v/v) as suggested by Thai FDA. Furthermore, the microorganism diversity of TRV during fermentation was investigated. In the fermentation stage of 0–15 days, the predominant microorganism in TRV was mold, and some yeast colony in white and opaque colony color. The visualization under light microscope was used for further confirmation. After 15 days of fermentation, the growth of mold was not observed. In contrast, the growth of yeast and bacteria were found. Moreover, the counts of microorganisms were determined on MRS agar and found the increasing from 4.48 to 7.41 log CFU/mL at the 0-30 days of fermentation stage. After that, the counts of microorganisms were decreased until could not detected at 84 days of fermentation stage (detection limit was <1 CFU/mL). This finding suggested that low mold count was observed in the beginning of the fermentation process leading to low substrate for ethanol production, which it could resulted in low acetic acid production.

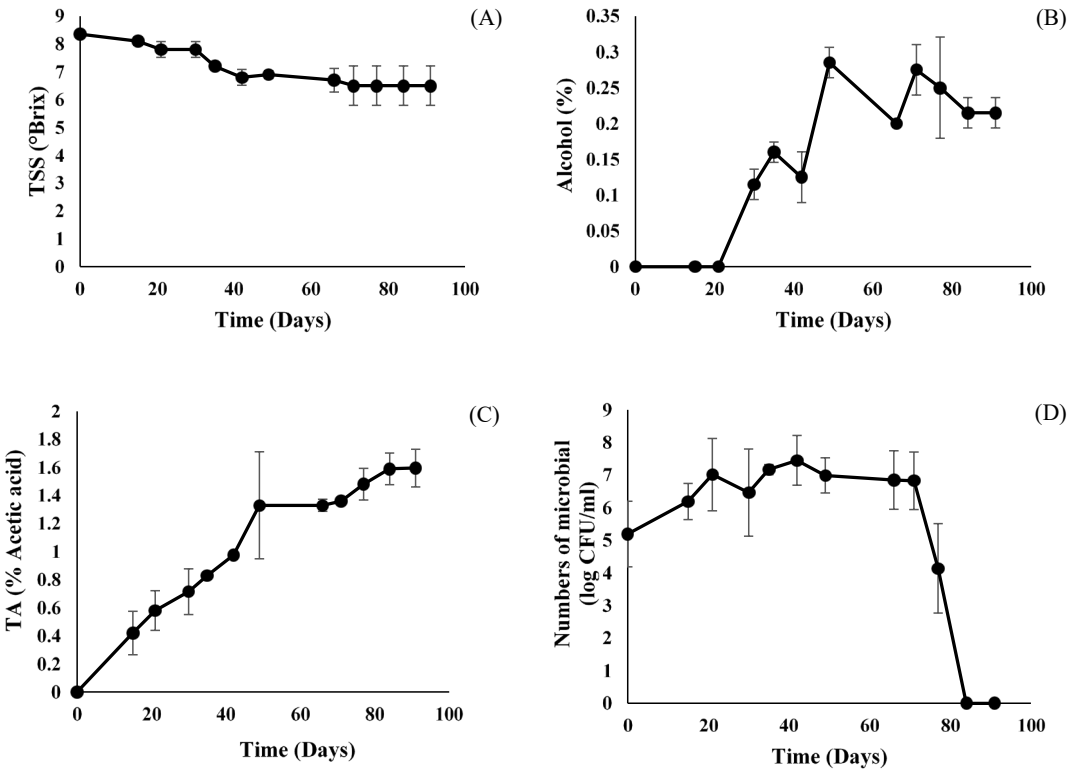


Fig. 1 Chemical properties of traditional vinegar production during the fermentation process. Total soluble solid content (A), ethanol content (B), total acidity content in the form of acetic acid (C), and numbers of microbial (D) during the vinegar fermentation process. Data represents the mean of two batches experiments and error bar indicate ± SE

Microorganism community of TRV

To obtain an overview of the microorganism community of predominantly bacteria, yeast, and mold by cultured independent technique, followed by DGGE analysis was conducted using TRV sample from different fermentation stage and universal primers. The DGGE profile of microorganisms was shown in Table 1. Six genera of yeast and mold were identified including *Saccharomycopsis fibuligera*, *Brettanomyces bruxellensis*, *Dekkera bruxellensis*, *Candida glabrata*, *Pichia manshurica*, *Penicillium* sp. All six genera were reported involved in an acetic acid, wine, ethanol, Shanzi vinegar, Chinese fermentation, respectively (Nie et al., 2015; Zhang et al., 2017). Only one nearest bacterial species was identified as *Acetobacteraeae bacterium*. Nonetheless, *S. fibuligera* was not surprisingly predominant culture among other strains, which was observed in the 1st, 4th, and 14th weeks of fermentation stage as shown in Table 2. The DGGE profile of bacteria in TRV from different fermentation stage was shown in Table 1. Five bacteria genera were identified as *Lactococcus lactis*, *Pediococcus pentosaceus*, *Clostridium tyrobutyricum, C. thermopalmarium* and *Acetobacteraceae bacterium*. All genera were reported involved in an acetic acid, butyric acid, wine fermentation (Ivy and Wiedmann, 2014). Our results suggested that most bacteria genera found in our study were related with low acid production such as *L. lactis* and *P. pentosaceus* which can produce low acetic acid and lactic acid. They were found in the 7th and the 21st day of the fermentation stage as shown in Table 2. Nonetheless, the strains mostly produced butyric acid, they could result in a limitation of acetic acid production (Ivy and Wiedmann, 2014). The presence of *Clostridium* sp., such as *C. tyrobutyricum* (from the 3rd to 13th week of fermentation stage) and

C. thermoaceticum, were able to synthesize acetic acid from reduced one-carbon compounds as carbon monoxide (Braun et al., 1981). This result suggested that *Clostridium* sp. found in our study could be a major microorganism for acetic acid-production of the Loog-Pang used in this study. Nontheless, it is noteworthy that acidity of the product played an important role on pathogenic control (e.g. *Clostridium botulinum*) that limit food safety concern in foodstuffs (Shi et al., 2016).

Table 1 Sequencing results of the bands excised from the DGGE gel obtained from the amplified fragments of microbial DNA extracted directly from surface of traditional rice vinegar fermenter (S1-S8) and from traditional rice vinegar (V1-V9)

Isolate no.	Sequence size (bp)	Nearest strain code	Accession number	Putative species	Sequence identity (%)
S1	258	ATCC 36309	CPO15978.1	*Saccharomycopsis fibuligera*	100
S2	264	GSN-DR-C	KU956955.1	*Saccharomycopsis fibuligera*	100
S3	251	ATCC 56866	JX094787.1	*Dekkera bruxellensis*	100
S4	483	004951	HM591675.1	*Candida glabrata*	100
S5	259	KBP:Y-4901	MQ367306.1	*Pichia manshurica*	100
S6	226	GSN-DR-C	K956955.1	*Saccharomycopsis fibuligera*	100
S7	252	CBS:5512	KY107615.1	*Brettanomyces bruxellensis*	100
S8	262	F0364	KU747602.1	*Penicillium* sp.	100
V1	189	22MoSuero	JQ973595.1	*Lactococcus lactis*	91
V2	268	F201	MT645314.1	*Pediococcus pentosaceus*	99.38
V3	214	A1	KY910417.1	*Clostridium tyrobutyricum*	100
V4	184	LZLJ008	KR018741.1	*Clostridium tyrobutyricum*	96
V5	212	P216	MG985983.1	*Uncultured bacterium*	98
V6	189	139	KR051150.1	*Lactobacillus* sp.	90
V7	188	NMY5	EF639852.1	*Clostridium thermopalmarium*	90
V8	163	4a826	MG801929.1	*Clostridium* sp.	92
V9	240	IAFO	LN831189.1	*Acetobacteraceae bacterium*	97

Table 2 The microorganisms in each fermentation stage during traditional rice vinegar fermentation process

Fermentation stage	Yeast species	Bacterial species
Vinegar container	not detected	*Lactococcus lactis, Lactobacillus* sp.
		Pediococcus pentosaceus
		Clostridium tyrobutyricum
7th day	*Saccharomycopsis fibuligera*	*Lactococcus lactis*
		Pediococcus pentosaceus
21st day	*Dekkera bruxellensis*	*Lactococcus lactis*
		Pediococcus pentosaceus
		Clostridium tyrobutyricum
28th day	*Saccharomycopsis fibuligera*	*Clostridium* sp., *C. tyrobutyricum*
35th day	*Dekkera bruxellensis*	*Clostridium* sp., *C. tyrobutyricum*
42nd day	*Dekkera bruxellensis*	*Clostridium* sp., *C. tyrobutyricum*
		Lactobacillus sp., *L. satsumensis*
49th day	*Dekkera bruxellensis*	*Clostridium* sp.
56th day	*Dekkera bruxellensis*	*Clostridium* sp.
	Candida glabrata, Pichia manshurica	
70th day	*Dekkera bruxellensis*	*Clostridium* sp.
77th day	*Dekkera bruxellensis*	*Clostridium* sp.
		Pediococcus pentosaceus
84th day	*Dekkera bruxellensis*	*Clostridium* sp.
		Pediococcus pentosaceus
91st day	not detected	*Clostridium* sp., *C. tyrobutyricum*
		Acetobacteraceae bacterium
98th day	*Dekkera bruxellensis*	not detected
	Saccharomycopsis fibuligera	

Conclusion

The present study was principally carried out to gain insight into the microbial species naturally occurring in Loog-Pang used to produce local vinegar. This report revealed a complex

and heterogeneous biodiversity in the local Loog-Pang and vinegar sample. In addition, the profile was well explained on low acetic acid content, less than 2% (v/v) acid content, found in the 91-days TRV. Nonetheless, this information was definitely beneficial for the vinegar producers for their future consideration on culture development to enhance the quality control of the vinegar production process.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest**.**

Acknowledgements

This work was supported from the Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Kasetsart University, Thailand for funding. In addition, the authors thank to Miss Chatmanee Nampuak for her valuable support.

Reference

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis, 18th edn. Association of Official Analysis Chemists, arlington.

BAM. 1998. Aerobic Plate Count. 8th ed. Available from: https://www.Fda.Gov/food/foodscienceresearch/laboratorymethods/ucm063346.html, 9 April 2020.

BAM. 2000. Yeast Mold and Mycotoxins. 8th ed. Available from: https://www.Fda.Gov/food/foodscienceresearch/laboratorymethods/ucm071435.html , 9 April 2020.

Braun, M., Mayer, F., Gottschalk, G. 1981. *Clostridium aceticum* (wieringa), a microorganism producing acetic acid from molecular hydrogen and carbon dioxide. Arch. Microbiol. 128: 288–293.

Cocolin, L., Bisson, L.F., Mills, D.A. 2000. Direct profiling of the yeast dynamics in wine fermentations. FEMS Microbiol. Lett. 189(1): 81–87.

Haghshenas, B., Nami, Y., Abdullah, N., Radiah, D., Rosli, R., Barzegari, A., Yari Khosroushahi, A. 2015. Potentially probiotic acetic acid bacteria isolation and identification from traditional dairies microbiota. Int. J. Food Sci. Tech. 50(4): 1056–1064.

Ivy, R.A., Wiedmann, M. 2014. CLOSTRIDIUM: Clostridium Tyrobutyricum in Encyclopedia of Food Microbiology. 2nd Edn. 468–473.

Luangkhlaypho, A., Pattaragulwanit, K., Leepipatpiboon, N., Yompakdee, C. 2014. Development of a defined starter culture mixture for the fermentation of sato, a thai rice-based alcoholic beverage. Sci. Asia. 40: 125–134.

Milanović, V., Osimani, A., Garofalo, C., Filippis, F.D., Ercolini D., Cardinali, F., Taccari, M., Aquilanti, L., Clementi, F. 2018. Profiling white wine seed vinegar bacterial diversity through viable counting, metagenomic sequencing and PCR-DGGE. Int. J. Food Microbiol. 286: 66–74.

Muyzer, G., De Waal, E.C., Uitterlinden, A.G. 1993. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. Appl. Environ. Microbiol. 59: 695–700.

Nie, Z., Zheng, Y., Du, H., Xie, S., Wang, M. 2015. Dynamics and diversity of microbial community succession in traditional fermentation of Shanxi aged vinegar. Food microbiol. 47: 62–68.

Ozturk, I., Caliskan, O., Tornuk, F., Ozcan, N., Yalcin, H., Baslar, M., Sagdic, O. 2015. Antioxidant, antimicrobial, mineral, volatile, physicochemical and microbiological characteristics of traditional home-made Turkish vinegars. LWT-Food Sci Technol. 63: 144–151.

Rantsiou, K., Comi, G., Cocolin, L. 2004. The rpoB gene as a target for PCR-DGGE analysis to follow lactic acid bacterial population dynamics during food fermentations. Food Microbiol. 21: 481–487.

Schumaker, M.R., Diako, C., Castura, J.C., Edwards, C.G., Ross, C.F. 2019. Influence of wine composition on consumer perception and acceptance of *Brettanomyces* metabolites using temporal check-all-that-apply methodology. Food Res. Int. 116: 963–972.

Shi, L., Du, N., Yuan, Y., Shu, S., Sun, J., Guo, S. 2016. Vinegar residue compost as a growth substrate enhances cucumber resistance against the Fusarium wilt pathogen *Fusarium oxysporum* by regulating physiological and biochemical responses. Environ Sci Pollut Res. 23: 18277–18287.

Spano, G., Lonvaud-Funel, A., Claisse, O., Massa, S. 2007. *In vivo* PCR-DGGE analysis of *Lactobacillus plantarum* and *Oenococcus oeni* populations in red wine. Curr Microbiol. 54: 9–13.

Xu, W., Huang, Z., Zhang, X., Li, Q., Lu, Z., Shi, J., Xu, Z., Ma, Y. 2011. Monitoring the microbial community during solid-state acetic acid fermentation of Zhenjiang aromatic vinegar. Food Microbiol. 28: 1175–1181.

Zhang, Q., Huo, N., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, R., Hou, H. 2017. Aroma-enhancing role of Pichia manshurica isolated from Daqu in the brewing of Shanxi Aged Vinegar. Int. J. Food Prop. 20: 2169–2179.

Influence of lecithin on physicochemical properties and stability of sunflower seed milk

Sudthipa Ruayboonsong[a], **Thepkunya Harnsilawat**[b,*]

[a]Agro-Industrial Innovation and Technology Program, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

Abstract

Plant-based milk is a non-dairy milk alternative with advantageous health benefits and can produce from various plant types. Sunflower seed is another material capable for plant-based milk production. Sunflower seed milk (SSM) is an oil in water emulsion. Its instability led to undesirable phase separation characteristics which are important for consumer acceptance. Lecithin addition is necessary for phase separation elimination. Therefore, the influence of lecithin on physicochemical properties and stability of SSM was studied. The physicochemical properties and stability of SSM were investigated under different lecithin concentrations (0-2 wt%). The stabilisation of SSM emulsions was evaluated through visual analysis. The addition of lecithin mainly affected pH, viscosity, and stability. Increasing lecithin concentration resulted in an increase in pH values of SSM from 6.75 to 7.17. The addition of lecithin resulted in viscosity and stability improvement. Lecithin improved flowability in which its increased viscosity and promoted stability of SSM. At the highest lecithin level (2 wt%), the sample showed the highest stability during 28hr storage. In conclusion, the results gained from this study showed the possible application of lecithin used in non-dairy milk alternative product.

Keywords: Lecithin, Physicochemical properties, Sunflower seed milk

Introduction

Consumers became more aware of their health including eating behaviour as they are more interested in health benefits products. Hence, abundant plant-based milk products are available in the market to provide more healthy options for those health-conscious consumers. Plant-based milk can substitute for lactose intolerant and dairy product allergy with advantageous health benefits. Milk alternatives contain functionally health-promoting properties (i.e. cholesterol-free, lactose-free, low fat, nutritional value) that appeal to health-conscious consumers (Sethi et al., 2016). Plus, Goldstein Market Intelligence analysts forecast the plant-based milk market size is set to grow at a CAGR of 10.4% over the forecast years (Goldstein Research, 2020). As diverse commercial plant-based milk available in the market, for instance soy-, rice-, sesame-, oat-, pistachio- and walnut-based milk substitutes, there still have the unfamiliar flavor of plant-based milks aside to the traditional bovine milk. Hence, it is important to understand the physicochemical properties of plant-based milk in order to develop more acceptable plant-based milk products in a wider range (McClements et al., 2019). To increase plant-based milk alternatives acceptability, many studies determine the plant-based milk processing. There are the studies about processing conditions of plant-based milk to solve sensory problems and physicochemical properties comprehension (Lee et al., 1992; Ukwuru et al., 2011; Ahmadian-Kouchaksaraei et al., 2014).

Sunflower (*Helianthus annulus L.*) seed is an alternative option from plant-based milk production. Sunflower seeds are loaded with antioxidants and anti-inflammatory agents. They are a good source of protein, fibre, essential fatty acids, calcium, iron, zinc, magnesium, potassium, manganese, selenium, and vitamins B and E. With abundance health benefits of an anti-inflammatory, metabolism-boosting mineral compost (McCullosh, 2018). Sunflower seed is a more affordable price when compared to other plant sources such as quinoa, flax seed, walnut, etc. Therefore, sunflower seed is appreciated for plant-based milk production, by 65% target consumer-voted from consumer survey analysis and maximise sunflower seed utilisation apart of common products like snacks, and oil. Advantageously, sunflower seed milk (SSM) is suitable for vegan, dairy-free, nut-free, lactose-free, and general healthy diets which is an alternative option for nut allergy consumer. Previously, we conducted the preliminary tests of SSM production in order to optimise the soaking time and seed: water ratio. SMM can be produced by water extraction from the 8 hr soaked sunflower seed with 1: 4 (seed: water) ratio as the result from preliminary test. Additionally, we found the phase separation of SSM occurred during storage in the preliminary test. Therefore, in the present study we investigated the influence of lecithin on physicochemical properties and stability of sunflower seed milk in order to state the optimum level of lecithin for a product with higher stability. Lecithin is chosen to study because it is an interesting ingredient to use in plant-based product since it is derived from soy and it is safe to use as shown in CODEX approved list (CODEX, 2019).

Materials and Methods

Materials

Raw sunflower seed kernels were obtained from the local farm, Lop Buri, Thailand and stored at room temperature until used. Powdered lysolecithin (SOLEC 8160 deoiled enzyme-modified soy lecithin; HLB 9; acetone insoluble matter, min. 97%; AV, max. 36 mg KOH/g; moisture, max. 1.5%) was obtained from Solae company (USA). All chemical, reagents and solvents were obtained in analytical grade and commercially available.

Sunflower seed milk preparation (SSM)

Sunflower seeds were soaked in the tap water for an optimised 8 hr under room temperature (Ahmadian-Kouchaksaraei et al., 2014), then the water was drained, and the seeds were washed for several times. Water was added at 1:4 ratio (seed:water) and blended with the blender (Blender HR2115/02, Phillips, Netherlands) at high speed for 2-3 mins. The slurry was filtrated with a double-layered cloth and the various lecithin concentration was added to the filtrated liquid (sunflower seed milk, SSM) before homogenising (Ultra Turrax T25 Digital, IKA, Germany) at 15,000 rpm for 3 mins. The samples were then pasteurised at 63°C for 30 mins and hot filled in sterilised glass bottles before storing at 4°C for further analysis.

Preparation of lecithin addition in sunflower seed milk

Different lecithin levels were prepared by adding into the raw SSM in various proportions as given in Table 1. Then the lecithin added SSM would continue for homogenisation and heat treatment process. The effect of lecithin was studied from the different lecithin addition to SSM. The basis trials of lecithin studied were 0%, 1%, and 2 wt%.

Table 1 Proportion used of lecithin in sunflower seed milk

Treatment	Lecithin (wt%)	Sunflower seed milk (g)	Lecithin (g)
1	0	600	0
2	1	594	6
3	2	588	12

Chemical analysis

The total soluble solid of SSM was measured by ATAGO hand held refractometer 0 - 32ºBrix (ATAGO, Japan). For pH measurement was Eutech instruments pH 510 pH/mV/ºC meter (Thermo Scientific, USA). Total solids were analysed by the reference AOAC method 925.23 (AOAC, 2000) and total fat content was determined by Mojonnier method (AOAC 989.05, 2006).

Physical analysis

Viscosity of SSM was measured by Brookfield DV-III Rheometer. Measurements were carried out with the enhanced UL Adapter^{TM} at the range of shear rate of 12.2-306 (s^{-1}). Colour of SSM was detected by Chroma meter (Chroma Meter model CR-410, Minolta Co. Ltd., Osaka, Japan). It is calibrated with reading reference of white plate L* = 98.14; a* = 0.23, b*

= 1.89. Colour in CIE L* a* b* colour system is recorded where L* or lightness, white (100) to black (0), a* indicates hue on red (+) to green (-) and b* indicates hue on yellow (+) to blue (-). The hue (h) and chroma (C*) could be determined from the Equation 1 and 2:

$$C^* = [(a^*)^2 + (b)^{*2}]^{½} \quad (1)$$

$$h = 180 + \tan^{-1} (b^*/a^*) \text{ When } a^* < 0 \quad (2)$$

Stability

Stability was determined through phase separation analysis. Phase separation percentage observed from the product layer separation after the studied time storage under chilled temperature (4±1°C). The SSM (10 g) was poured into 15 mL glass tubes then allowed to stand for gravitational phase separation in the refrigerator and observed the phase separation for 28 hr. The appearance image of SSM samples during storage were acquired using a digital camera. The total height of sample (H_t) and the height of sediment layer formed (H_s) was recorded. Phase separation index could be calculated from the Equation 3:

$$\%\text{Phase separation} = (H_s/H_t) \times 100 \quad (3)$$

Statistical analysis

To assess the significant difference among experiment variables, a complete randomised design (CRD) One-Way ANOVA was performed using IBM SPSS statistics software (SPSS Inc.; Chicago, IL, USA). Duncan's test was used to test the statistical difference of means at 95% confidence level. Results were reported as the mean ± standard deviation of 2 replications.

Results and Discussion

Physicochemical properties of lecithin addition in sunflower seed milk

SSM produced in this study had fat content ranged from 4.32 to 5.39%. Table 2 showed the influence of lecithin on pH, total soluble solid, and total solids of SSM. The results showed that lecithin concentration affected those properties of SSM. Increasing lecithin, chemical properties (pH, total soluble solid and total solids) of SSM increased because of synergistic effect between lecithin and protein (Wang et al., 2017). As lecithin may form complexes with protein substances resulting in increasing pH values (Oke et al., 2010). The higher the lecithin percentage addition, the greater pH derived via high pH perceived from lecithin properties (ALC, 2003). Due to an increase in pH from adding more lecithin that might lead to increase protein solubility. Thus, lecithin addition during processing could provide beneficial effects by degrading soluble solids loss (Oke et al., 2010).

Table 2 Chemical properties of sunflower seed milk by lecithin concentration variables

Lecithin (wt%)	pH	Total soluble solid (°Brix)	Total solids (%)	Fat content (%)
0	6.75 ± 0.06^{c}	2.03 ± 0.08^{c}	8.29 ± 0.07^{c}	4.36 ± 0.22^{b}
1	7.04 ± 0.03^{b}	2.57 ± 0.23^{b}	9.36 ± 0.16^{b}	4.32 ± 0.64^{b}
2	7.17 ± 0.04^{a}	3.63 ± 0.57^{a}	10.37 ± 0.14^{a}	5.39 ± 0.18^{a}

means with different superscripts letters are significantly different at 95% confidence level.

As the result in Fig. 1, the viscosity decreased when the shear rate increased. The flow behaviour of all samples exhibited pseudo plastic non-newtonian or shear thinning which is due to the application of shear, the rearrangement of molecules and changes in spatial distribution in order to reduce stress (Faria et al., 2017; Rapp, 2017). Lecithin is a viscosity modifier as it could increase viscosity. Lecithin is added to various plant-based milk to adjust texture and improve stability. The viscosity of commercial soy milk is usually approximately 4.7 cP (20°C, 60 rpm) (Tang, 2013). Similar to the result from Tang (2013), the low amount of total solids content of soy milk could contribute to low viscosity. Accordingly, at higher lecithin concentration (2 wt%), the viscosity increased regard to its high total solids and maybe because lecithin can reduce fat surface's tension and allows to coat dispersed particles which improve the flowability and significantly homogeneity (ALC, 2003).

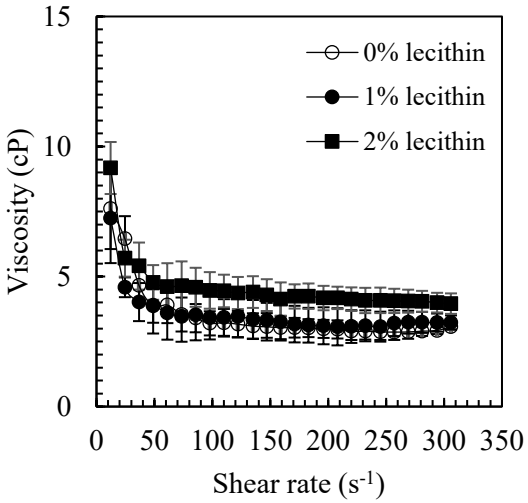


Fig.1 Viscosity of sunflower seed milk with the addition of different lecithin concentration, where error bars indicate ± SD

Colour value L*, a*, b*, Chroma and Hue are shown in Table 3. Lecithin addition significantly increased b* value, chroma and hue angle of SSM ($p < 0.05$). Increasing in b* value indicated yellowness respect to hue derived from lecithin content. Plus, the addition of lecithin increased chroma value as it represented in brightness. The lightness value of SSM was influenced by the rise of fat content, as the result shown in Table 2, the high content of fat globules may bring to scatter more lightness or whiter product (Chantrapornchai et al., 2008). The positive value of a* indicating slight redness referred to its natural pigment of sunflower

seed. Although, lecithin addition decreased a*, the reducing a* showed that lecithin addition could improve green tint. Lecithin enhanced hue angle of SSM that associated with the low value of redness, a*. Thus, lecithin addition could affect the intensity of SSM colour.

Table 3 Colour analysis of sunflower seed milk by lecithin concentration variables

Lecithin (wt%)	L*	a*	b*	Chroma	Hue angle
0	71.48 ± 0.52^{b}	0.85 ± 0.13^{a}	10.61 ± 0.10^{c}	10.64 ± 0.11^{c}	85.45 ± 0.66^{c}
1	72.18 ± 0.25^{a}	0.64 ± 0.04^{b}	10.82 ± 0.05^{b}	10.84 ± 0.06^{b}	86.62 ± 0.20^{b}
2	71.96 ± 0.40^{b}	0.50 ± 0.07^{c}	11.31 ± 0.07^{a}	11.32 ± 0.07^{a}	87.48 ± 0.38^{a}

means with different superscripts letters are significantly different at 95% confidence level.

Stability

The stability of SSM was determined by phase separation percentage and appearance observation shown in Fig. 2. SSM presented its instability as the gravitational sedimentation due to the layer separation observed and presenting an opaque liquid layer upward. Nevertheless, the samples seem visually stable only after being prepared immediately, especially the control sample (no lecithin added), the sedimentation gradually developed over time. According to the different density that lead to gravitational separation, the lower density of oil bodies in plant-based milk, which is typically less than water density, would tend to move upward. Likewise, the greater density shifts downward (McClements et al., 2019). The phase separation increased upon the storage time and began to present instability after 4 hours of storage. After storing SSM for 28 hr, we found that the phase separation percentages of SSM containing 0% and 1% lecithin were ranged from 62.52 to 74.78% while 2% lecithin added showed no phase separation. This indicated that 2%wt lecithin could give the better stability properties of SSM. The turbid phases developed in the upper phase of the samples lecithin variables apart from the translucent upper layer of the control sample. Hence, an increase of lecithin concentration could increase the stability of the sample by degrading the sedimentation process. Due to the viscosity increased from lecithin addition, the dense texture of SSM was modified and led to retard gravitational separation (McClements et al., 2019).

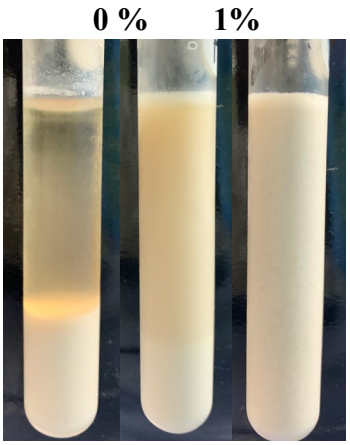


Fig. 2 Appearance of sunflower seed milk samples with the different lecithin addition concentration (0-2 wt%) during chilled storage for 28 hr

Conclusion

Based on analysis of lecithin used in sunflower seed milk (SSM) in this study, lecithin addition to plant-based milk is applicable. The addition of lecithin to SSM presented beneficial effects on physicochemical properties and stability. Among the physicochemical parameters affected, lecithin could help reduce soluble solids loss and the viscosity adjustment by lecithin was developed and led to an increase in stability of SSM consequently. The sedimentation of SSM could be decreased at high lecithin concentration. To slow down the phase separation, further modification may be anticipated with the addition of thickening agent, processing of homogenisation and density reduction for emulsification properties of SSM or non-dairy milk development.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

Authors acknowledge the Department of Product Development, Kasetsart University, Bangkok, Thailand for technical support during the study. The financial use in this study was supported by the Agro-Industrial Innovation and Technology Program.

References

Ahmadian-Kouchaksaraei, Z., Varidi, M., Varidi, M.J., Pourazarang, H. 2014. Influence of processing conditions on the physicochemical and sensory properties of sesame milk: A novel nutritional beverage. LWT. Food Sci Technol. 57: 299–305. doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.028

ALC. 2003. Lecithin Applications. Oxford, Connecticut, USA. http://www.americanlecithin.com/leci_appfood.html, 11 December, 2020.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. 17th ed., Maryland. USA.

AOAC. 2006. Official Methods of Analysis. 18th ed., Maryland. USA.

Chantrapornchai, W., Clydesdale, F.M., McClements, D.J. 2008. Understanding colors in emulsions. pp. 364–387 *In* Culver, C.A., Wrolstad, R.E. (eds). ACS Symposium Series Vol. 983. Color Quality of Fresh and Processed Foods. Oxford University Press. Washington DC, USA.

CODEX. 2019. Codex General Standard for Food Additives (GSFA) Online Database. http://www.fao.org/gsfaonline/index.html, 28 August 2020.

Faria, J.T., Oliveira, E.B., Minim, V.P.R., Minim, L.A. 2017. Performance of Quillaja bark saponin and β-lactoglobulin mixtures on emulsion formation and stability. Food Hydrocoll. 67: 178-188. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.01.013

Goldstein Research. 2020. Global Plant Based Milk Market Overview. NY, New York, USA. https://www.goldsteinresearch.com/report/global-plant-based-milk-market-outlook-2016-2024, 28 August 2020.

Lee, C., Beuchat, LR. 1992. Chemical, physical, and sensory characteristics of peanut milk as affected by processing conditions. J Food Sci 57: 401–405. doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb05503.x

McClements, D.J., Newman, E., McClements, I.F. 2019. Plant-based milks: A review of the science underpinning their design, fabrication, and performance. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 18: 2047–2067. doi:10.1111/1541-4337.12505

McCullosh, M. 2018. Are Sunflower Seeds Good for You? Nutrition, Benefits and More. San Francisco, CA, USA. https://www.healthline.com/nutrition/sunflower-seeds, 24 November 2020.

Oke, M., Jacob, J.K., Paliyath, G. 2010. Effect of soy lecithin in enhancing fruit juice/sauce quality. Food Res. Int. 43: 232–240. https://doi:10.1016/j.foodres.2009.09.021

Rapp, B.E. 2017. Chapter 9 - Fluids, pp 243-263 in Micro and Nano Technologies Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics, 1st ed. Elsevier, USA.

Sethi, S., Tyagi, S., Anurag, R. 2016. Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review. J. Food Sci. Technol. 53: 3408–3423. doi.org/10.1007/s13197-016-2328-3

Tang, J. 2013. Physicochemical and sensory properties of soymilk from five soybean lines. M.Sc. Thesis, Faculty of Food science, University of Missouri-Columbia. Columbia, United States.

Ukwuru, M.U., Ogbodo, A.C. 2011. Effect of processing treatment on the quality of tigernut milk. Pak. J. Nutr. 10: 95-100. doi.org/10.3923/pjn.2011.95.100

Wang, S., Shi, Y., Tu, Z., Zhang, L., Wang, H., Tian, M., Zhang, N. 2017. Influence of soy lecithin concentration on the physical properties of whey protein isolate-stabilized emulsion and microcapsule formation. J. Food Eng. 207: 73–80. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.020

การพัฒนาจีวรพระจากผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมจากแก่นขนุน

The development of dyeing Buddhist monk cotton rope using natural dyes from Jackfruit wood

พชรพล ศิริสุนทร, ขนิษฐา วัชราภรณ์*, กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล, ดวงรัตน์ หิรัญญะสิริ

Pacharapol Sirisoontorn, Kanitta Watcharaporn*, Korntip Watcharapanyawong Techametheekul, Duangrat Hirunyasiri

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

งานวิจัยนี้พัฒนากระบวนการย้อมสีผ้าไตรจีวรด้วยสีย้อมธรรมชาติจากแก่นขนุนเพื่อให้ได้วิธีการย้อมไตรจีวรด้วยสีสกัดจากแก่นขนุนที่ได้สีตามตัวอย่างของสีไตรจีวรที่ย้อมด้วยสีเคมี จากการทดลองพบว่าในการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากแก่นขนุนนั้น ควรสับแก่นขนุนให้เป็นชิ้นเล็กๆ (ความยาวประมาณ 1 นิ้ว) หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแก่นขนุนต่อน้ำเท่ากับ 1: 10 นำมาต้มน้ำเดือด เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำแก่นขนุนออกแล้วเคี่ยวไฟอ่อนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในกระบวนการย้อมใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผ้าฝ้ายต่อน้ำสกัดจากแก่นขนุนเท่ากับ 1:20 ย้อมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 60 กรัมต่อลิตร เพื่อให้ได้เฉดสีตามต้องการ พบว่าผลการย้อมของผ้าฝ้ายที่ถูกย้อมทับซ้ำ 4 ครั้ง แล้วนำมาจุ่มในสารเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) 5 กรัมต่อลิตร ได้เฉดสีที่ยอมรับได้ประเมินด้วยเกรย์สเกลคะแนน 4 จาก 5 จากนั้นนำไปจุ่มสารละลายอะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต ($AlK(SO_4)_2$) เพื่อเพิ่มความคงทนของสีต่อการซัก

คำสำคัญ: แก่นขนุน, ผ้าไตรจีวร, สีย้อมธรรมชาติ

Abstract

This research developed a procedure for dyeing Buddhist monk robe using natural dyes from Jackfruit wood to finding the dyeing procedure that can matching color of the Buddhist monk robe using Jackfruit wood with the reference monk rope dyed from synthetic dyes. From the experiment, it was found that to extract the dyes from the Jackfruit wood, which was needed to be chopped into small pieces (about 1 inch long) and was soaked in water for 24 hours using a 1:10 weight ratio of Jackfruit wood to water and then boiled at 100 °C for 3 hours. After boiling, the residue was removed and then the bath was simmered for an additional 1 hour. In dyeing process, using a weight ratio of cotton fabric to jackfruit extraction 1:20, boiled with and 60 g/l Sodium Chloride (NaCl), for 1 hour. It was found that, the fabric which dyed over and over for 4 cycles then mordanting with 5 g/l Ferrous Sulfate ($FeSO_4$) showed the accepted depth of color by grey scale rating score 4/5. In order to Improve Colorfastness to washing the samples were dipped in ($AlK(SO_4)_2$) solution.

Keywords: Buddhist monk rope, Jackfruit wood, natural dyes

คำนำ

นับแต่อดีตกาลพระภิกษุสงฆ์นั้นครองผ้าไตรจีวรซึ่งย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติ หนึ่งในสีย้อมธรรมชาตินั้นได้มาจากแก่นขนุน ซึ่งกรรมวิธีการย้อมผ้าไตรจีวรจากสีแก่นขนุนนั้นได้สืบทอดกันต่อมาเป็นระยะเวลายาวนาน แต่ทว่าในกรรมวิธีนี้ได้มีปัญหาในที่เรื่องระยะเวลาที่ใช้ค่อนข้างยาวนาน เฉดสีไม่แน่นอน และความคงทนของสีย้อมค่อนข้างต่ำ ในการย้อมผ้าไตรจีวรด้วยสีย้อมธรรมชาติผลการย้อมมักได้เฉดสีที่แตกต่างกันซึ่งอาจเป็นผลจากอายุและความสมบูรณ์ของแก่นขนุนที่ใช้และปัจจัยในการย้อมอื่นๆ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการอนุรักษ์วัฒนธรรมโดยมีการนำภูมิปัญญาดั้งเดิมกลับมาผนวกใช้ในงานบุญทอดกฐินที่จะมีการย้อมผ้าไตรจีวรด้วยสีสกัดจากแก่นขนุนในการประกอบพิธีทอดกฐิน เพื่อสืบสานวัฒนธรรมไทยดั้งเดิมและทำนุบำรุงพุทธศาสนาให้คนรุ่นใหม่ได้รับรู้สืบต่อไปหากการย้อมก็ยังไม่ได้ผลเป็นที่พอใจนัก การย้อมสีจีวรพระด้วยสีสกัดจากแก่นขนุนจะให้จีวรสีกรักซึ่งเป็นจีวรที่พระสงฆ์ฝ่ายอรัญวาสีที่เน้นการปฏิบัติแบบธุดงควัตรนุ่งห่มด้วยการครองผ้า 3 ชิ้น ได้แก่ สบงจีวร และสังฆาฏิ ซึ่งมีวิธีทำตายตัวสืบทอดกันมาแต่พุทธกาลหากแต่การย้อมด้วยสีธรรมชาติมีความยุ่งยากจึงเลือนหายไปตามกาลเวลาบ้าง

แก่นขนุน ได้จากส่วนลำต้นของต้นขนุนบางครั้งเรียกไม้แก่นขนุนนี้ว่ากรัก แก่นขนุนมีคุณสมบัติต้านแบคทีเรีย และสามารถป้องกันปลวกได้จึงนิยมนำไปใช้ในการทำเฟอร์นิเจอร์ เสากระโดงเรือ ไม้พาย และเครื่องมือชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังนำมาสกัดเป็นสีสำหรับย้อมผ้า สีแก่นขนุนที่สกัดได้จะมีลักษณะเฉดสีเหลืองเข้ม โดยมีองค์ประกอบหลักของสีคือสารมอร์ริน (morin) (Fig. 1) (หทัยรัตน์, 2546)

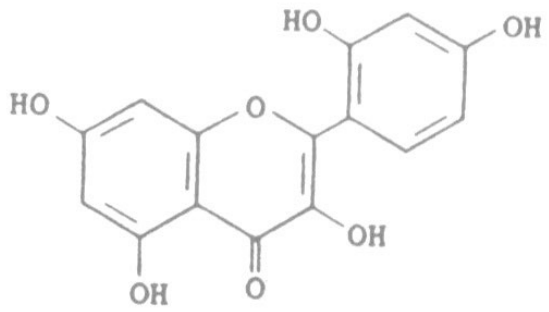


Fig. 1 Chemical structure of morin. (PubChem, 2014)

การย้อมสีจากน้ำสกัดแก่นขนุนมักย้อมด้วยวิธีการย้อมแบบวิธีมอร์แดนท์ เพื่อเพิ่มความคงทนของสี หากแต่กระบวนการย้อมมักจะต้องต้มย้อมกันเป็นเวลานาน เคี่ยวกัน5-6 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เฉดสีที่เข้ม นอกจากนี้การใช้โซเดียมคลอไรด์จะช่วยลดประจุของสีย้อมและเส้นใย อีกทั้งช่วยเปิดเส้นใยผ้า ทำให้เส้นใยขยายตัวออก เพื่อให้สีสามารถซึมเข้าสู่เส้นใยได้ดีขึ้น และช่วยจับสีให้มาเกาะบนเส้นใยทำให้ย้อมได้สีเข้มขึ้น (พันธศิริ, 2547) ส่วนการใช้เฟอรัสซัลเฟตเป็นสารประกอบเหล็กที่ช่วยให้ความคงทนของสีต่อแสงและการซักดี (ศรัณยา, 2551) อีกทั้งอะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรงจึงทำให้สีที่ได้มีความคงทนมากขึ้น (สุภาพ, 2544)

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาในการพัฒนาผ้าไตรจีวรด้วยสีธรรมชาติจากแก่นขนุนให้มีเฉดสีใกล้เคียงกับผ้าไตรจีวรที่ย้อมด้วยสีเคมีเพื่อนำไปใช้ในการสืบสานประเพณีทอดกฐิน โดยปรับวิธีย้อมให้สะดวกและรวดเร็วขึ้น โดยใช้วิธีการย้อมทับและมีการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl), สารเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) และสารอะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต ($AlK(SO_4)_2$) เข้ามาช่วยในกระบวนการย้อม หลังจากนั้นประเมินเฉดสีที่ยอมรับได้โดยเกรย์สเกลและประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือ วัสดุ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แก่นขนุน
2. ผ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นผ้าฝ้ายซัลฟอร์ไรท์ (sanforized fabric)
3. เครื่อง Shaking water Bath (Model DL – 2003)
4. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เกรดสำหรับห้องทดลอง (AR)
5. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดสำหรับห้องทดลอง (AR)
6. อะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต ($AlK(SO_4)_2$) เกรดสำหรับห้องทดลอง (AR)
7. สบู่มาตรฐาน (standard soap) ที่ใช้ในการทดสอบการซักเป็นสารซักฟอกมาตรฐานของ ISO ชนิดไม่มีสารเรืองแสง
8. ผ้ามาตรฐานสำหรับการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (multifiber) มาตรฐาน ISO 105 F10 ชนิด DW
9. เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (Rotawash)

การเตรียมน้ำย้อมจากแก่นขนุน

สับแก่นขนุนให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก (ความยาวประมาณ 1 นิ้ว) หลังจากนั้นแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักแก่นขนุนต่อน้ำเท่ากับ 1:10 นำมาต้มเดือด เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำแก่นขนุนออกแล้วเคี่ยวไฟอ่อนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมแก่นขนุน

ผ้าฝ้าย 5 กรัม อัตราส่วนน้ำหนักของผ้าฝ้ายต่อน้ำสกัดจากแก่นขนุนเท่ากับ 1:20 ย้อมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)โดยใช้อัตราส่วน 10, 20, 40 และ 60 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำการย้อมทับทั้งหมด 4 ครั้งด้วยอัตราส่วนเดิมโดยในการย้อมแต่ละครั้งจำเป็นต้องตากผ้าให้แห้งก่อนนำมาย้อมในครั้งต่อไป

การจุ่มผ้าฝ้ายย้อมสีแก่นขนุนด้วยสารละลายเฟอรัสซัลเฟต

เลือกสภาวะการย้อมที่สีเข้มสุดไปทำการทดลองต่อไปซึ่งคือผ้าฝ้ายที่ย้อมทับ 4 ครั้งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วน 60 กรัมต่อลิตร มาจุ่มในสารละลายเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) 1.25, 2.5, 5, และ 10 กรัมต่อลิตรตามลำดับ โดย L:R เท่ากับ 1:20

การชุบสารละลายอะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต ($AlK(SO_4)_2$)

นำผ้าฝ้ายหลังจุ่มสารละลายเฟอรัสซัลเฟตมาชุบด้วยสารละลายอะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต ($AlK(SO_4)_2$ โดยอัตราส่วน สารอะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต 10 กรัม ต่อน้ำ 100 กรัม L:R เท่ากับ 1:22 โดยแช่ไว้ 20 นาทีแล้วนำไปตากให้แห้ง (ภัทรานิฎชรณ์ พิมพ์ประพร, 2558)

การเปรียบเทียบเฉดสี

นำผ้าฝ้ายหลังจุ่มสารละลายเฟอรัสซัลเฟตมาเทียบกับผ้าฝ้ายย้อมสีสังเคราะห์แก่นขนุนในตู้ไฟเทียบสี light matching box โดยใช้เกรย์สเกลเป็นเกณฑ์ประเมิน

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 โดยตัดผ้าทดลองขนาด 4 × 10 เซนติเมตร แล้วประกบด้วยผ้ามัลติไฟเบอร์ ขนาด 4 ×10 เซนติเมตร เย็บติดกันทางด้านกว้างของผ้า แล้วนำมาซักในสารละลายสารซักฟอกต่อผ้าเท่ากับ 50:1 (โดยน้ำหนัก) ซักที่อุณหภูมิ40 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (ไม่ใช้ลูกเหล็กขัดถู) ในเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (Rotawash) จากนั้นล้างผ้าให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นสองครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำซึ่งไหลตลอดเวลาเป็นเวลา 10 นาที ผึ่งลมให้แห้งโดยแขวนผ้ามัลติไฟเบอร์อยู่ด้านบน เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของสีที่อยู่บนชิ้นทดสอบ ประเมินออกมาเป็นอัตราความคงทนของสีโดยใช้เกรย์สเกล ซึ่งระดับความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Ratting) มีค่าตั้งแต่ระดับ 1 ถึง 5

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลค่าสีจากการย้อมแก่นขนุนด้วยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 10, 20, 40 และ 60 กรัมต่อลิตร โดยทำการย้อมทับทั้งหมด 4 ครั้ง แสดงใน Table 1 พบว่าตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 60 กรัมต่อลิตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการย้อม ซึ่งช่วยเปิดเส้นใยทำให้สีเข้าสู่เส้นใย จึงให้เฉดสีเข้มสูงสุดและเมื่อย้อมทับก็ให้เฉดสีที่เข้มขึ้น (พันธศิริ, 2547) และได้เฉดสีเข้มสูงสุดเมื่อย้อมทับทั้งหมด 4 ครั้ง ซึ่งจากการทดลองมีแนวโน้มความเข้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ การย้อมทับครั้งที่ 4 เป็นครั้งสุดท้ายจึงได้เฉดสีที่เข้มที่สุด จึงเลือกวิธีการย้อมโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เท่ากับ 60 กรัมต่อลิตร และย้อมทับจำนวน 4 ครั้ง เพื่อนำไปศึกษา

ผลการพัฒนาการปรับปรุงความคงทนของสีและปรับเฉดสีให้เข้มขึ้นด้วยสารละลายเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ด้วยความเข้มข้นต่างๆ 4 ความเข้มข้น ได้แก่ 1.25, 2.5, 5 และ 10 กรัมต่อลิตรแสดงใน Table 2 พบว่า ผ้าฝ้ายย้อมสีแก่นขนุน และจุ่มในสารละลายเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) 5 กรัมต่อลิตรให้เฉดสีใกล้เคียงกับเฉดสีต้นแบบมากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้สีติดเส้นใยและช่วยเปลี่ยนเฉดสีธรรมชาติ (ศรัณยา, 2551) ที่ผ่านการย้อมมาแล้วเมื่อจุ่มสารละลายเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากสารประกอบเหล็กเฉดสีที่ได้มีความเข้มขึ้นและเฉดสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนใกล้เคียงกับต้นแบบมากที่สุด

Table 1 Cotton fabric dyed with Jackfruit wood

NaCl (g/l)	Cycles 1	Cycles 2	Cycles 3	Cycles 4
10				
20				
40				
60				

Table 2 Cotton fabric dyed with Jackfruit wood after mordanting with Ferrous Sulfate solution (FeSO4)

$FeSO_4$ (g/l)	Dyed fabric	Chemical dye fabric (TARGET COLOR)
1.25		
2.5		
5		
10		

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก ของผ้าฝ้ายย้อมแก่นขนุนที่ผ่านการมอร์แดนท์ด้วยสารละลายเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) แสดงใน Table 3 พบว่า ผ้าที่ผ่านการมอร์แดนท์ด้วยสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต ($AI_2(SO_4)_3$) เป็นสารมอร์แดนท์โดยใช้ สารอะลูมิเนียมซัลเฟต ($AI_2(SO_4)_3$) 10 กรัมต่อน้ำ 100 กรัมตามวิธี(ภัทรานิฏชรณ์ พิมพ์ประพร, 2558) พบว่าความคงทนของสีต่อการซักนั้นเพิ่มมากขึ้นจาก 3 เป็น 4-5 แต่ผลของความคงทน

ของสีต่อการซักนั้นยังไม่เป็นที่น่าพอใจ จึงทา การพัฒนาเพื่อเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟส ($FeSO_4$) จะมีค่าความคงทนของสีต่อการซักเพิ่มขึ้นคะแนน 3 จาก 5 ซึ่งเป็นผลมาจากโลหะของสารละลายเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรง (strong complex) กับสีย้อมและเส้นใย ทำให้สีที่ได้มีความคงทนมากขึ้น การแทรกซึมของสีย้อมเข้าไปภายในเส้นใยและสามารถเกาะติดบนเส้นใยได้ (สุภาพ, 2544)

Table 3 Colour fastness to washing with soap

	without mordant	Fabric mordanted with $FeSO_4$
Colour change	1	3
colour staining		
- Acetate	4	5
- Cotton	4	4
- Nylon	5	5
- Polyester	5	5
- Acrylic	5	5
- Wool	5	5

Table 4 Colour fastness to washing with soap

	Fabric mordanted with $FeSO_4$	Fabric mordanted with aluminium potassium sulfate
Colour change	3	4-5

สรุป

จากการศึกษาวิจัย พบว่าการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมธรรมชาติจากแก่นขนุนเพื่อนำไปใช้เป็นผ้าไตรจีวรนั้นควรย้อมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 60 กรัมต่อลิตร โดยใช้วิธีการการย้อมทับ 4 ครั้ง แล้วนำมาจุ่มในสารเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) 5 กรัมต่อลิตร เพื่อเป็นการปรับเฉดสีให้เฉดสีที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับสีต้นแบบมากที่สุดประเมินโดยใช้เกรย์สเกลได้คะแนน 4/5 จากนั้นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความคงทนของสีต่อการซักจึงได้ชุบอะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟต ($AlK(SO_4)_2$) เป็นสารมอร์แดนท์เพื่อช่วยในกระบวนการย้อมผ้าด้วยสีย้อมธรรมชาติจากแก่นขนุน

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขนิษฐา วัชราภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและการดำเนินการศึกษาวิจัยจนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

พันธศิริ มูลศรี. 2547. ผลของเกลือและสารช่วยย้อมบางชนิดต่อการดูดซับสีสกัดจากแก่นไม้ขนุนโดยเส้นด้ายฝ้าย. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ภัทรานิฎชรณ์ พิมพ์ประพร. 2558. การศึกษาอิทธิพลของสารช่วยติดสีต่อเฉดสีของสีย้อมธรรมชาติสกัดจากใบหมี่บนเส้นใยไหมย้อมด้วยกระบวนการย้อมแบบดูดซึม. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

มูลนิธิสืบนาคะเสถียร. 2562. วัสดุธรรมชาติที่ให้สีต่างๆ. https://bit.ly/2MOgf5u/, 22 พฤศจิกายน 2562.

ศรันยา เกษมบุญญากร. 2551. สารช่วยติดสีย้อม. http://www.pirun.ku.ac.th/~agrsyp/?page_id=86, 22 พฤศจิกายน 2562.

สัตตบุษย์ ผ้าไตร. 2555. ที่มาของการตัดเย็บจีวร. http://www.phatri.com/, 22 พฤศจิกายน 2562.

สุภาพ รู้การ. 2554. การย้อมไหมด้วยใบกล้วย. วิทยานิพนธ์ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

หทัยรัตน์ กองศิริเรือง. 2546. การสกัดสีย้อมจากดอกคำฝอยและแก่นขนุนสำหรับย้อมผ้าฝ้าย. ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

PubChem. 2014. Morin. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Morin/, 22 November 2562.

Production of ethanol, bio-electricity and hydrogen gas in yeast fuel cell

Apichetch Kumnubpha, Chaiwat Bandaiphet*
Department of Biotechnology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.
*Corresponding author. E-mail address: Bandaiphet_C@silpakorn.edu

Abstract

Microbial Fuel Cells (MFCs) technology is an excellent alternative for production of bio-electricity and hydrogen gas directly. In this work, Saccharomyces yeast was anaerobic cultured in anodic chamber of MFC and the effect of sugar concentrations (140-220 g/L) in medium on production of ethanol, electricity and hydrogen gas was studied. Maximum ethanol yield was 42.8 g/L from fermentation at 220 g/L sucrose concentration for 120 h. During alcohol fermentation, yeast also emitted the electrons that moved from anode to cathode electrodes of MFC, and generated the maximum current density about 0.187 A/m^2 at 220 g/L sucrose concentration. To produce the hydrogen gas, MFC was operated without oxygen supply in cathode and the current from direct current generator was pass up the outer circuit of MFC system (called, Microbial Electrolysis Cell, MEC). The supply of currents (0.2–2.0 volts) to outer circuit had an impact on the hydrogen gas production. Hydrogen gas bubbles rose out (3.71 mL/L/h) in MEC with current supply at 1.0V, after 120 h fermentation at 220 g/L sucrose. MFC and MEC technology were considered to help alleviate the energy crisis with having the potential to produce the renewable and sustainable fuel and energy, in addition to producing basic bio-products.

Keywords: Bioelectricity, Ethanol fermentation, Hydrogen, Microbial fuel cells, Yeast

Introduction

Microbial Fuel Cells (MFCs) are the devices that have the property of converting the energy stored in the chemical compounds into electrical energy by catalyst. (Logan et al., 2006). During degradation the organic matter by oxidation at anode, electrons and protons are generated, electrons will flow towards cathode through the external circuit, while proton will migrate through the membrane to generate electricity, shown in Equations 1–3 (Pant et al., 2009).

Anodic reaction: $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$ (1)

Cathode reaction: $6O_2 + 24H^+ + 24e^- \rightarrow 12\ H_2O$ (2)

Total reaction: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 24H^+ + 24e^-$ (3)

MFC power is fundamentally produced by the microbial metabolic activity, more efficient depend on utilize organic components and many factors such as substrate concentration, types and operating condition similar to operation in bioreactors (Pant et al., 2009).

Alcohol fermentation is successful by yeast under anaerobic conditions that can convert sugar molecule by metabolic pathway and give many electrons (Kiran et al. 2000). Carbon source in organic substrates can directly convert to the chemical energy into electricity processes, especially the glucose hydrolysis that give the electron easily. Permana et al. (2015) reported about the alcohol fermentation by *S. cerevisiae* in 2% glucose medium in MFC generated 4.5×10^{-5} A of current (0.689 V), 2.12×10-3 W/m^{2}of power density, 96.3%of glucose consumption and 0.74% (v/v) of bioethanol.

Bio-hydrogen gas is a clean and environmentally friendly natural gas that can be produced by converting biodegradable organic matter during anaerobic reaction, normally found simultaneously in biogases production by bacteria and gas separation process is quite difficult. To produce the hydrogen gas directly, Microbial Electrolysis Cell (MEC) was developed from MFC without oxygen supply in cathode. The Equations 4–7 was used to explain the hydrogen production in MEC (Kumar et al., 2017).

Bio-fermentation: $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + 2CO_2 + 2C_2H_4O_2$ (acetic acid) (4)

MEC process:

Anode: $C_2H_4O_2 + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 8H^+ + 8e^-$ $E_{anode} = -0.279$ V vs. SHE (5)

Cathode: $8H^+ + 8\ e^- \rightarrow 4H_2$ $E_{cathode} = -0.414$ V vs. SHE (6)

Hydrogen production: $E_{PS} = E_{cathode} - E_{anode} = 0.140$ V vs SHE (7)

When E is electrode potential at standard condition (volt), SHE is standard hydrogen electrode (half-cell potential of hydrogen electrode) and E_{PS} is standard potential of fuel cell measured by potentiostat (volt). Unfortunately, these phenomena of reduction of H^+ to molecular H_2 gas in cathode is non-spontaneous reaction since thermo-dynamically not favored due to the positive Gibbs free-energy. For hydrogen production in MEC, by theoretical consideration, E_{PS} should be more than 0.2 – 0.25 V due to losses. Therefore, an external voltage must be supplied practically at least 0.2 – 0.25 V for make hydrogen gas bubbles rise out (Kumar et al., 2017).

This work aims to produce the electricity and hydrogen gas directly during alcohol fermentation by Saccharomyces yeast in designed bench MFC and MEC. Various sucrose concentrations in medium were investigated. This will be useful and feasibility for clean fuels and energy production directly.

Materials and Methods

Yeast and medium preparation

Saccharomyces cerevisiae CBT6015, isolated from wine sample that was produced and storage in our laboratory, was fermented in medium consisted of 140-220 g/L sucrose, 1.0 g/L $(NH_4)_2PO_4$, 1.0 g/L KH_2PO_4 and 5.0 g/L, $MgSO_4$, 1.0 g/l $NH_4)_2PO_4$, pH 5.0. Ethanol production was operated in anode chamber of MFC under anaerobic condition. (modified from Rahimnejad et al. 2012).

MFC configuration

Fig.1 showed two-chamber MFC and MEC made from acrylic plate (thickness 0.3 cm), constructed as cubic boxes (1.0 L) as anode and cathode chamber with an adjacent wall and Nafion® proton exchange membrane. There were holes for medium feeding and sample collection on anode, for CO_2 release on cathode. Copper anode and stainless steel cathode electrodes (5 cm × 5 cm) was used in this MFC by connecting together with conducting copper wire loaded epoxy and the welding point coated and seals with silicone to reduce the corrosion and water protection.

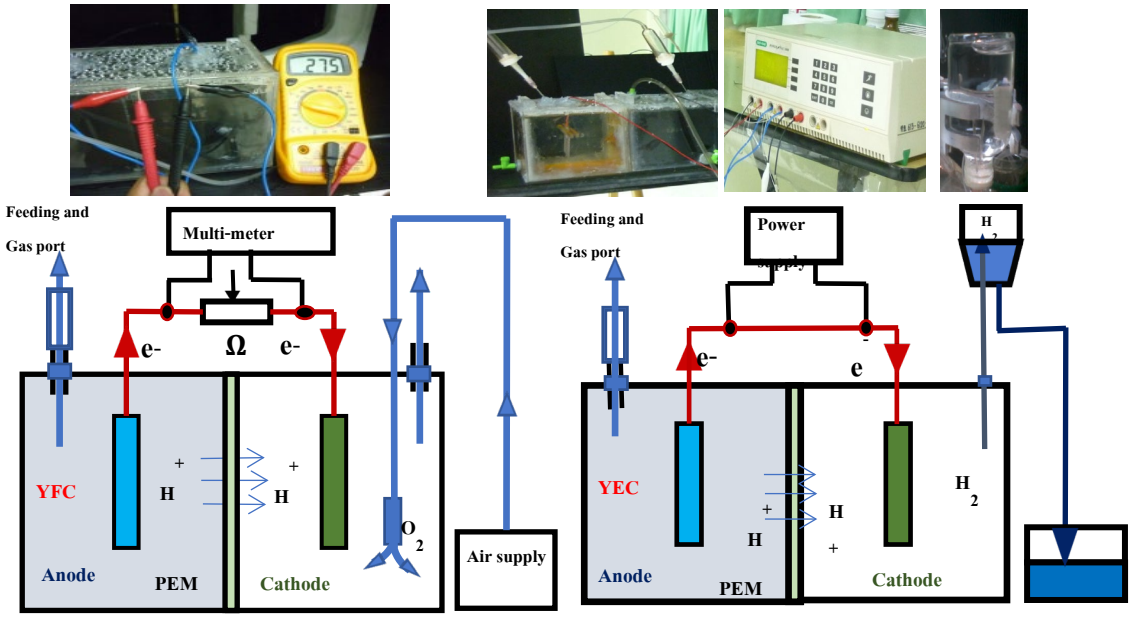


Fig. 1 Two-chamber Yeast Fuel Cell (left) and Yeast Electrolysis Cell (right).

Operation and experiments

Anode chamber was added with medium and yeast, sealed for anaerobic condition, while cathode chamber was filled up with water and oxygen supply from air pump. Alcohol fermentation was carried out by varying of sucrose concentrations (140–220 g/L). Samples

were collected approximately 5.0 mL and then sterilized fresh medium was filled up to maintain the working volume. For hydrogen production in MEC, cathode water was replaced with the potassium meta-bisulfide solution (250 ppm) to eliminate the dissolve oxygen. Power was supplied into outer circuit in a range of 0 – 3 V without oxygen supply in cathode, hydrogen gas was storage in bottle by water replacing technique. (Kumar et al., 2017).

Determination, analysis and calculation

Residual sugar was determined as total reducing sugar basis by L-Cysteine sulphuric acid assay for hexose sugar (glucose) and Phenol-boric acid-sulphuric acid assay for ketose sugar (fructose) (Chaplin and Kennedy, 1994). For ethanol analysis, the sample was filtrated through the filter paper and nylon syringe filter (0.22 µm), and 20 µL of sample was injected into HPLC (Hi-Pled H column, Agilent Technologies, using a RI detector), the mobile phase was water (0.5 mL/min, 60^{O}C). Hydrogen was analyzed by GC (Model SRI 8619C, SRI Instruments, Scientific Repair Inc., USA) equipped with Thermal Conductivity Detector (TCD). Electrical parameters (dielectric difference or open circuit voltage, (V, mV) and current output (I, mA) were monitored with multi-meter (Model WENS500, Wens Co. Ltd., South Korea) at 50 Ω within 10 seconds since the values changed quickly. Current density, C_d (mA/m^2) was calculated from $C_d = I/A$; when A was the surface area of anodic electrode (0.005 m^2). Power density, P_d (mW/m^2) was calculated from IV /A; when A was anode electrode surface area (0.025 m^2).

Results and Discussion

Ethanol production in anode of MFC:

The effect of sucrose concentrations on ethanol production in anode reactor in MFC was studied and the result was shown in Fig.2.

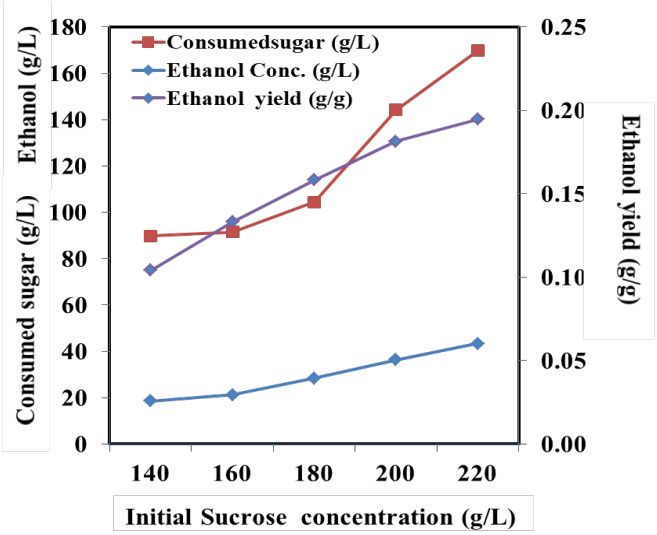


Fig. 2 Ethanol fermentation of *S. cerevisiae* in sucrose medium for 120 hr. in MFC (1 L).

Theoretically, sucrose was hydrolyzed to reducing sugars for ethanol production based on a theoretical yield of 0.53 g ethanol/g sugars as shown in Equation 8;

$$C_{12}H_{22}O_{11}(s) + H_2O\ (l) \rightarrow 4C_2H_6O\ (l) + 4CO_2\ (g) \quad (8)$$

In this work, the ethanol yield increased when the sucrose content increased, maximum yield was 42.8 g/L (0.196 g/g) at 220 g/L initial sucrose concentration. Thus, the practical yield in this work was lower than theoretical yield as the same of other works such as Saccharomyces (SV1-SV4) gave ethanol yield 23–58 g/L from 150 g/L glucose fermentation (Kiran et al., 2000)., and Saccharomyces yeast (F111) yielded 77 g/L ethanol from (15% w/v) sugar cane juice. (Mukhtaret al., 2010).

Electricity generation in MFC

Fig. 3 showed the ethanol fermentation at 220 g/L sucrose for 200 h, the ethanol yield slightly decreased and the current output increased. In initial phase of fermentation, sugar used for yeast growth and current increased without disruption of the glycolysis and TCA cycle, current was generated increasingly. In metabolic phase, sugar was transformed to the ethanol by working only glycolysis pathway, current output increased and decreased sharply after 96th h due to substrate deficiency. At the end of fermentation, the ethanol concentration was produced at 42 g/L while still having electricity was generated to an approximately value at 100 mA/m^2. Maximum power density was 233.47 mW/ m^2, and the resistance of this MFC was 0.007 m Ω (R = W/ I^2).

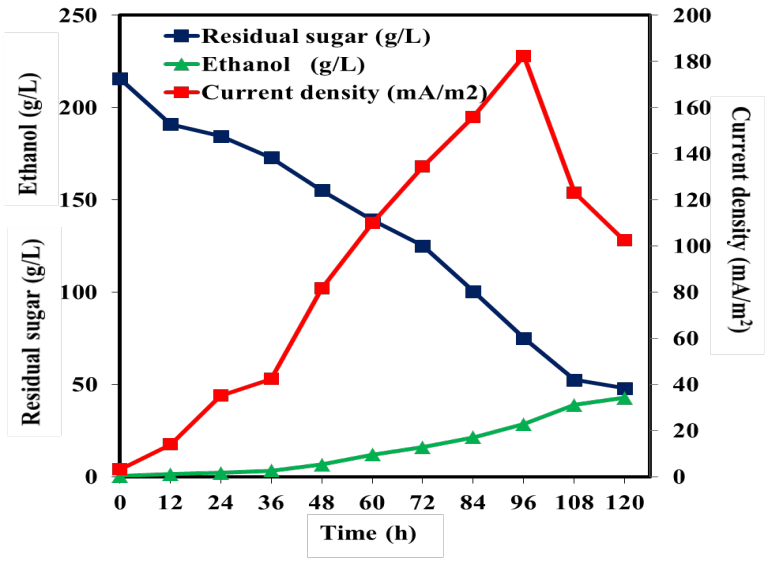


Fig. 3 Production of ethanol and electricity in Yeast Fuel Cell (1L) at 220 g/L sucrose.

Table 1 showed the substrate influence on electricity productivity, the maximum power yield (C_d = 182.4 mA/m^2) was found at the highest initial sucrose concentration (220 g/L). Table 2 was comparison the various power densities from fermentation of *S. cerevisae* found in other type of MFCs, the electric productivities were very different.

Hydrogen production in MEC

The higher hydrogen gas rose up when the current was passed to the external circuit, maximum hydrogen productivity (4.63 mL/L/h) was found at 2.0 V of power supply.

Table 1 Electricity generation during alcohol fermentation in (1L) MFC by *S. Cerevisiae*

Initial sucrose conc. (g/L)	Consumed sugar (g/L)	Voltage (mV)	Max. current output (mA)	Max. current density (mA/m^2)	Power (mW)	Power density (mW/m^2)	Power density (mW/h)
140	89.8	0.68	0.136	54.4	0.092	36.99	0.31
160	91.5	0.88	0.176	70.4	0.155	61.95	0.52
180	104.5	1.02	0.270	107.2	0.270	109.34	0.91
200	144.2	1.18	0.320	126.4	0.370	149.15	1.24
220	169.8	1.28	0.456	182.4	0.584	233.47	1.95

Table 2 Comparison of the electricity generation of *S. cerevisiae* in MFC

Anode	Cathode	Substrate	MFC type and anodic mediator	MPD ($mW \cdot m^{-2}$)	References
Carbon paper/ AuNPs	Carbon paper, $K_3Fe(CN)_6A$	Acetate Wastewater (COD 1,000 $mg \cdot L^{-1}$)	Double chamber H-type 250 mL, No mediator	363	Alatrakchi et al. (2014)
Carbon paper/ AuNPs	Carbon paper/Pt, open air	Glucose 20 $mg \cdot mL^{-1}$	Cubic single chamber 70 mL, No mediator	2	Kasem et al. (2013)
CF-PEI/ Tryptophol	CF, open air	Glucose 13-18 $mg \cdot mL^{-1}$	Cubic single chamber 28 mL, No mediator	286	Christwardana et al. (2019)
Graphite plate/ Thionine	Graphite plate, Aerated PBS	Glucose 20 mM	Double chamber H-type 760 mL, with mediator	60	Rahimnejad (2012)
Carbon felt/ HNO_3	Carbon paper, $K_3Fe(CN)_6$	Glucose 60 $mg \cdot mL^{-1}$	Double chamber flat type 128 cm^3, with mediator	450	Hidalgo et al. (2016)
Stainless steel	Copper plate	Sucrose 220 $mg \cdot mL^{-1}$	Double chamber 1,000 mL, No mediator	182.4	This work

However, the heat was built in system during operation when high intensity of current was supplied (45°C at 3.0V), that caused the high temperature of MEC, ethanol yield and hydrogen gas decreased. The increasing of heat affected on system operation, yeast growth and metabolism, thus, the ethanol yield decreased dramatically at high current supply, while hydrogen productivity reduced at > 2.0 V.

Therefore, we found the heat that might cause of failure of yeast growth and ethanol production at high intensity of current supply (Fig.4). To avoid the heat effect, the current supply at 1.0 volt was chosen since this gave the modest gas and ethanol productivity in this MEC (giving the 3.71 mL/L/h of hydrogen and 25.24 g/L ethanol). In this work, the hydrogen productivity was calculated as average values from accumulated hydrogen value. Sugnaux et al. (2016) reported the hydrogen yield in dual chambered MEC with a single cathode (platinum

sputtered carbon felt electrodes) and 10 anodes for *in-situ* hydrogen evolution. After two days 45 ml of hydrogen was present in the headspace of the reactor, a day later the quantity declined to 34.5 ml, at day four no hydrogen was detectable, hydrogen productivity approximately 2.6 mL/ D.

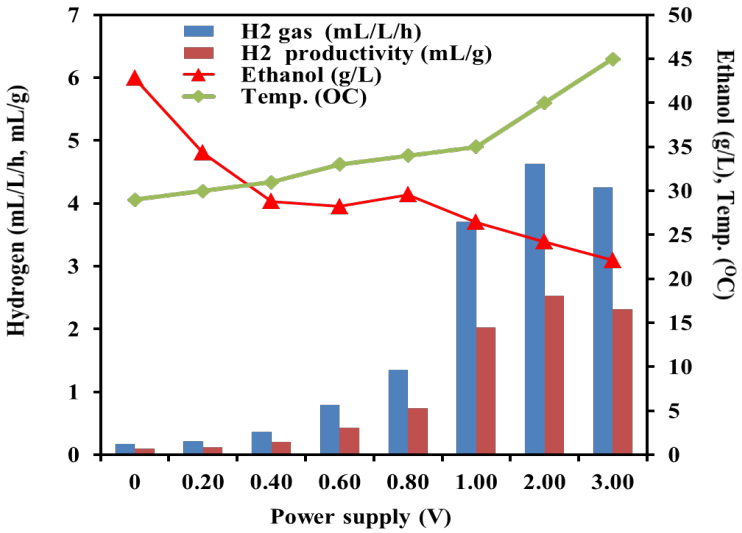


Fig. 4 Effect of current supply to MEC for hydrogen production in during fermentation of *S. cerevisiae* from 220 g/L sucrose for 120 h.

Conclusions

The simultaneous ethanol production and bioelectricity generation in this MFC are possible. When no MFC operation, the maximum ethanol yield of ethanol from Saccharomyces yeast fermentation was 42.8 g/L (0.197 g/g) at 220 g/L initial sucrose concentration. While MFC launch, the current density (0.187 A/m^2) was generated during ethanol fermentation with ethanol yields slightly decreased (38 g/L). In the meantime, the hydrogen gas (3.71 mL/L/h) was produced in yeast-based electrolysis cell with power supply at 1.0 V and also gave the ethanol yield of 25.24 g/L (0.11 g/g). Thus, this MEC can produce the hydrogen gas and ethanol simultaneously. MFC and MEC must have still worked separately. However, they can be developed to raise the yields of hydrogen fuel and electricity energy. Therefore, MFC and MEC can be adapted to ethanol reactor for fuel and energy production as value added by-products as well. To obtain as high process efficiencies, they should be developed further in many factors such as cell design, substrate and medium variety, culture condition variable, electrode materials and surface area, mediator, etc.

Acknowledgements

We would like to thank Department of Biotechnology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom Province, Thailand, for presentation supporting.

References

Alatraktchi, F.A., Zhang, Y., Angelidaki, I. 2014. Nanomodification of the electrodes in microbial fuel cell: Impact of nanoparticle density on electricity production and microbial community. Apply Energy. 116: 216–222.

Chaplin, M.F., Kennedy, J.F. 1994. Carbohydrate and Sugar Analysis: A Practical Approach. IRL Press. Oxford. 288 p.

Charoensopharat, K., Wechgama, K. 2019. Effect of initial cell, yeast extract and sugar concentrations on ethanol production from molasses by thermotolerant yeast *Saccharomyces cerevisiae* RMU Y-10. Asia-Pacific Journal of Science and Technology. 24 (2): APR–JUN.

Christwardana, M., Frattini, D., Duarte, K.D.Z., Accardo, G., Kwon, Y. 2019. Carbon felt molecular modification and biofilm augmentation via quorum sensing approach in yeast-based microbial fuel cells. Apply Energy. 238: 239–248.

Hidalgo, D., Tommasi, T., Bocchini, S., Chiodoni, A., Mazzarino, I. 2016. Surface modification of commercial carbon felt used as anode for microbial fuel cells. Energy. 99: 193–201.

Kasem, E.T., Tsujiguchi, T., Nakagawa, N. 2013. Effect of metal modification to carbon paperanodes on the performance of yeast-based microbial fuel cells parts: In the case without exogenous mediator. Key Engineering Material. 534: 76–81.

Kiran, S.N., Sridhar, M., Suresh, K., Banat, I.M., Venkateswar, L.R. 2000. High alcohol production by repeated batch fermentation using an immobilized osmotolerant *Saccharomyces cerevisiae*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 24: 222–226.

Kumar, G., Bakonyi, P., Zhen, G., Sivagurunathan, P., Koók, L.Kime, S.-H., Tóth, G., Nemestóthy, N., Bélafi-Bakó, K. 2017. Microbial electrochemical systems for sustainable Biohydrogen production: Surveying the experiences from a start-up viewpoint. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 70: 589–597.

Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Versraete, W., Rabaey K. 2006. Microbial fuel cells: methodology and technology. Environment Science Technology. 40: 5181–5192.

Mukhtar, K., Asgher, M., Afghan, S., Hussain, K., Hussain, S.Z.U. 2010. Comparative study on two commercial strains of *Saccharomyces cerevisiae* for optimum ethanol production on industrial scale. Journal of Biomedicine and Biotechnology. 8: 419–586.

Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., Vanbroekhoven, K. 2009. The substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. Bioresource Technology. 101: 1533–1543.

Permana, D., Rosdianti, D., Ishmayana, S., Rachman, S.D., Putra, E.H., Rahayuningwulan, D., Hariyadi, H.R. 2015. Preliminary investigation of electricity production using dual chamber Microbial Fuel Cell (DCMFC) with *Saccharomyces cerevisiae* as biocatalyst and methylene blue as an electron mediator. Procedia Chemistry. 17: 36–43.

Rahimnejad, M., Najafpour, G.D., Ghoreyshi, A.A., Talebnia, F., Premier, G.C., Bakeri, G. 2012. Thionine increases electricity generation from microbial fuel cell using *Saccharomyces cerevisiae* and exoelectrogenic mixed culture. Journal of Microbiology. 50: 575–580.

Sugnaux, M., Happe, M, Cachelin, C.P., Gloriod, O., Huguenin, G., Blatter, M., Fischer, F. 2016. Two stage bioethanol refining with multilitre stacked microbial fuel cell and microbial electrolysis cell. Bioresource Technology. 221: 61–69.

การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมโดยใช้แผนการทดลองแบบผสมในผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกเสริมใยอาหาร

Optimization of Formulation using Mixture Design in Pearl with Fiber Addition

ปฐมาภรณ์ เกตุเพชร, สุธีรา วัฒนกุล*

Pathamaphon Ketphet, Suteera Vatthanakul*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120, Thailand.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกจากแป้งมันสำปะหลังเสริมใยอาหารที่เหมาะสม โดยวางแผนการทดลองแบบผสมแบบกำหนดช่วง (constrained simplex lattice mixture design) ศึกษาผลของ 3 ปัจจัย ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (60–80%) ส่วนผสมระหว่างผงเห็ดนางฟ้าและเมือกกระเจี๊ยบเขียวในอัตราส่วน 50:50 (20–40%) และอินูลิน (0–20%) พบว่า การเติมอินูลินส่งผลให้ค่า peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าความแข็ง (hardness) ของเม็ดไข่มุกมีค่าเพิ่มมากขึ้น และสูตรที่มีการเติมผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบเขียวปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการเกาะรวมตัว (cohesiveness) ลดลง และเมื่อพิจารณาจากคะแนนการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสพบว่า เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สูตรเม็ดไข่มุกที่เหมาะสมประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง 70% ส่วนผสมของผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบเขียว 10% และอินูลิน 10% มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดเท่ากับ 6.82 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง)

คำสำคัญ: การทดลองแบบผสม, ผงเห็ด, เม็ดไข่มุก, เมือกกระเจี๊ยบเขียว, อินูลิน

Abstract

This research aimed to develop the optimal formulation of tapioca pearl with fiber addition using constrained simplex lattice mixture design. The effects of 3 factors: tapioca starch (60–80%), ratio of mushroom powder and okra mucilage 50:50 (20–40%) and Inulin (0–20%) on physical and sensory properties of tapioca pearl were investigated. The addition of inulin significantly ($p \leq 0.05$) decrease peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity and setback viscosity, while it increased the hardness of tapioca pearl. The formula with higher additions of ratio of mushroom powder to okra mucilage resulted in decreased of cohesiveness value. From sensory evaluation, increasing tapioca starch increased texture liking and overall liking scores of tapioca pearl. The optimal formula of tapioca pearl consisted of 70% tapioca starch, 10% ratio of mushroom powder and okra mucilage and 10% inulin and received the highest liking score of 6.82 (like slightly to moderately).

Keywords: Inulin, mixture design, mushroom powder, okra mucilage, tapioca pearl

คำนำ

เม็ดไข่มุกเป็นท็อปปิ้งที่นิยมทานคู่กับเครื่องดื่มประเภทชานม มีองค์ประกอบหลักคือแป้งมันสำปะหลัง นำมาปั้นเป็นเม็ดกลม เส้นรอบวงประมาณ 5–10 มิลลิเมตร เวลารับประทานนำเม็ดไข่มุกมาต้มในน้ำเดือด เมื่อเม็ดไข่มุกต้มสุกแล้วจะใส่ลงไปประมาณ 1 ใน 4 ส่วนของเครื่องดื่ม หรือประมาณ 33 กรัม ซึ่งให้พลังงานโดยประมาณเท่ากับ 136 แคลอรี่ (Kreenp, 2017) เนื่องจากเม็ดไข่มุกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากแป้งมันสำปะหลัง และบางครั้งก็มีการเติมน้ำตาลลงไปด้วย จึงเป็นอาหารที่ให้แคลอรี่ แต่จะให้มากน้อยแตกต่างกันไปในแต่ละสูตร ซึ่งมีตั้งแต่ 2–4 กิโลแคลอรี่ต่อเม็ดไข่มุกหนึ่งเม็ด อีกทั้งเม็ดไข่มุกยังมีคุณค่าทางสารอาหารเช่น วิตามิน แร่ธาตุ หรือสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณที่ต่ำอีกด้วย (Wangein, 2018)

เห็ดนางฟ้า (*Pleurotus sajor-caju*) เป็นพืชที่ให้คุณค่าทางโภชนาการที่ดี ประกอบไปด้วยโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย รวมทั้งแร่ธาตุต่างๆ (USDA, 2019) นอกจากนั้นการทำเห็ดนางฟ้าให้เป็นผงแห้งมาใส่ในอาหารเพื่อทดแทนปริมาณแป้ง ยังเป็นการทำให้อาหารนั้นมีคุณค่าทางสารอาหารที่มากขึ้น เช่น มีปริมาณโปรตีนและเส้นใยที่เพิ่มสูงขึ้นและมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ลดลง (Prodhan et al., 2015) สำหรับกระเจี๊ยบเขียว (*Abelmoschus esculentus* (L.) *Moench*) มีงานวิจัยมากมายที่นำกระเจี๊ยบเขียวมาใช้ในงานวิจัยทั้งการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเมือกกระเจี๊ยบเขียวเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ เช่น ช่วยเคลือบแผลในกระเพาะอาหาร (ญาธิปกร และคณะ, 2557) การใช้ผงเมือกจากกระเจี๊ยบเขียว เป็นสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหารแทนสารให้ความคงตัวชนิดอื่น ถือได้ว่าเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่า และเพิ่มรูปแบบการนำกระเจี๊ยบเขียวไปใช้มากขึ้น (ปิยนุสร์ และพัชรี, 2554) ส่วนอินูลิน (Inulin) จัดเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่สามารถละลายน้ำได้และมีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง ดังงานวิจัยของนันทรัตน์ (2560) ที่ศึกษาการใช้อินูลินและโยเกิร์ตในผลิตภัณฑ์น้ำสลัดสูตรถั่วเหลือง พบว่าการใช้อินูลินส่งผลให้น้ำสลัดสูตรถั่วเหลืองมีความเรียบเนียนและเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่เกิดการแยกชั้นของน้ำกับไขมัน นอกจากนั้นอินูลินยังจัดเป็นพรีไบโอติกที่พบได้ในธรรมชาติและสามารถนำมาประยุกต์ใช้และเสริมในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เป็นอาหารเพื่อสุขภาพสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการมีสุขภาพที่ดีอีกด้วย (ดวงใจ, 2558)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกที่เหมาะสมโดยมีการนำผงเห็ด เมือกกระเจี๊ยบและอินูลินเป็นส่วนผสมของเม็ดไข่มุกเพื่อทดแทนในส่วนของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกทางเลือกใหม่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการและมีเนื้อสัมผัสตรงตามความต้องการของผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

ผงเห็ดนางฟ้า นำเห็ดนางฟ้า (*Pleurotus sajor-caju*) ล้างน้ำให้สะอาดแล้วหั่นเป็นชิ้นขนาด 3x4 เซนติเมตร ลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาที ทำให้เย็นในทันทีแล้วให้ปั่นละเอียด จากนั้นเกลี่ยลงบนถาดให้มีความหนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบลมร้อนแบบถาด (Tray drier) จากนั้นนำมาปั่นให้ละเอียดจนเป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh บรรจุใส่ถุงสุญญากาศเพื่อรอนำไปใช้

เมือกกระเจี๊ยบ นำกระเจี๊ยบเขียว (*Abelmochus esculentus* L. *Moench*) ล้างน้ำให้สะอาด ตัดส่วนหัวกับส่วนท้ายออก หั่นตามแนวขวางขนาดความยาว 1 เซนติเมตร ต้มกับน้ำ (อัตราส่วนกระเจี๊ยบเขียวต่อน้ำคือ 1:1) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที บีบเมือกโดยใช้ผ้าขาวบาง จากนั้นนำมาฆ่าเชื้อด้วยวิธีการพาสเจอไรซ์เซชัน โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทำให้เมือกกระเจี๊ยบเย็นในทันที แล้วจึงบรรจุใส่ถุงสุญญากาศไว้ เก็บไว้ในตู้แช่แข็งรอการนำไปใช้ (ดัดแปลงวิธีจาก ญาธิปกร และคณะ, 2557)

กรรมวิธีการผลิตเม็ดไข่มุก

การขึ้นรูป (ปั้น) เม็ดไข่มุก (จากสูตรพื้นฐาน แป้งมันสำปะหลัง 150 กรัม น้ำ 100 กรัม และน้ำตาลทราย 30 กรัม) นำส่วนผสมแห้ง (แป้งมันสำปะหลังและผงเห็ด) ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเทสารละลาย (น้ำตาลและอินูลิน) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 90±2 องศาเซลเซียส แล้วกวนผสมให้เข้ากัน จึงใส่เมือกกระเจี๊ยบลงไปแล้วกวนผสมต่อนวดโดให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นกดแป้งด้วยที่กดเม็ดไข่มุก (น้ำหนักประมาณ 0.5 กรัม) ปั้นให้เป็นก้อนกลม ได้เม็ดไข่มุกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.9±0.1 เซนติเมตร

การต้มเม็ดไข่มุก นำเม็ดไข่มุกที่ปั้นไว้ ใส่ในน้ำเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 95±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาหยุดให้ความร้อนและปิดฝาทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นล้างเม็ดไข่มุกหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยน้ำสะอาด แล้วนำไปแช่ในน้ำเชื่อม (52.83 ºBrix) เพื่อป้องกันเม็ดไข่มุกเกาะตัวกัน ก่อนนำไปตรวจวิเคราะห์และประเมินคุณภาพทางด้านต่างๆ

การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมโดยใช้แผนการทดลองแบบผสม

วางแผนการทดลองแบบผสมแบบกำหนดช่วง (constrained simplex lattice mixture design) ร่วมกับการสร้างพื้นที่การตอบสนองที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Statistica version free download ศึกษาผลของ 3 ปัจจัย ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (60-80%) ส่วนผสมระหว่างผงเห็ดนางฟ้าและเมือกกระเจี๊ยบเขียวในอัตราส่วน 50:50 (20–40%) และอินูลิน (0–20%) ได้สิ่งทดลองทั้งหมด 7 สูตรการทดลอง ดัง Table 1

Table 1 Ratio of tapioca starch, mushroom powder and okra mucilage and Inulin from mixture design

Formula	Tapioca Starch	Ratio of mushroom powder and okra mucilage 50:50	Inulin
1	80	20	0
2	60	40	0
3	60	20	20
4	70	20	10
5	70	30	0
6	60	30	10
7	66.67	26.67	6.67

การวิเคราะห์พฤติกรรมด้านความหนืด

ศึกษาพฤติกรรมด้านความหนืดของแป้งด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความหนืดอย่างรวดเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA) ตามวิธีการของ Newport Scientific Pty, Ltd.(1995) โดยใช้ตัวอย่างแป้ง 3 กรัม (ความชื้น 14%) บันทึกค่าต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาติไนซ์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด (breakdown viscosity) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from hold)

การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่อง Texture Analyzer และใช้หัววัดแบบ Cylindrical probe (P/50) ตั้งค่าดังนี้ ค่า Pre-test speed 1 mm/sec ค่า Test Speed 5 mm/sec ค่า Post-test speed 5 mm/sec ค่า Strain 50% ค่า Time 5 sec และค่า Trigger Force 5 g วัดค่า hardness, springiness, cohesiveness, gumminess และ chewiness

การประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสโดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คนที่มีความถี่ในการบริโภคเครื่องดื่มชาไข่มุกอย่างน้อย 1 ครั้งต่อสัปดาห์ ประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9-point hedonic scale (1 = ไม่ชอบมากที่สุด, 2 = ไม่ชอบมาก, 3 = ไม่ชอบปานกลาง, 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย, 5 = บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ, 6 = ชอบเล็กน้อย, 7 = ชอบปานกลาง, 8 = ชอบมาก, 9 = ชอบมากที่สุด) เสิร์ฟตัวอย่างเม็ดไข่มุกควบคู่กับเครื่องดื่มชาไทยแบบเย็น เม็ดไข่มุก 5 เม็ดในเครื่องดื่ม 15 มิลลิลิตร และเสิร์ฟน้ำดื่มเพื่อล้างปากระหว่างตัวอย่างทดสอบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์พฤติกรรมด้านความหนืด

จากการศึกษาพฤติกรรมด้านความหนืดของส่วนผสมหลัก ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง ส่วนผสมผงเห็ดนางฟ้าและเมือกกระเจี๊ยบเขียวในอัตราส่วน 50:50 และอินูลิน แสดงดัง Table 2 พบว่าสูตรที่มีการเติมอินูลินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่มีค่า pasting temperature เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยอินูลินมีสมบัติเป็น hygroscopic ที่มีความสามารถในการดูดความชื้นสูง จึงสามารถจับกับน้ำในระบบได้เป็นอย่างดี ทำให้ปริมาณน้ำในระบบลดน้อยลง จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำในระบบที่จะสามารถจับกับแป้งมันสำปะหลังลดน้อยลง ส่งผลต่อการเกิดเจลและพองตัวของแป้งมันสำปะหลังซึ่งเมื่อแป้งเกิดการเจลาติไนซ์เซชั่นและพองตัวลดลง ทำให้ปริมาณของอะไมโลสที่จะถูกปล่อยออกมาเมื่อเม็ดแป้งแตกตัวมีปริมาณลดลง ซึ่งปริมาณอะไมโลสที่ปล่อยออกมาน้อยลงนี้ ทำให้การเกิด retrogradation น้อยลง ส่งผลต่อค่า setback ที่น้อยลง (Wang, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของดวงใจ (2558) ที่มีการศึกษาพฤติกรรมความหนืดของแป้งข้าวหอมมะลิที่มีการเติมสารพรีไบโอติกลงไป ส่งผลทำให้เม็ดแป้งเกิดการ

พองตัวให้ความหนืด หรือเกิดการเจลาติไนเซชันได้ยากขึ้น ซึ่งจะให้ผลในทิศทางตรงกันข้ามกับสูตรที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่สูงขึ้นซึ่งพบว่าค่า peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่มีค่า pasting temperature ลดลง เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำทำให้มีกำลังการพองตัวสูงสามารถพองตัวได้ดีเมื่อได้รับความร้อน จึงมีค่าความหนืดสูง แต่เมื่อได้รับความร้อนและแรงกลไปเรื่อยๆ ส่งผลให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว (breakdown viscosity) แสดงให้เห็นว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีความคงทนต่ออุณหภูมิและแรงกลได้น้อย และเมื่ออุณหภูมิเย็นลงจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในระหว่างการเย็นตัว ซึ่งสามารถบอกได้ถึงความสามารถในการคืนตัวของเม็ดแป้ง (retrogradation) (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2550)

Table 2 Pasting properties of various formulations of flour from tapioca starch, ratio of mushroom powder and okra mucilage 50:50 and Inulin

Formula	Pasting temperature (ºC)	Peak viscosity (cP)	Breakdown viscosity (cP)	Final viscosity (cP)	Setback from hold (cP)
1	72.08^{d}±0.20	3732.00^{a}±17.78	2011.67^{a}±16.86	2813.00^{a}±36.37	1092.67^{a}±30.55
2	73.00^{ab}±0.13	2688.67^{c}±101.16	1312.33^{c}±67.16	2208.00^{c}±51.03	831.67^{d}±18.50
3	73.23^{a}±0.20	1601.33^{g}±22.23	564.67^{g}±18.77	1713.33^{e}±17.21	676.67^{f}±14.19
4	72.43^{cd}±0.54	2497.33^{e}±28.68	1117.00^{e}±15.72	2254.67^{c}±7.09	877.33^{c}±6.03
5	72.35^{cd}±0.30	3187.00^{b}±64.37	1592.00^{b}±51.86	2537.00^{b}±23.39	942.00^{b}±13.11
6	73.03^{ab}±0.03	2051.67^{f}±23.18	856.33^{f}±22.23	1951.00^{d}±7.00	755.67^{e}±19.01
7	72.68^{bc}±0.14	2589.67^{d}±40.38	1187.00^{d}±17.58	2256.00^{c}±10.58	853.33^{cd}±39.63

$^{a-g}$ Means within the same column with difference letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส

ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเม็ดไข่มุกแสดงดัง Table 3 พบว่าการแปรปริมาณแป้งมันสำปะหลัง อัตราส่วนผสมระหว่างผงเห็ดนางฟ้าและเมือกกระเจี๊ยบเขียว และอินูลินนั้น ส่งผลให้ ค่า cohesiveness และ gumminess มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) พิจารณาค่า gumminess จากแผนภาพ contour plot Fig. 1(A) พบว่าเมื่อมีการเติมอินูลินในปริมาณมากขึ้น ค่า gumminess มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดเจลของอินูลินที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแน่นเนื้อเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อค่าแรงที่วัดได้ ทำให้เม็ดไข่มุกมีค่า gumminess หรือค่าแรงที่ต้องใช้ในการแยกตัวอย่างจนกระทั่งเสียรูป (ธัญญาภรณ์, 2550) มีค่าสูงขึ้น พิจารณาค่า cohesiveness จากแผนภาพ contour plot ใน Fig. 1(B) พบว่าสูตรที่มีการเติมปริมาณส่วนผสมของผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบเขียวปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการเกาะรวมตัว (cohesiveness) ลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะผงเห็ดที่เติมลงไปนั้นเข้าไปขัดขวางการพองตัวของแป้งทำให้แป้งจับตัวกันไม่ดี ดังในงานวิจัยของ Ng et al. (2017) ที่รายงานว่าการเพิ่มระดับของผงเห็ด ที่อุดมด้วยเส้นใย ซึ่งมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง ทำให้

สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งสาลี ส่งผลให้ความสามารถของแป้งในการดูดซับน้ำลดลงและทำให้ pasting viscosity ลดลง รวมทั้งการเกิดเจลาติไนเซชั่นที่ลดลงด้วย

Table 3 Texture properties of tapioca pearl from different ratios of tapioca starch, mushroom powder and okra mucilage and Inulin

Formula	Hardness ^{ns}	Springiness ^{ns}	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness ^{ns}
1	114.49±13.47	1.08±0.12	0.88 ^{a}±0.00	100.60 ^{c}±12.28	109.42±25.36
2	124.24±10.46	1.10±0.01	0.79 ^{d}±0.02	98.68 ^{c}±10.44	109.14±9.81
3	149.38±6.02	1.02±0.04	0.86 ^{ab}±0.00	128.45 ^{ab}±4.84	130.98±0.33
4	124.98±10.57	1.12±0.04	0.87 ^{ab}±0.01	108.16 ^{abc}±10.17	121.45±16.26
5	129.82±6.53	1.01±0.03	0.85 ^{b}±0.01	109.89 ^{bc}±3.75	111.15±6.52
6	127.77±11.22	1.04±0.04	0.82 ^{c}±0.00	104.72 ^{c}±9.31	109.42±13.65
7	136.85±9.39	1.27±0.39	0.85 ^{b}±0.01	130.14 ^{a}±6.30	134.84±1.90

$^{a-d}$ Means within the same column with difference letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} Means within the same column are not significantly different ($p > 0.05$)

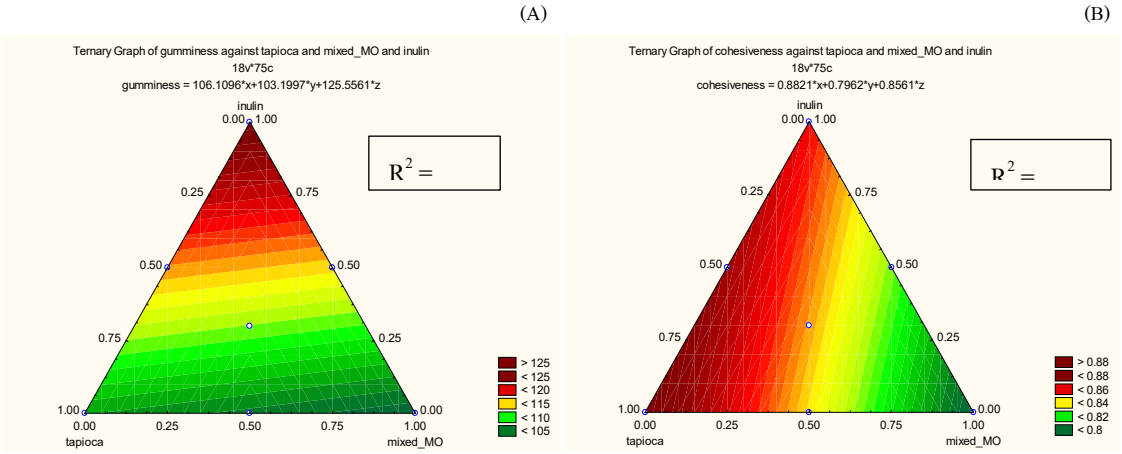


Fig. 1 Contour plots of (A) gumminess, (B) cohesiveness of tapioca pearl from 3 components (X = tapioca starch, Y = ratio of mushroom powder and okra mucilage and Z = Inulin)

การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

ผลการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสเม็ดไข่มุกจาก Table 4 พบว่าสูตรที่เติมส่วนผสมผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบปริมาณมากที่สุด (40%) มีคะแนนความชอบน้อยที่สุดในทุกคุณลักษณะ อาจเป็นเพราะสีและกลิ่นรสที่เฉพาะของผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบเขียว อีกทั้งส่งผลทำให้ค่า cohesiveness ลดลง จึงส่งผลต่อคะแนนความชอบด้วย สอดคล้องดังแผนภาพ contour plot Fig. 2 ที่ว่าเมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมอินูลินไม่ส่งผลต่อความชอบทางด้านเนื้อ

สัมผัสและความชอบโดยรวม โดยจากคะแนนความชอบโดยรวมพบว่าสูตรเม็ดไข่มุกที่เหมาะสมในการพัฒนาประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง 70% ส่วนผสมของผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบเขียว 10% และ อินูลิน 10% เป็นสูตรมีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดเท่ากับ 6.82 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง)

Table 4 Sensory evaluation scores of tapioca pearl from different ratios of tapioca starch, mushroom powder and okra mucilage and Inulin

Formular	Appearance	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall liking
1	7.36^{a}±0.90	7.12^{a}±0.92	6.72^{ab}±1.05	6.4^{a}±1.07	6.92^{a}±1.18	6.8^{a}±1.11
2	6.92^{b}±1.34	6.76^{bc}±1.38	5.96^{d}±1.41	5.44^{b}±1.59	4.84^{d}±1.50	5.04^{c}±1.38
3	7.55^{a}±0.81	6.99^{abc}±0.92	6.32^{c}±0.82	6.23^{a}±1.06	6.03^{c}±1.29	6.31^{b}±0.95
4	7.32^{a}±0.75	6.96^{ab}±0.90	6.88^{a}±0.80	6.60^{a}±0.94	6.86^{a}±1.09	6.82^{a}±0.75
5	7.30^{a}±0.63	6.74^{b}±1.11	6.36^{c}±1.03	6.36^{a}±0.90	6.38^{bc}±1.10	6.24^{b}±0.93
6	7.16^{a}±0.68	6.69^{bc}±1.10	6.21^{cd}±1.21	6.41^{a}±1.14	6.51^{ab}±0.99	6.36^{b}±1.13
7	7.24^{a}±0.82	6.84^{bc}±1.06	6.48^{bc}±0.99	6.44^{a}±0.99	6.64^{ab}±0.85	6.32^{b}±0.94

$^{a-d}$ Means within the same column with difference letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

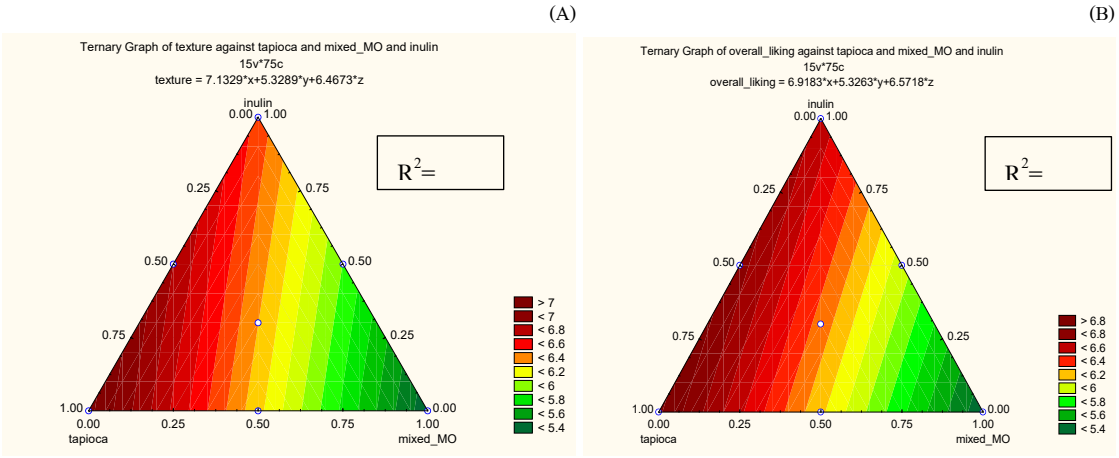


Fig. 2 Contour plots of (A) texture, (B) overall liking of tapioca pearl from 3 components (X = tapioca starch, Y = mushroom powder and okra mucilage and Z = Inulin)

สรุป

จากการศึกษาหาสูตรในการพัฒนาเม็ดไข่มุกที่เหมาะสมด้วยแผนการทดลองแบบผสมแบบกำหนดช่วง (constrained simplex lattice mixture design) ศึกษาผลของ 3 ปัจจัย ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง ส่วนผสมระหว่างผงเห็ดนางฟ้าและเมือกกระเจี๊ยบเขียว และอินูลิน จะเห็นว่าการเติมอินูลินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ส่งผลให้มีค่า gumminess เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การเติมผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบเขียวในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่า

ความสามารถในการเกาะรวมตัว (cohesiveness) ลดลง และในด้านประสาทสัมผัสพบว่าเมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสูตรเม็ดไข่มุกที่มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง 70% ส่วนผสมของผงเห็ดและเมือกกระเจี๊ยบเขียว 10% และอินูลิน 10% เป็นสูตรที่เหมาะสมในการพัฒนา

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ญาธิปกร ธีระภัทรพลชัย, อรวัลภ์ อุปถัมภานนท์, เจริญ เจริญชัย. 2557. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพของเมือกกระเจี๊ยบเขียว. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 45: 661–664.

ดวงใจ แก้วจั่น. 2558. การเสริมใยอาหารประเภทพรีไบโอติกในผลิตภัณฑ์ข้าวแผ่นกรอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. 2550. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร. 3: 6–13.

นันทรัตน์ หนูเสมียน. 2560. การใช้โยเกิร์ตและอินูลินในน้ำสลัดสูตรถั่วเหลือง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

ปิยนุสร์ น้อยด้วง, พัชรี โพธิ์ชัย. 2554. การใช้ผงเมือกจากกระเจี๊ยบเขียวเป็นสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมใบย่านาง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 6: 35–43.

Kreenp. 2017. Insight into Bubble Milk Tea. https://www.mangozero.com/ what-the-boba-is, 8 February 2021.

National Nutrient Database for Standard Reference 2019. Mushrooms, oyster, raw. https://ndb.nal.usda.gov/ndb/food/show/11987, 8 February 2021.

Newport Scientific Pty, Ltd. 1995. Operation Manual for the series 4 Rapid Visco Analyzer. Australia.

Ng, H.S., Robert, S.D., Ahmad, W.A.N.W., Ishak, W.R.W. 2017. Incorporation of dietary fibre-rich oyster mushroom (Pleurotus sajor-caju.) powder improves postprandial glycaemic response by interfering with starch granule structure and starch digestibility of biscuit. J. Food Chem. 227: 358–368.

Prodhan, U.K., Linkon, K.M.M.R., Al-Amin, M.F., Alam, M.J. 2015. Development and quality evaluation of mushroom (pleurotussajor-caju) enriched biscuits. Emirates Journal of Food and Agriculture 27: 542–547.

USDA. 2019. Mushrooms, oyster, raw. https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/11987, 24 March 2020.

Wang, R., Wana, J., Liua, C., Xiaa, X., Dinga, Y. 2019. Pasting, thermal, and rheological properties of rice starch partially replaced by inulin with different degrees of polymerization. J. Foodhyd. 92: 228–232.

Wangein. 2018. The Effects of Bubble Milk Tea. https://www.Thaihealth.or.th /Content/40698. html, 9 February 2020.

การพัฒนาเอกซ์ทรูเดตจากข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนครเสริมโปรตีนผงจิ้งหรีดด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่

Development of extrudate from indigenous upland brown rice in Nakhon fortified with cricket protein powder by twin screw extruder

สุภาษิต ชูกลิ่น*, ธีระพงค์ หมวดศรี, อดิเรก ชัยฤกษ์, อทิตติยา ชูสุวรรณ์, ธวัชชัย หนูทอง, ณัฐภรณ์ ทองอินทร์

Supasit Chooklin*, Teerapong Muadsri, Adirek Chairerk, Atittiya Choosuwan, Tawatchai Nhootong, Natthaporn thongin

สาขาวิชานวัตกรรมอาหารและการจัดการ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช (ทุ่งใหญ่) นครศรีธรรมราช 80240

Department of Food Innovation and Management, Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat Campus (Thungyai), Nakhon Si Thammarat 80240, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: supasit.c@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาเอกซ์ทรูเดตจากข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนคร (เม็ดในฝ้าย สังข์หยด และเหนียวดำ) และผงจิ้งหรีดด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ ศึกษาปริมาณของผงจิ้งหรีด (0–20% w/w) และปริมาณของข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนคร (0-30% w/w) ที่สภาวะคงที่ คือ อุณหภูมิบาเรล 1–6 (40–120°C) อุณหภูมิดาย (140°C) ความเร็วรอบสกรู (450 rpm) และความชื้นสารป้อน (12% w/w) พบว่า ข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายมีค่าการต้านอนุมูลอิสระ (6.94 mg vitamin C/g Dry weight (DW)) และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (0.74 mg Gallic acid equivalent (GAE)/g DW) มากกว่าข้าวกล้องสังข์หยด (0.03±0.01 mg GAE/g DW) และข้าวกล้องเหนียวดำ (0.18±0.01 mg GAE/g DW) ส่วนผงจิ้งหรีดมีองค์ประกอบทางเคมีโดยเฉพาะปริมาณโปรตีน (60.40% โดยน้ำหนักเปียก) และไขมัน (16.92% โดยน้ำหนักเปียก) สูง การเพิ่มปริมาณผงจิ้งหรีดและปริมาณของข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนครส่งผลต่อเอกซ์ทรูเดตให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ค่าการพองตัวลดลง และค่าสีมีค่า L* และ b* ลดลง แต่ a* เพิ่มขึ้น ที่สัดส่วนของผงจิ้งหรีดและข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนคร (เม็ดในฝ้าย) 5% w/w ได้เอกซ์ทรูเดต (การพองตัวสูงและความแข็งต่ำ) เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: ข้าวกล้องไร่พื้นเมือง, เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์, ผงจิ้งหรีด, เอกซ์ทรูเดต

Abstract

In this study, extrudate from indigenous upland brown rice (Mednai Fay, Sung Yod and Black waxy) and cricket powder was developed with twin screw extruder. Effects of cricket powder content (0–20% w/w) and indigenous upland brown rice content (0-30% w/w) were determined. Barrel temperature 1–6 (40–120°C), die temperature (140°C), screw speed (450 rpm) and feed moisture (12% w/w) of extruder conditions were controlled at a constant value in this study. It was found that antioxidant activity value (6.94 mg vitamin C/g DW) and total phenolic content (0.74 mg GAE/g DW) of Mednai Fay brown rice have more than Sung Yod brown rice (0.03±0.01 mg GAE/g DW) and Black waxy brown rice (0.18±0.01 mg GAE/g DW). Proximate analysis of cricket powder has a high protein and fat at 60.40% by wet weight and 16.92% by wet weight, respectively. Increasing of cricket powder content and indigenous upland brown rice content has affected on properties of extrudate. Results showed that hardness increased but expansion decreased with increasing of cricket powder content and indigenous upland brown rice content. Moreover, color value found that L* and b* decreased but a* value increased. The optimum extrudate (high expansion and low hardness) with use of cricket powder content at 5% w/w and indigenous upland brown rice (Mednai Fay) content was 5% w/w.

Keywords: Cricket powder, extrudate, extruder, indigenous upland brown rice

คำนำ

ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาดส่วนใหญ่มีคาร์โบไฮเดรตและไขมันเป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณโปรตีนต่ำ ซึ่งไม่เป็นที่นิยมสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ ดังนั้นผู้ผลิตสินค้าจึงมีการปรับตัวโดยผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคที่รักสุขภาพเพิ่มขึ้น เช่น ขนมขบเคี้ยวที่ไม่ผ่านการทอด ขนมขบเคี้ยวโซเดียมต่ำและขนมขบเคี้ยวประเภทโปรตีนสูง (ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2559) ในขณะที่ผู้บริโภคมีความนิยมในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวประเภทโปรตีนสูง แต่ในประเทศไทยผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวโปรตีนสูงมีค่อนข้างน้อย ยังคงนำเข้าจากต่างประเทศและราคาค่อนข้างสูง (กชแก้ว และชวกร, 2559) ตัวอย่างขนมขบเคี้ยวโปรตีนสูงที่มีในท้องตลาด เช่น ขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งโปรตีนสูง ขนมขบเคี้ยวแปรรูปจากเนื้อหมู ขนมขบเคี้ยวจากเนื้อปลา และขนมขบเคี้ยวจากแมลง เป็นต้น แมลงถือเป็นแหล่งอาหารที่มีรสชาติเป็นเอกลักษณ์ มีโปรตีน วิตามิน และกรดอะมิโนหลายชนิดในปริมาณสูง อีกทั้งยังมีไขมันต่ำจึงเป็นที่นิยมสำหรับการบริโภคในกลุ่มผู้บริโภคในหลายประเทศ การศึกษาค้นคว้าวิจัยแหล่งโปรตีนทางเลือก พบว่า แมลงเป็นแหล่งที่สำคัญและมีศักยภาพที่จะเป็นโปรตีนทดแทนเนื้อสัตว์ได้เพราะใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงสั้น ประมาณ 1–2 เดือน มีโปรตีนสูงถึง ร้อยละ 12.9 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณโปรตีนในไข่ไก่ร้อยละ 12.7 (ทัศนีย์ และคณะ, 2547; Hanboonsong et al., 2013) ขนมขบเคี้ยวต่างๆ มีกรรมวิธีการผลิตมาจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion) เอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้นจึงสามารถคงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารเอาไว้ได้ อีกทั้งสามารถทำให้เกิดการพองกรอบโดยไม่ต้องอาศัยการทอดด้วยน้ำมันจึงเหมาะที่จะนำมาพัฒนาเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ (Liang et al., 2013) การผลิตเอกซ์ทรูเดตในอุตสาหกรรมอาหารขบเคี้ยว ส่วนมากจะใช้แป้งข้าวสาลีเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศ ในประเทศไทยข้าวกล้องเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจสำหรับการผลิตเอกซ์ทรูเดตเนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่หาง่ายในประเทศ ให้การพองตัวที่ดี มีรสจืด และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้ผลิตผลทางการเกษตร (Chaiyakul et al., 2009) ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้ข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนคร (เม็ดในฝ้าย สังข์หยด และเหนียวดำ) และผงจิ้งหรีดด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ วิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องพื้นเมืองนครและผงจิ้งหรีด รวมถึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพเอกซ์ทรูเดตสำหรับผลิตขนมขบเคี้ยวเสริมโปรตีน

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

นำข้าวเปลือกไร่พื้นเมืองนคร (เม็ดในฝ้าย สังข์หยด และเหนียวดำ) ไปกระเทาะเปลือกด้วยเครื่องกระเทาะเปลือก บดด้วยเครื่องบดละเอียด คัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน (mesh no.60) แล้วเก็บในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพ และจิ้งหรีดนำมาแช่ในน้ำเย็น ตักออกด้วยกระชอนใส่ลงในน้ำสะอาดล้างด้วยน้ำ 3 ครั้ง นำไปลวกในน้ำต้มเดือด อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (80°C, 48 hr) บดด้วยเครื่องปั่น เก็บในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพค่าสี (L*, a* และ b*) ด้วยเครื่อง Hunter Lab องค์ประกอบทางเคมีตามวิธี AOAC (2000) กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระตามวิธีของ Brand-Williams et al. (1995) และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดตามวิธีของ Singleton et al. (1999)

ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแป้งข้าวกล้องและผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพของเอกซ์ทรูเดต

ศึกษาอัตราส่วนของแป้งข้าวกล้องและผงจิ้งหรีดต่อผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตด้วยแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยนำข้าวมาบดด้วยเครื่องบดแล้วนำไปคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดตะแกรงร่อน นำแป้งข้าวกล้องที่บด (0–30% w/w) ผสมกับผงจิ้งหรีด (0–20% w/w) แป้งข้าวเจ้า เกล็ดข้าวโพด น้ำมันพืช น้ำตาล และ $CaCO_3$ ปริมาณ 46, 3, 5, และ 1% w/w ตามลำดับ ในเครื่องผสมจากนั้นนำส่วนผสมไปแปรรูป โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ใช้หน้าแปลนรูปวงกลม 1 รู (4 mm) อัตราการป้อนส่วนผสม 10 rpm ความชื้นของวัตถุดิบผสม 12% w/w ความเร็วรอบสกรู 450 rpm อุณหภูมิบาร์เรล 40, 50, 70, 130, 120, 120, 140°C (สุภายิตและคณะ, 2562) ตามลำดับ เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จะถูกนำไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min เอ็กซ์ทรูเดตที่แห้งแล้วจะถูกบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ค่าความแข็ง โดยเครื่อง Texture analyzer ค่าสี (L*, a* และ b*) โดยเครื่อง Spectrophotometer และอัตราการพองตัว วัดโดยใช้เวอร์เนียร์จากตัวอย่างเอกซ์ทรูเดตจำนวน 10 ตัวอย่าง คำนวณ Expansion ration จาก Diameter of extrudate/Diameter of die

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีข้าวไร่พื้นเมืองนคร

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายแสดงดัง Table 1 พบว่า แป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายมีลักษณะสีม่วงเข้ม ขนาดอนุภาค 250 μm มีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 48.26, 4.91 และ 0.87 ตามลำดับสอดคล้องกับการศึกษาของสุพิศา (2547) การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีและความคงตัวของข้าวที่มีรงควัตถุมีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 61.8, 3.16 และ 0.65 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายแสดงดัง Table 1 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายประกอบด้วยค่าโปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 7.25, 2.55, 0.77, 1.73 และ 77.95 ตามลำดับ สำหรับค่าการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายเท่ากับ 6.94 mg vitamin C/g DW และ 0.74 mg GAE/g DW ตามลำดับ สอดคล้องกับ สุพิศา (2547) ประกอบด้วยค่าโปรตีน ไขมัน เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 6.68, 2.86, 1.16 และ 89.30 ตามลำดับ การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของข้าวกล้องเหนียวดำแสดงดัง Table 1 พบว่า ข้าวกล้องเหนียวดำมีลักษณะสีเข้ม ขนาดอนุภาค 250 μm มีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 59.2, 5.53 และ 5.86 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเหนียวดำ จากงานวิจัยของ สัญชัย (2552) พบว่า ค่า L* a* และ b* ของข้าวกล้องเหนียวดำมีค่าเท่ากับ 41.20, 4.18 และ 3.84 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องเหนียวดำแสดงดัง Table 1 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีที่ของข้าวกล้องเหนียวดำประกอบด้วยค่าโปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 8.03, 1.21, 0.79, 0.69 และ 79.60 ตามลำดับ สำหรับค่าการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องเหนียวดำเท่ากับ 1.86 mg vitamin C/g DW และ 0.18 mg GAE/g DW ตามลำดับ สอดคล้องกับ สัญชัย (2552) การศึกษาคุณภาพของข้าวพื้นเมืองมีสีภาคใต้ของประเทศไทย ประกอบด้วย

ค่าโปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 8.44, 1.93, 0.26, 1.52 และ 78.95 ตามลำดับ การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของข้าวกล้องสังข์หยดแสดงดัง Table 1 พบว่า ข้าวกล้องสังข์หยดมีลักษณะสีของข้าวที่เข้ม ขนาดอนุภาค 250 μm มีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 79.81, 3.69 และ 14.17 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของแป้งข้าวกล้องสังข์หยดแสดงดัง Table 1 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องสังข์หยดประกอบด้วยค่าโปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 8.81, 1.87, 4.45, 1.08 และ 73.72 ตามลำดับ สอดคล้องกับ สุธาสินีและคณะ (2561) การศึกษาคุณภาพของวัตถุดิบประกอบด้วยค่าโปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 7.09, 2.78, 2.39, 1.25 และ 75.40 ตามลำดับ สำหรับค่าการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องสังข์หยดเท่ากับ 0.53 mg vitamin C/g DW และ 0.03 mg GAE/g DW ตามลำดับ ดังนั้นข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายจึงถูกเลือกนำไปศึกษาต่อเนื่องจากมีค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดเปรียบเทียบกับอีก 2 สายพันธ์

Table 1 Physical and chemical properties of upland brown rice in Nakhon

Properties	Brown rice		
	Mednai Fay	Black waxy	Sungyod
Physical			
- Color value			
L*	48.26 ± 0.01	59.27 ± 0.18	79.81 ± 0.19
a*	4.91 ± 0.02	5.53 ± 0.02	3.69 ± 0.09
b*	0.87 ± 0.01	5.86 ± 0.02	14.17 ± 0.07
- Particle size (μm)	250	250	250
Chemical			
- Moisture (%)	10.52 ± 0.15	10.47 ± 0.42	10.70 ± 0.45
-Protein (%)	7.25 ± 0.09	8.03 ± 0.18	8.81 ± 0.06
- Fat (%)	2.55 ± 0.08	1.21 ± 0.04	1.87 ± 0.34
- Crude fiber (%)	0.77 ± 0.90	0.79 ± 0.75	4.45 ± 0.13
- Ash (%)	1.73 ± 0.02	0.69 ± 0.05	1.08 ± 0.06
- Carbohydrate (%)	77.95 ± 0.05	79.60 ± 0.02	73.72 ± 0.03
- Water activity (a_w)	0.52 ± 0.01	0.82 ± 0.01	0.44 ± 0.01
- Antioxidant by DPPH (mg vitamin C/g DW)	6.94 ± 0.11	1.86 ± 0.29	0.53 ± 0.04
- Total phenolic (mg GAE/g DW)	0.74 ± 0.009	0.18 ± 0.01	0.03 ± 0.01

คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงจิ้งหรีด

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผงจิ้งหรีดแสดงดัง Table 2 พบว่า ผงจิ้งหรีดมีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม ขนาดอนุภาค 1 mm มีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และที่ความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 32.13 6.40 และ 14.85 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Bassett (2018) ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงหน้าที่ คุณค่าทางอาหารและประสาทสัมผัสของผงจิ้งหรีดอบแห้งแบบพ่นฝอยและตู้อบมีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 34.68 10.58 และ 19.72 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของผงจิ้งหรีดแสดงดัง Table 2 พบว่า ผงจิ้งหรีดมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงโดยมีค่าร้อยละ 60.40 และ 16.92 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Bassett (2018) มีปริมาณโปรตีนและไขมันร้อยละ 65.87 และ 17.70 ตามลำดับดังนั้นผงจิ้งหรีดจึงเป็นแหล่งสารอาหารที่สำคัญโดยเฉพาะโปรตีนและไขมันจึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ

Table 2 Physical and chemical properties of cricket powder

Properties	Analyzed values
Physical	
- Color value	
L*	32.13 ± 0.42
a*	6.40 ± 0.14
b*	14.85 ± 0.30
- Particle size (mm)	1.00
Chemical	
- Moisture (%)	12.64 ± 0.01
- Protein (%)	60.40 ± 0.25
- Fat (%)	16.92 ± 4.07
- Crude fiber (%)	12.93 ± 0.57
- Ash (%)	3.81 ± 0.05
- Carbohydrate (%)	6.23 ± 0.69
- Water activity (a_w)	0.48 ± 0.01

ผลของสัดส่วนผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพการผลิตเอกซ์ทรูเดต

การศึกษาปริมาณผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพของเอกซ์ทรูเดต แสดงดัง Table 3 พบว่า การเพิ่มปริมาณผงจิ้งหรีดจากร้อยละ 0-20 ลักษณะปรากฏของเอกซ์ทรูเดตที่ผลิตได้มีสีเข้มขึ้นตามปริมาณผงจิ้งหรีด อธิบายได้ว่าเกิดจากลักษณะของผงจิ้งหรีดที่มีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อพิจารณาค่าความสว่าง (L*) ลดลงจาก 70.84 เป็น 54.18 ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นจาก 6.89 เป็น 9.04 และความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลงจาก 37.64 เป็น 25.72 ตามปริมาณจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Alam et al. (2019) ศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิง

หน้าที่ของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตเสริมแมลง พบว่า ค่าความสว่าง (L*) ลดลงจาก 59.10 เป็น 29.7 ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นจาก 1.90 เป็น 4.60 และความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลงจาก 26.20 เป็น 4.30 ตามปริมาณแมลงที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าการพองตัวมีค่าลดลงจาก 5.13 เป็น 2.61 แต่ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 3.41 กิโลนิวตัน เมื่อปริมาณผงจิ้งหรีดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 20 สอดคล้องกับ Azzollini et al. (2018) ศึกษาผลของสูตรและสภาวะกระบวนการต่อโครงสร้างจุลภาค เนื้อสัมผัสและการย่อยของขนมขบเคี้ยวเสริมแมลง พบว่า ค่าความแข็งของขนมขบเคี้ยวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.12 เป็น 0.49 กิโลนิวตัน เมื่อปริมาณแมลงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 20 เนื่องจากความเป็นรูพรุนในตัวอย่างลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 จากปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 2 เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลง และมีความหนาแน่นสูง เนื่องจากแป้งเกิดการรวมตัวกับโปรตีนเมื่อให้ความร้อนจะทำให้โมเลกุลของโปรตีนเกิดอันตรกิริยากับสายอะไมโลส ส่งผลให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำลดลง การเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชต่ำ จึงทำให้เม็ดแป้งมีอัตราการพองตัวลดลง นอกจากนี้ปริมาณไขมันที่อยู่ในผงโปรตีนส่งผลกระทบต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้งโดยไขมันจะลดการจับตัวกับน้ำของแป้งทำให้ความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้งลดลงเช่นกัน (สุธาสินี และคณะ, 2561) ดังนั้นปริมาณผงจิ้งหรีด 5%w/w ถูกเลือกนำไปศึกษาต่อเนื่องจากมีค่าการพองตัวสูงสุดและค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกับชุดควบคุม

Table 3 Effect of cricket powder content on physical properties of extrudate

Cricket powder content (%)	Hardness (KN)	Expansion ratio	Color value		
			L*	a*	b*
0	$0.15^{c} \pm 0.04$	$5.13^{a} \pm 0.13$	$70.84^{a} \pm 0.11$	$6.89^{d} \pm 0.06$	$37.64^{a} \pm 0.53$
5	$0.16^{c} \pm 0.02$	$4.14^{b} \pm 0.02$	$68.56^{b} \pm 0.16$	$7.67^{c} \pm 0.04$	$29.91^{b} \pm 0.05$
10	$0.88^{b} \pm 0.01$	$3.70^{c} \pm 0.02$	$62.60^{c} \pm 0.14$	$8.42^{b} \pm 0.08$	$29.02^{c} \pm 0.08$
15	$1.06^{b} \pm 0.01$	$2.73^{d} \pm 0.05$	$59.96^{d} \pm 0.13$	$8.42^{b} \pm 0.08$	$28.21^{d} \pm 0.04$
20	$3.41^{a} \pm 0.27$	$2.61^{d} \pm 0.06$	$54.18^{e} \pm 0.32$	$9.04^{a} \pm 0.01$	$25.72^{e} \pm 0.15$

Note: In a column, means with same letter are not significantly different at 0.05 significance level.

ผลของสัดส่วนของแป้งข้าวไร่พื้นเมืองนครต่อคุณภาพของเอกซ์ทรูเดต

การศึกษาปริมาณแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายต่อคุณภาพของเอกซ์ทรูเดต แสดงดัง Table 4 พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายจากร้อยละ 0–30 ที่ปริมาณผงจิ้งหรีด 5% w/w ส่งผลต่อลักษณะปรากฏของเอกซ์ทรูเดตที่ผลิตได้มีสีเข้มขึ้นตามปริมาณแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าเกิดจากลักษณะของแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายที่มีสีคล้ำ เมื่อพิจารณาค่าความสว่าง (L*) ลดลงจาก 68.55 เป็น 37.73 ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นจาก 6.89 เป็น 10.95 และความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลงจาก 29.91 เป็น 11.25 ตามปริมาณแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าการพองตัวมีค่าลดลงจาก 4.14 เป็น 3.09 แต่ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.16 เป็น 0.91 กิโลนิวตัน เมื่อปริมาณแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 30 ดังนั้นที่ปริมาณของข้าวกล้องเม็ดในฝ้าย

5% w/w มีค่าการพองตัวสูงสุดโดยไม่แตกต่างกับชุดควบคุมและค่าความแข็งต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณข้าวกล้องที่สัดส่วนอื่นๆ

Table 4 Effect of brown rice flour content of Mednai Fay on physical properties of extrudate fortified cricket powder

Brown rice flour content (%)	Hardness (KN)	Expansion ratio	Color value		
			L*	a*	b*
0	$0.16^{e} \pm 0.02$	$4.14^{a} \pm 0.02$	$68.55^{a} \pm 0.16$	$6.89^{a} \pm 0.06$	$29.91^{a} \pm 0.05$
5	$0.35^{d} \pm 0.03$	$4.03^{a} \pm 0.08$	$52.22^{b} \pm 0.42$	$7.90^{b} \pm 0.04$	$20.73^{b} \pm 0.32$
10	$0.56^{c} \pm 0.03$	$3.63^{b} \pm 0.14$	$45.71^{c} \pm 0.35$	$8.31^{c} \pm 0.04$	$16.35^{c} \pm 0.05$
15	$0.74^{b} \pm 0.03$	$3.49^{bc} \pm 0.01$	$43.80^{d} \pm 0.41$	$8.69^{d} \pm 0.18$	$15.57^{de} \pm 0.68$
20	$0.75^{b} \pm 0.00$	$3.42^{c} \pm 0.03$	$40.11^{e} \pm 0.55$	$9.16^{e} \pm 0.08$	$14.83^{e} \pm 0.81$
25	$0.86^{a} \pm 0.005$	$3.35^{c} \pm 0.01$	$38.58^{f} \pm 0.56$	$10.17^{f} \pm 0.04$	$13.01^{f} \pm 0.98$
30	$0.91^{a} \pm 0.01$	$3.09^{d} \pm 0.14$	$37.73^{g} \pm 0.48$	$10.95^{g} \pm 0.02$	$11.25^{g} \pm 0.13$

Note: In a column, means with same letter are not significantly different at 0.05 significance level.

สรุป

คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแป้งข้าวกล้องไร่นคร (ข้าวเม็ดในฝ้าย ข้าวสังข์หยดและข้าวเหนียวดำ) มีความแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์โดยแป้งข้าวกล้องเม็ดในฝ้ายมีค่าการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด ส่วนคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผงจิ้งหรีดมีค่าโปรตีนและไขมันสูง การใช้ปริมาณผงจิ้งหรีดในการผลิตเอกซ์ทรูเดตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีผลต่อค่าความแข็ง ค่าการพองตัวและค่าสีของเอกซ์ทรูเดต เช่นเดียวกับสัดส่วนของแป้งข้าวกล้องไร่นครส่งผลต่อคุณภาพเอกซ์ทรูเดตโดยปริมาณผงจิ้งหรีด 5% w/w และสัดส่วนแป้งข้าวกล้องไร่พื้นเมืองนคร (เม็ดในฝ้าย) 5% w/w ในส่วนผสมทั้งหมดเหมาะสมในการผลิตเอกซ์ทรูเดต (การพองตัวสูงและความแข็งต่ำ)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช (พื้นที่ทุ่งใหญ่) ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการ ดำเนินการวิจัยและทุนสนับสนุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กชแก้ว สุริยะ, ชวกร วรสุวรรณรักษ์. 2559. การพัฒนาผลิตภัณฑ์โปรตีนบาร์จากข้าวกล้องและเวย์โปรตีนต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์. http://www.agro.cmu.ac.th, 27 มกราคม 2564.

ทัศนีย์ แจ่มจรรยา, ชาญชัย ถาวรอนุกูลกิจ,พิษณุ อุตตมะเวทิน. 2547. การผลิตแมลงกินได้เพื่อเศรษฐกิจและโภชนาการของชุมชน: จิ้งหรีด. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุพิศา สมโต. 2547. คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีและความคงตัวของข้าวไทยที่มีรงควัตถุ. สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สุธาสินี ศรีวิไล, ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์, น้องนุช ศิริวงศ์, ณัฐิรา อ่อนน้อม. 2561. ผลของปริมาณผงโปรตีนไก่และสายพันธุ์ข้าวต่อคุณภาพเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวกล้องสังข์หยดพัทลุงและแป้งข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว. 34: 109–124.

สุภาษิต ชูกลิ่น, ธนวัตน์ ทิพย์พืช, สายทิพย์ แซ่แง่. 2562. ผลของอัตราส่วนแป้งข้าวกล้องพื้นเมืองภาคใต้ต่อคุณภาพขนมขบเคี้ยวที่ผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์. ใน: รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

สัญชัย ยอดมณี. 2552. คุณภาพของข้าวสีพื้นเมืองมีสีภาคใต้ของประเทศไทย. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศูนย์อัจฉริยะภาพเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2559. http://www.fic.nfi.or.th, 27 มกราคม 2564.

Alam, M.R., Scampicchio, M., Angeli, S., Ferrentino, G. 2019. Effect of hot melt extrusion on physical and functional properties of insect based extruded products. J. Food Eng. 259: 1–36.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemist (17thed). Gaitherburg, Maryland, U.S.A.

Azzollini, D., Derossi, A., fogliano, V., Lakemond, C.M.M., Severini, C. 2018. Effects of formulation and process conditions on microstructure, texture and digestibility of extruded insect-riched snacks. Innov Food Sci Emerg Technol. 45: 344–353.

Bassett, F.S. 2018. Comparison of functional, nutritional, and sensory properties of spray-dried and oven-dried cricket (*Acheta domesticus*) powder. M.Sc. thesis, Brigham Young University.

Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT-Food Sci Technol. 28: 25–30.

Chaiyakul, S., Jangchud, K., Jangchud, A., Wuttijumnong, P., Winger, R. 2009. Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice based snack. LWT-Food Sci Technol. 42: 781–787.

Hanboonsong, Y., Jamjanya, T., Durst, P.B. 2013. Six-legged livestock: edible insect farming, collecting and marketing in Thailand. FAO, Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok. van Huis, A. 2013. Potential of insects as food and feed in assuring food security. Annu. Rev. Entomol. 58: 563–583.

Liang, Y., Hosahalli, S., Ramaswamy, J.B. 2013. Protein rich extruded products prepared from soy protein isolate-corn flour blends. LWT-Food Sci Technol. 50: 279–289.

Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela Raventos, R.M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Method in Enzymol. 299: 152–178.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคบรรยาย

Oral Presentation

การแปรผันตามฤดูกาลของลักษณะทางสรีรวิทยาบางประการของหญ้าทะเลใบมะกรูด *Halophila ovalis* (R. Brown) J.D.Hooker

Seasonal variations of the physiological characteristics of the seagrass *Halophila ovalis* (R. Brown) J.D. Hooker

ธราวิทญ์ วุธิรักษ์*, พิมพ์ชนก บัวเพชร

Tarawit Wutiruk*, Pimchanok Buapet

สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

Division of Biological Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: 5710210179@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ด้วยแสงในหญ้าทะเล *Halophila ovalis* ในเดือนมีนาคม และเดือนตุลาคม 2561 โดยวัดการตอบสนองต่อแสง (RLCs) ด้วยเทคนิค PAM fluorometry และปริมาณรงควัตถุ ร่วมกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม พบว่าในเดือนมีนาคมมีอัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอนสูงสุด ความสามารถในการกำจัดแสงส่วนเกิน และปริมาณแคโรทีนอยด์สูงกว่าในเดือนตุลาคมอยู่ประมาณร้อยละ 66, 130 และ166 ตามลำดับ ขณะที่เดือนตุลาคมมีค่าประสิทธิภาพการใช้แสงเพื่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณคลอโรฟิลล์ที่สูงกว่าในเดือนมีนาคมอยู่ร้อยละ 35 และ 58 ตามลำดับ สอดคล้องกับปัจจัยทางกายภาพที่พบว่าในเดือนมีนาคมมีอุณหภูมิ ความเข้มแสงเฉลี่ย และปริมาณไนเตรตสูงกว่า ซึ่งอาจทำให้พืชสังเคราะห์ด้วยแสงได้มากและต้องมีการทำงานของระบบป้องกันตัวเองจากความเข้มแสงสูง ขณะที่เดือนตุลาคมพืชมีการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยการเพิ่มปริมาณรงควัตถุหลัก ดังนั้นการสังเคราะห์ด้วยแสงและการสะสมรงควัตถุของหญ้าทะเลใบมะกรูดจึงอาจเป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพเพื่อติดตามสุขภาพของหญ้าทะเลตามช่วงฤดูกาลได้

คำสำคัญ: การสังเคราะห์ด้วยแสง, ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ, หญ้าทะเลใบมะกรูด

Abstract

This study investigates the photosynthetic responses of *Halophila ovalis* during summer (March) and the rainy season (October) in 2018. Rapid light curves (RLCs) were conducted using Pulse Amplitude Modulator (PAM) fluorometry together with the analyses of pigments composition and environmental factors (temperature, light and nutrients in porewater). The seagrass displayed a higher maximum electron transport rate, non-photochemical quenching and carotenoid content in summer than in the rainy season (about 66%, 130% and 166% respectively). On the contrary, plants in the rainy season showed higher photosynthetic efficiency and chlorophyll content (about 35% and 58% respectively). The photosynthetic characteristics correspond with higher light availability, temperature and nitrate in porewater in summer, enhancing photosynthesis and photoprotection. In contrast, higher photosynthetic efficiency and chlorophyll a and b accumulation may play a role in maintaining photosynthetic activity in the rainy season. Therefore, photosynthetic characteristics and pigment dynamic may be used as a biomarker for monitoring seasonal variation in seagrass health.

Keywords: biomarker, *Halophila ovalis*, photosynthesis

คำนำ

หญ้าทะเลใบมะกรูด *Halophila ovalis* เป็นพืชดอกใบเลี้ยงคู่ที่มีเขตกระจายตัวอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลในเขตน้ำขึ้นน้ำลงของเขตอบอุ่น (Temperate area) ไปจนถึงบริเวณเขตร้อน (Tropical area) โดยเฉพาะในอินโดแปซิฟิก และในประเทศไทยมีการกระจายตัวทั้งทะเลอันดามันและอ่าวไทย (Ralph et al., 2007) และด้วยเหตุที่ถิ่นที่อยู่ของหญ้าทะเลมักเป็นดินเลนปนทรายจึงทำให้ตกอยู่ในสภาวะดินมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ (Hypoxic) จึงทำให้ดินมีการสะสมสารพิษในกลุ่มซัลไฟด์อันเป็นเหตุให้หญ้าทะเลต้องนำออกซิเจนจากส่วนเหนือดินไปช่วยลดความเป็นพิษบริเวณรากด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้หญ้าทะเลในเขตน้ำขึ้นน้ำลงส่วนใหญ่มีความต้องการความเข้มแสงเฉลี่ยที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชบก (Shafer et al., 2007) ประกอบกับผลของฤดูกาลที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตกของไทยจะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ฤดูฝน) ซึ่งจะทำให้มีฝนตกหนักมีการพัดพาของตะกอนดินจำนวนมาก และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่จะทำให้ภาคใต้มีอากาศร้อนชื้นและอาจมีฝนฟ้าคะนองเล็กน้อย (ฤดูร้อน) ทำให้ปัจจัยต่างๆไม่ว่าจะเป็น ความเข้มแสง อุณหภูมิเฉลี่ย และปริมาณธาตุอาหารที่แตกต่างกันในทั้ง 2 ฤดู เป็นเหตุให้หญ้าทะเล *H. ovalis* ต้องมีการปรับตัวโดยเฉพาะในการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งลักษณะการตอบสนองทั่วไปของหญ้าทะเลในฤดูฝนที่มีความเข้มแสงต่ำจะมีการแสดงลักษณะของพืชที่เจริญในที่ร่ม (Shade plant) ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงเพื่อสังเคราะห์ด้วยแสงอันได้แก่ การขยายขนาดของหน่วยรับแสง (Light harvesting antenna) การเพิ่มความหนาแน่นของรงควัตถุหลักที่ใช้รับแสง (คลอโรฟิลล์ เอ และ บี) (Davey et al., 2018) รวมถึงลดการทำงานของบางกลไกลง เช่น การป้องกันตัวเองจากความเข้มแสงสูง (Photoprotection) ผ่านวัฏจักร Xanthophyll (Davey et al., 2018) อย่างไรก็ตามหญ้าทะเล *H. ovalis* เป็นหญ้าทะเลที่มีความอ่อนไหวต่อความเข้มแสงต่ำอันเนื่องจากการมีคาร์โบไฮเดรตสะสมในเนื้อเยื่อในปริมาณน้อยทำให้สามารถรักษาดุลยภาพภายใต้ความเข้มแสงต่ำของฤดูฝนได้ในระยะเวลาจำกัดเมื่อเทียบกับหญ้าทะเลที่มีขนาดใหญ่กว่า และอาจทำให้ประชากรมีความเสี่ยงต่อการลดลงของประชากรเมื่อเกิดความเครียดอื่นๆที่เสริมเข้ามา (Kilminster et al., 2015) ในทางกลับกันฤดูร้อนที่มีความเข้มแสงและอุณหภูมิเฉลี่ยที่สูงหญ้าทะเลจำเป็นต้องมีระบบป้องกันตัวเองจากความเครียดดังกล่าวและแสดงลักษณะของ พืชที่เจริญกลางแจ้ง (Sun plant) เช่น สามารถพบเห็นการทำงานของวัฏจักร Xanthophyll ผ่านการสะสมรงควัตถุรองเช่น แคโรทีนอยด์ในสัดส่วนที่สูงขึ้น และลดความหนาแน่นของรงควัตถุหลักบริเวณหน่วยรับแสงลงเพื่อลดพลังงานแสงส่วนเกินที่จะเข้ามาและทำให้สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ประสิทธิภาพสูงสุดและหลีกเลี่ยงความเสียหายของเซลล์จากสภาวะที่มีแสงมาก (Kumar et al., 2017)

ในการติดตามสถานภาพของหญ้าทะเลมักจะใช้การติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากร แต่วิธีการดังกล่าวจะสามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงต่างๆได้ช้าและเชื่อมโยงไปยังกลไกการปรับตัวของหญ้าทะเลได้ไม่สมบูรณ์ จึงเป็นที่มาของการใช้ เทคนิค Pulse Amplitude Modulated (PAM) fluorometry ซึ่งประยุกต์การใช้ Chlorophyll a fluorescence ในการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้แสงเพื่อสังเคราะห์ด้วยแสง โดยเทคนิค PAM fluorometry เป็นเทคนิคที่รวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง (Ralph et al., 2007) และทำให้สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆที่บ่งบอกถึงกลไกที่พืชใช้รับมือกับความเครียดได้เป็นอย่างดี เป็นเหตุให้ผู้วิจัยนำเทคนิค PAM fluorometry มาใช้เพื่อตรวจวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ร่วมกับการตรวจวัดการสะสมรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสงในหญ้าทะเล *H. ovalis* และเก็บข้อมูลทางสิ่งแวดล้อมในเดือนมีนาคม และตุลาคม 2561 เป็นตัวแทนของฤดูร้อนและฤดูฝนตามลำดับ เพื่อระบุกลไกการปรับตัวของการสังเคราะห์ด้วยแสง

ของหญ้าทะเลในทั้ง 2 ฤดูกาล นำไปสู่การเป็นชุดข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการประเมินความสมบูรณ์ของหญ้าทะเลในน่านน้ำไทยต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

สถานที่ศึกษาตั้งอยู่บริเวณหาดท่าหลา (8°1'17.50"N 98°24'39.46"E) ตำบลป่าคลอก อำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ต สภาพอากาศประกอบด้วย 2 ฤดูกาล คือฤดูกาลที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (มิถุนายน–ตุลาคม) และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (พฤศจิกายน–มีนาคม) สภาพพื้นที่เป็นดินเลนปนทราย ประกอบไปด้วยหญ้าทะเล 7 ชนิด (Koedsin et al., 2016) โดยมีหญ้าทะเลใบมะกรูด *Halophila ovalis* (R.Brown) J.D. Hooker เป็นหญ้าทะเลชนิดเด่น



Fig. 1 Study area located in Tha-La beach, Pa-Khlok, Phuket

Adapted from: Google earth V.7.3

เก็บข้อมูลในเดือนมีนาคมและตุลาคม 2561 โดยเลือกวันที่น้ำลงต่ำสุดในช่วงกลางวันเป็นเวลา 3 วัน เลือกขอบเขตที่มีหญ้าทะเลใบมะกรูดขึ้นเพียงชนิดเดียว (Monospecific meadow) อย่างหนาแน่น และ สุ่มเลือกบริเวณเก็บข้อมูล 6 บริเวณ โดยใช้กรอบสี่เหลี่ยมขนาด 50×50 เซนติเมตร

วัดและบันทึกความเข้มแสงต่อเนื่องทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ด้วย ODYSSEY light logger (Dataflow Systems Limited ประเทศนิวซีแลนด์) และ HOBO Tidbit temperature logger (Onset ประเทศสหรัฐอเมริการุ่น UA-002-08) ตามลำดับ โดยติดตั้งอุปกรณ์กลางกรอบสี่เหลี่ยมขนาด 50×50 เซนติเมตร

เก็บตัวอย่างน้ำทะเล จากพื้นที่กึ่งกลางของกรอบสี่เหลี่ยมขนาด 50×50 เซนติเมตร และจากระดับใบของหญ้าทะเล ใส่ขวดพลาสติกเก็บตัวอย่างขนาด 150 มิลลิลิตร เก็บรักษาในอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารในน้ำ (ไนเตรต ไนไตรท์ แอมโมเนียม และฟอสเฟต) โดยอ้างอิงจากระเบียบวิธีของ Parsons et al. (1992) จากนั้นสุ่มเลือกใบหญ้าทะเลใบมะกรูด 4 ใบในกรอบสี่เหลี่ยมขนาด 50×50 เซนติเมตร วัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยเครื่อง Pulse Amplitude Modulated (PAM) Fluorometer (Walz ประเทศเยอรมัน รุ่น Mini-PAM) โดยการสร้างกราฟการตอบสนองต่อแสง (RLC: Rapid light curve) ซึ่งวัดอัตราการขนส่ง

อิเล็กตรอนจากระบบแสงที่สอง (ETR: Electron Transport Rate) ซึ่งขั้นตอนจะใช้ Leaf clip (Walz ประเทศเยอรมัน) หนีบที่ใบหญ้าทะเลเป็นเวลา 10–15 นาที (Dark-adaptation) เพื่อให้ระบบแสงอยู่ในสถานะเปิด จากนั้นจึงเริ่มการสร้าง RLC โดยให้ความเข้มแสง 8 ค่าประกอบด้วย 0, 49, 104, 188, 286, 400, 609, 835 และ 1247 µmol photons $m^{-2}s^{-1}$ และวัดค่าการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากระบบแสงที่ 2 (ETR) และ ค่า NPQ (Non Photochemical Quenching) หลังจากให้แสงความเข้มละ 10 วินาที ตามวิธีการใน Buapet et al. (2020) จากนั้นใช้สมการของ Platt et al. (1980) เพื่อคำนวณค่าตัวแปรที่แสดงประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ อัตราถ่ายทอดอิเล็กตรอนสูงสุด หรือ ETR_{max} (Maximum Electron Transport Rate) ความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอนเริ่มอิ่มตัว หรือ E_k (Minimum light saturation point) และประสิทธิภาพการใช้แสงเพื่อการสังเคราะห์ด้วยแสง ($\propto$)

เก็บตัวอย่างใบหญ้าทะเลที่ใช้ในการตรวจวัดการสังเคราะห์ด้วยแสง มาตรวจวัดรงควัตถุในใบ (คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และ แคโรทีนอยด์) โดยประยุกต์วิธีการของ Arnon (1949) ล้างทำความสะอาดใบหญ้าทะเล จากนั้นถ่ายภาพพร้อมสเกล แล้วสกัดด้วยสารละลาย Acetone 80% ปริมาณ 2 มิลลิลิตร เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 4000 rpm 4ºC แล้วดูดส่วนใส มาวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ 630, 645, 647 และ 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate spectrofluorometer (Biotek power waveX ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น 800 TS) แล้วคำนวณตามสมการของ Arnon (1949) วัดพื้นที่ใบโดยใช้โปรแกรม Image J และคำนวณปริมาณรงควัตถุต่อพื้นที่ใบ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Statistica V.10 ทดสอบข้อมูลทั้งหมดเบื้องต้นด้วย Levene's test เพื่อทดสอบการกระจายตัวอย่างปกติของข้อมูลและความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวน ข้อมูลที่ทดสอบไม่ผ่านจะถูกแปลงให้อยู่ในรูป Log10 ทดสอบความแตกต่างทางสถิติของตัวแปรที่ได้จากกราฟการตอบสนองต่อแสง (ETRmax Ek และ Alpha) และค่าของสิ่งแวดล้อม โดยวิธีการ repeated-measures ANOVA และ one way ANOVA ตามลำดับและใช้การทดสอบ Fisher's least significant difference (LSD) เพื่อเปรียบเทียบพหุคูณ (Pairwise comparison)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

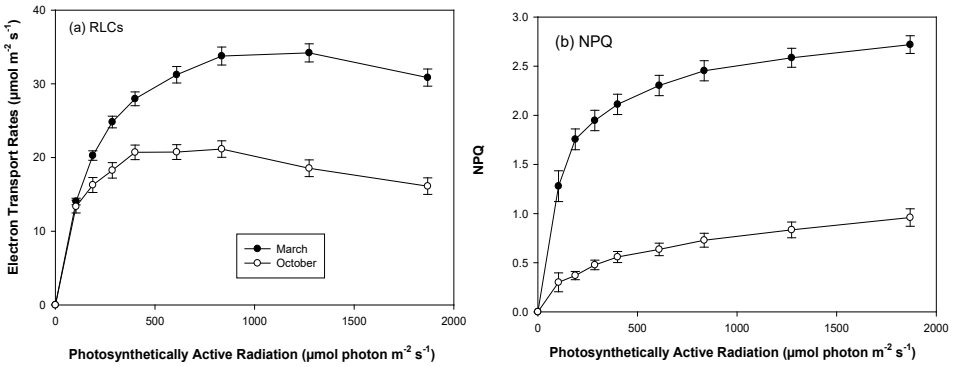


Fig. 2 Electron transport rates (ETRs) and non-photochemical quenching as the function of photosynthetically active radiation (PAR) indicated (a) rapid light curves (RLCs) and (b) non-photochemical quenching (NPQ) measured in *Halophila ovalis* in March (solid circles), October (open circles). Error bars show standard error, n = 30

Table 1 Average daily temperature, photosynthetically active radiation (PAR) and nutrients (nitrate, nitrile, ammonium and phosphate) measured in the *Halophila ovalis* meadow during the 2 seasons of the experimental period

Seasons	Temperature (°C)	PAR (μmolphoton $m^{-2}s^{-1}$)	Nutrients (mg/L)			
			Nitrate	Nitrite	Ammonium	Phosphate
March	30.62±0.31[a]	383.80±47.97[a]	0.0081±0.0002[a]	0.0030±0.0001[a]	0.0873±0.0230[a]	0.0230±0.0001[a]
October	29.71±0.23[b]	302.74±30.49[b]	0.0010±0.0003[b]	0.0010±0.0001[b]	0.150±0.0170[b]	0.0760±0.0063[b]

Note: Error bars show standard error of mean, n = 28 (Temperature and PAR), n = 6 (nutrients). The significantly different denoted by letters; Fisher's LSD post-hoc test, $p < 0.05$.

Table 2 Photosynthetic parameters accessed from rapid light response curve (RLCs) and pigment composition of *Halophila ovalis* during the 2 seasons of the experimental

Parameters	Seasons	
	March	October
Chlorophyll a (μg/cm^2)	10.5024±0.6460[b]	16.6180±0.5154[a]
Chlorophyll b (μg/cm^2)	2.7450±0.4148[b]	4.1483±0.1716[a]
Carotenoid (μg/cm^2)	3.2417±0.1933[a]	1.5727±0.0495[b]
Fv/Fm	0.77459±0.0063	0.792886±0.00436
ETRmax (μmol electrons $m^{-2}s^{-1}$)	33.1574±1.1404[a]	19.9967±1.0033[b]
Ek (μmol photons $m^{-2}s^{-1}$)	266.4123±10.5415[a]	139.0800±8.9008[b]
Alpha	0.1290±0.0054[b]	0.1742±0.0157[a]
NPQ	2.2523±0.1327[a]	0.9794±0.0814[b]

Note: Error bars show standard error of mean, n = 28 (Temperature and PAR), n = 6 (nutrients). The significantly different denoted by letters; Fisher's LSD post-hoc test, $p < 0.05$.

จากการเก็บข้อมูลทางสิ่งแวดล้อม (Table 1) พบว่าในเดือนมีนาคม (ฤดูร้อน) มีอุณหภูมิเฉลี่ย ความเข้มแสงเฉลี่ย ความเข้มข้นของไนเตรตและไนไตรท์ของน้ำสูงกว่าในเดือนตุลาคม (ฤดูฝน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่เดือนตุลาคมมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมและฟอสเฟตในน้ำสูงกว่าในเดือนมีนาคม สอดคล้องกับรายงานของ Lee et al. (2007) ที่พบว่าระดับแอมโมเนียมและฟอสเฟตในระบบนิเวศหญ้าทะเลจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำฝน ในขณะที่จะพบปริมาณไนเตรตและไนไตร์ทสูงในฤดูร้อน ทั้งนี้ปัจจัยการมีธาตุอาหารที่แตกต่างกันเนื่องจากเดือนมีนาคมที่มีอุณหภูมิ ความเข้มแสงสูงและปริมาณน้ำฝนต่ำทำให้ไนเตรตและไนไตร์ทซึ่งมาจากบ้านเรือนประชาชนที่ไหลลงมาจากแผ่นดินมีความเข้มข้นสูง (Perez et al., 1994) ในขณะที่ปริมาณน้ำฝนที่สูงของเดือนตุลาคมจะเกิดการชะล้างหน้าดินทำให้ฟอสเฟตจากแผ่นดินลงสู่ทะเลมากขึ้นประกอบกับการชะล้างดังกล่าว

ยังอาจเป็นผลให้ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำต่ำลงทำให้จุลชีพกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนทำงานเปลี่ยนไนเตรตเป็นแอมโมเนียมได้มากขึ้นตามไปด้วย (Filippelli, 2008) ซึ่งปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมดังกล่าวอาจส่งผลทำให้การตอบสนองทางสรีรวิทยาของหญ้าทะเล *H. ovalis* แตกต่างกันโดยในเดือนมีนาคม หญ้าทะเลมีลักษณะการตอบสนองของการสังเคราะห์ด้วยแสงแบบพืชที่เจริญกลางแจ้ง (Sun plant) (Kumar et al., 2017) สังเกตุได้จากการมีค่าอัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอนสูงสุด (ETRmax) และ ค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอนเริ่มอิ่มตัว (E_k) สูงกว่าในเดือนตุลาคม (Table 2) สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Dattolo et al. (2014) ที่พบว่า หญ้าทะเล *Posidonia oceanica* ที่กระจายตัวในบริเวณที่มีความเข้มแสงสูงกว่าจะมีค่า ETRmax และ Ek ที่สูงกว่าหญ้าทะเลที่กระจายตัวในที่มีความเข้มแสงต่ำ อย่างไรก็ตามการที่ต้องอยู่ภายใต้ความเข้มแสงที่สูงหญ้าทะเล *H. ovalis* ยังมีเพิ่มศักยภาพการทำงานของกลไกการป้องกันตัวเองจากความเข้มแสงสูง (Photoprotection) ผ่านทางวัฏจักร Xanthophyll สังเกตุได้จากการสะสมแคโรทีนอยด์และการมีค่า Non-Photochemical Quenching (NPQ) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการกำจัดพลังงานแสงส่วนเกินในรูปของความร้อนในสัดส่วนที่สูงกว่าในเดือนตุลาคมอย่างมีนัยสำคัญ (Table 2) ทั้งนี้ผลดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าในหญ้าทะเล *P. oceanica* (Dattolo et al., 2014) และ *Zostera muelleri* (Davey et al., 2018) โดยเมื่อหญ้าทะเลได้รับความเข้มแสงสูงค่า pH ใน lumen ของเยื่อไทลาคอยด์จะมีค่าต่ำลงเป็นผลให้โปรตีน PsbS จะทำการกระตุ้นรงควัตถุในวัฏจักร Xanthophyll ให้ถ่ายเทพลังงานส่วนเกินออกไปในรูปของ NPQ เพื่อยับยั้งการเกิดความเสียหาย (Photo-damage) ต่อระบบแสงที่ 2 (Davey et al., 2018)

ในทางกลับกันในเดือนตุลาคมหญ้าทะเลแสดงลักษณะการตอบสนองแบบพืชที่เจริญในที่ร่ม (Shade plant) โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงให้สามารถดำเนินกิจกรรมภายใต้ความเข้มแสงที่ต่ำลง ได้แก่ การปรับลดค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอนเริ่มอิ่มตัว (E_k) และอัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอนสูงสุด (ETRmax) ลง และการมีประสิทธิภาพการใช้แสงเพื่อการสังเคราะห์ด้วยแสงที่สูงขึ้น (Table 2) เพื่อให้สามารถดำเนินกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงถึงจุดอิ่มตัวได้เร็วขึ้นภายใต้ทรัพยากรที่จำกัดได้ รวมถึงมีการสะสมคลอโรฟิลล์ เอ และ บีในปริมาณสูงกว่าฤดูร้อน (Table 2) ทั้งนี้ผลดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าในหญ้าทะเล *Z. muelleri* (Kumar et al., 2017) และ *Z. marina* (Park et al., 2016) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อหญ้าทะเลต้องอยู่ภายใต้ความเข้มแสงต่ำของฤดูฝนที่ยาวนาน หญ้าทะเลจะมีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสง (Light absorption) บริเวณหน่วยรับแสง (Light harvesting antenna) โดยการเพิ่มความหนาแน่นของรงควัตถุรับแสง (คลอโรฟิลล์ เอ และ บี) และเพิ่มขนาดของหน่วยรับแสงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นเหตุให้ค่า Ek ต่ำลง (Dattolo et al., 2014) ในขณะเดียวกันระบบป้องกันตัวเองจากความเข้มแสงสูง (Photoprotection) ก็มีการทำงานลดลงสังเกตุได้จากค่า NPQ การสะสมแคโรทีนอยด์ และการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในระบบแสงที่ต่ำกว่าฤดูร้อน อาจเพราะในฤดูฝนมีค่าความเข้มแสงที่ต่ำกว่าทำให้มีการสร้างอนุพันธ์ที่ว่องไวออกซิเจนอิสระ(ROS: Relative Oxygen Species) น้อยลง (Davey et al., 2018) ซึ่งลักษณะที่กล่าวมานี้ทำให้หญ้าทะเลในช่วงฤดูฝน มีความเปาะบางต่อการรับมือกับความเครียดได้ต่ำกว่าฤดูร้อนอันเนื่องมาจากทรัพยากรที่จำกัดต่อการดำรงชีวิต

นอกจากแสงแล้วปริมาณธาตุอาหารในถิ่นที่อยู่ของหญ้าทะเลก็อาจส่งผลต่อสรีรวิทยาของหญ้าทะเล *H. ovalis* โดยจากผลจากศึกษาพบว่าความเข้มข้นของไนเตรตและไนไตรท์ในท้องน้ำของเดือนมีนาคมมีค่าสูงกว่าเดือนตุลาคม แต่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ำกว่าเดือนตุลาคม (Table 1) ทั้งนี้ในช่วงเดือนมีนาคมที่มีความเข้มแสงสูงทำให้แสงไม่ใช่ปัจจัยในการดำรงชีพ หญ้าทะเลจึงสามารถดูดซึมไนเตรตและไนไตร์ทที่มีปริมาณสูงไปเพื่อ

สังเคราะห์โปรตีนภายในเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Touchette et al., 2000) เพราะการดูดซึมธาตุอาหารในรูปแบบไนเตรตและไนไตร์ทใช้พลังงานและสารตัวกลางจากการสังเคราะห์ด้วยแสงมากกว่าแอมโมเนียม (Lee et al., 2007) ในขณะที่เดือนตุลาคมที่ความเข้มแสงเฉลี่ยต่ำกว่า แต่มีปริมาณแอมโมเนียมสูงทำให้หญ้าทะเลสามารถเลือกดูดซึมแอมโมเนียมในสัดส่วนที่สูงขึ้นได้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและสารตัวกลางจากการสังเคราะห์ด้วยแสงที่มีกิจกรรมลดต่ำลง (Lee et al., 2007) อย่างไรก็ตามการนำธาตุอาหารไปใช้ของหญ้าทะเลเองก็อาจส่งผลต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในดินเช่นเดียวกัน เนื่องจากหญ้าทะเลนั้นจะสามารถดูดซึมธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้จากทั้งใบและราก (Touchette et al., 2000) และการดูดซึมและใช้ธาตุอาหารนั้นยังขึ้นอยู่กับสารประกอบตัวกลางและระดับพลังงานของเซลล์พืช ซึ่งถูกควบคุมโดยความเข้มแสงอีกต่อหนึ่ง (Touchette et al., 2000) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของฤดูกาลและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่างๆจะส่งผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งเป็นปฏิกริยาที่สำคัญที่สุดของพืชและยังส่งผลต่อไปยังการดูดซึมธาตุอาหารหลักของพืชตามพลวัตรของแสงและธาตุอาหารในระบบนิเวศขณะนั้น

สรุป

จากการผลการศึกษาหญ้าทะเลใบมะกรูด (*Halophila ovalis*) ภายใต้ผลของฤดูกาลที่มีปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ต่างกันพบว่าในฤดูร้อน (มีนาคม) หญ้าทะเลจะแสดงลักษณะการตอบสนองแบบ Sun plant คือการมีกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสง (ETRmax และ Ek) และมีการทำงานของระบบPhotoprotection (การสะสมแคโรทีนอยด์ และ NPQ) สูง ในขณะที่ฤดูฝน (ตุลาคม) ที่ความเข้มแสงต่ำกว่าจะมีการแสดงออกในการตอบสนองแบบ Shade plat คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสง (เพิ่มการสะสมคลอโรฟิลล์) เพื่อให้การสังเคราะห์ด้วยแสงยังดำเนินต่อไปได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ต่างกันของทั้งสองฤดูกาลร่วมกับการตอบสนองทางสรีรวิทยาจะพบว่าในช่วงฤดูฝนหญ้าทะเล *H. ovalis* จะมีความเปราะบางต่อการลดจำนวนของประชากรมากกว่าหากได้รับความเครียดต่างๆเสริมเข้ามา ดังนั้นค่าของการสังเคราะห์ด้วยแสงจากเทคนิค PAM fluorometry และการสะสมรงควัตถุอาจใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Biological marker) อันเป็นเครื่องมือที่จะช่วยประเมินสุขภาพเพื่อเป็นแนวทางในการอนุรักษ์ประชากรหญ้าทะเลต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการพัฒนากำลังคนทางวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) และคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สำหรับเงินทุนสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris. Plant Physiol. 58: 1–15.

Buapet, P., Low, L.J.Q., Todd, P.A. 2020. Differing photosynthetic responses to excess irradiance in the two coexisting seagrasses, Halophila ovalis and *Halophila decipiens*: Chloroplast avoidance movement, chlorophyll fluorescence, and leaf optical properties. Aquat. Bot. 166: 103268. doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103268

Dattolo, E., Ruocco, M., Brunet, C., Lorenti, M., Lauritano, C., D'esposito, D., De Luca, P., Sanges, R., Mazzuca, S., Procaccini, G. 2014. Response of the seagrass *Posidonia oceanica* to different light environments: Insights from a combined molecular and photo-physiological study. Mar. Environ. Res. 101: 225–236.

Davey, P.A., Pernice, M., Ashworth, J., Kuzhiumparambil, U., Szabó, M., Dolferus, R., Ralph, P.J. 2018. A new mechanistic understanding of light-limitation in the seagrass *Zostera muelleri*. Mar. Environ. Res. 134: 55–67.

Filippelli, G.M. 2008. The global phosphorus cycle: Past, present, and future. Elements 4: 89–95.

Kilminster, K., McMahon, K., Waycott, M., Kendrick, G.A., Scanes, P., McKenzie, L., O'Brien, K.R., Lyons, M., Ferguson, A., Maxwell, P., Glasby, T. 2015. Unravelling complexity in seagrass systems for management: Australia as a microcosm. Sci. Total Environ. 534: 97–109.

Koedsin, W., Intararuang, W., Ritchie, R.J., Huete, A. 2016. An integrated field and remote sensing method for mapping seagrass species, cover, and biomass in southern Thailand. Remote Sen. 8: 292–297.

Kumar, M., Padula, M.P., Davey, P., Pernice, M., Jiang, Z., Sablok, G., Contreras-Porcia, L., Ralph, P.J. 2017. Proteome analysis reveals extensive light stress-response reprogramming in the seagrass *Zostera muelleri* (Alismatales, Zosteraceae) metabolism. Front. Plant Sci. 7: 2023.

Lee, K.S., Park, S.R., Kim, Y.K. 2007. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: a review. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 350: 144–175.

Parsons, T.R., Maita, Y., Lalli, C.M. 1992. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press. Oxford, UK. 4: 173–177.

Park, S.R., Kim, S., Kim, Y.K., Kang, C.K., Lee, K.S. 2016. Photoacclimatory responses of zostera marina in the intertidal and subtidal zones. PLOS One. 11: e0156214. doi.org/10.1371/journal.pone.0156214

Perez, M., Romero, J. 1994. Growth dynamics, production and nutrient status of the seagrass *Cymodocea´ nodosa* in a Mediterranean semi-estuarine environment. Marine Ecology 5: 51–64.

Platt, T., Gallegos, C., Harrison, W. 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton in the Arctic. Deep-Sea Res. 29: 1159–1170.

Ralph, P.J., Durako, M.J., Enriquez, S., Collier, C.J., Doblin, M.A. 2007. Impact of light limitation on seagrasses. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 350: 176–193.

Shafer, D.J., Sherman, T.D., Wyllie-Echeverria, S. 2007. Do desiccation tolerances control the vertical distribution of intertidal seagrasses. Aqua. Bot. 87: 161–166.

Touchette, B.W., Burkholder, J.M. 2000. Review of nitrogen and phosphorus metabolism in seagrasses. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 250: 133–167.

ความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่างและความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมในพื้นที่สันทราย อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร

Diversity of undergrowths and their relationships with environmental factors in sand dune, Pathio District, Chumphon Province

โสรดา ตรีชนะ[a]*, ดอกรัก มารอด[b], สราวุธ สังข์แก้ว[b]

Sorada Treechana[a]*, Dokrak Marod[b], Sarawood Sungkaew[b]

[a]โครงการปริญญาโท สาขาวิชาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม ภาคพิเศษ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Forest Resource and Environmental Administration, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: plejapeemai2534@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายของชนิดพรรณไม้พื้นล่างและความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมบางประการ ได้แก่ ความเค็มของทราย สีของทราย ความชื้นในทราย การปกคลุมเรือนยอด ความเข้มแสง และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ ในพื้นที่สันทราย ผลการศึกษาพบพรรณไม้พื้นล่าง 50 ชนิด สามารถระบุชนิดได้ 48 ชนิด (จัดอยู่ใน 47 สกุล 34 วงศ์) ส่วนอีก 2 ชนิดไม่สามารถระบุชนิดได้ พบพรรณไม้พื้นล่างในวงศ์หญ้า Poaceae มากที่สุด ค่าดัชนีความหลากชนิด (Shannon-Wiener index) ของพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อยมีค่ามากกว่าพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก (H' = 4.23 และ 3.31 ตามลำดับ) และเมื่อวิเคราะห์การจัดลำดับชั้น พบว่าทั้งพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อยและพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก ต่างก็สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 กลุ่ม แต่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ผลจากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการจัดการพื้นที่สันทราย ให้มีการทดแทนตามธรรมชาติไปในแนวทางที่เหมาะสม

คำสำคัญ: การปกคลุมเรือนยอด, ความเข้มแสง, ความชื้นในทราย, สีของทราย

Abstract

This research aimed to study the species diversity of undergrowths and their relationships with some environmental factors (including sand salinity, sand colour, sand moisture, crown cover percentage, light intensity and the aspect of the study plots) on the sand dune. The results showed that, totally, 50 undergrowths species were found. Of these, 48 species were identifiable, belonging to 47 genera from 34 families, while the other 2 species were unidentifiable. Among those, the family Poaceae was most often found. The Shannon-Wiener index of the undergrowths in the low average rainfall period was higher than the undergrowths in the high average rainfall period (H' = 4.23 and 3.31, respectively). The results from ordination analysis showed that each of the undergrowths in the low average rainfall period and those of the high average rainfall period can be sub-divided into three groups. However, the groups were correlated to the environmental factors differently. The results from this study will be useful for the sand dune management program in order to achieve an appropriate sere of natural succession.

Keywords: crown cover, light intensity, sand color, sand moisture

คำนำ

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ทำให้เกิดความหลากชนิดของพรรณไม้ เนื่องจากพรรณไม้แต่ละชนิดมีความต้องการปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ต่างกัน เพราะมีช่วงความทนทานต่อสภาพทางนิเวศวิทยา (amplitude of tolerance) ที่จะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสังคมนั้นๆ แตกต่างกัน ปัจจัยสิ่งแวดล้อมยังมีบทบาทสำคัญในการสร้างสภาพถิ่นที่อยู่อาศัยตามความต้องการของพรรณไม้ โดยเฉพาะปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศ และความสมบูรณ์ของดิน รวมไปถึงการถูกทำลายจากสัตว์หรือพืชด้วยกัน หรือเกิดจากภัยธรรมชาติ (ดอกรัก และอุทิศ, 2552) ทั้งนี้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมจึงมีบทบาทสำคัญในการจำแนกความหลากชนิด (species diversity) ของแต่ละพื้นที่หรือประเภทป่าต่างๆ

สันทรายบางเบิดเป็นสันทรายรูปตัวยู ที่เกิดจากลมพายุในทะเลพัดเอาทรายจากชายหาดขึ้นไปกองสะสมเป็นสันทรายยาวติดต่อกัน เม็ดทรายที่อยู่บนสันทรายจึงมีความละเอียดกว่าเม็ดทรายบริเวณชายหาด ลักษณะภูมิประเทศสูงๆ ต่ำๆ สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 30 เมตร ยาว 10 กิโลเมตร เนื่องจากพื้นที่สันทรายเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นยาก มีลักษณะเฉพาะ และมีความเปราะบาง ต้องอาศัยความเหมาะสมของสภาพพื้นที่และปัจจัยสิ่งแวดล้อม (สมศักดิ์, 2557; จักรพงษ์, 2558) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน คือ เปิดเป็นแหล่งท่องเที่ยวและนันทนาการ โดยนิวัติ (2542) กล่าวไว้ว่า สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติมีอิทธิพลเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์เป็นอันมาก มนุษย์เองก็มีอิทธิพลทำให้ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมต้องเปลี่ยนแปลงไป ที่ใดก็ตามที่มนุษย์เข้าไปถึง สิ่งแวดล้อมที่นั่นก็จะถูกเปลี่ยนแปลงเสมอ ซึ่งการสำรวจความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่างและความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการจัดการพื้นที่สันทรายและพรรณไม้พื้นล่าง ให้มีการทดแทนตามธรรมชาติไปในแนวทางที่เหมาะสม เนื่องจากพรรณไม้พื้นล่างมีความสำคัญต่อระบบนิเวศเป็นอันมากโดยเป็นผู้ผลิตในระบบนิเวศ ที่มีการเจริญเติบโตเร็วจึงสามารถยึดครองพื้นที่ได้ก่อน ลดการกัดเซาะพังทลายของหน้าดิน (อัจฉรา และคณะ, 2556) จึงช่วยให้เกิดการสะสมทรายและสร้างความมั่นคงแก่สันทรายให้ยั่งยืนต่อไป ซึ่งสันทรายนั้นเป็นกันชนทางธรรมชาติที่ดีที่สุด ในการป้องกันภัยพิบัติชายฝั่งทะเล เช่น น้ำท่วมพื้นที่ชายฝั่งทะเล ลดคลื่นลมซัดฝั่ง และพายุเคลื่อนขึ้นฝั่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

การวางแปลงตัวอย่าง

คัดเลือกบริเวณที่เป็นตัวแทนที่ดีเพื่อสร้างแปลงถาวรบริเวณแนวสันทรายบางเบิด โดยมีหลักเกณฑ์ คือ มีระยะทางจากจุดเริ่มต้นบริเวณด้านหน้าลม (windward) ที่ติดกับทะเลสูงขึ้นไปจนถึงยอดของสันทราย ต้องมีระยะทางใกล้เคียงกับความยาวของสันทรายด้านหลังลม (leeward) และมีการรบกวนของมนุษย์ไม่มากนักเพื่อเป็นพื้นที่ตัวอย่างในการศึกษา ทำการวางแปลงตัวอย่างถาวรแบบแถบ (permanent belt transects) จากการศึกษาวิจัยมาแล้วโดย จักรพงษ์ (2558) โดยขนาดแปลง ขนาด 10×100 เมตร ทั้งหมดจำนวน 3 แนวสำรวจ แต่ละแนวสำรวจมีระยะห่างกันเท่ากับ 300 เมตร ในแต่ละแนวสำรวจทำการแบ่งเป็นแปลงย่อยขนาด 10×10 เมตร เป็นจำนวน 10 แปลง (ด้านหน้าลม จำนวน 5 แปลง และด้านหลังลม จำนวน 5 แปลง) และวางแปลงสำรวจพรรณไม้พื้นล่างขนาด 1×1 เมตร มุมล่างซ้ายและมุมขวาบนของแต่ละแปลงย่อย เพื่อสำรวจพรรณไม้พื้นล่างและปัจจัยสิ่งแวดล้อม

การสำรวจความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่าง

การสำรวจพรรณไม้พื้นล่าง คือ กล้าไม้หรือพืชทุกชนิด รวมทั้งหญ้า กก และอื่นๆ มีความสูงไม่เกิน 50 เซนติเมตร ด้วยการติดหมายเลขต้นไม้ด้วยป้ายชื่อพลาสติก พร้อมทั้งจำแนกชนิดของต้นไม้ทุกต้น ระบุจำนวนโดยการนับเป็นจำนวนต้นที่พบในแปลงตัวอย่าง พรรณไม้ที่ไม่สามารถจำแนกชนิดได้ ทำการเก็บตัวอย่างพันธุ์ไม้แห้งเพื่อนำมาจำแนกชนิด พร้อมตรวจสอบรายชื่อพรรณไม้ตามการระบุชนิดของ เต็ม (2557) และทำการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง คือ เดือนธันวาคม ซึ่งเป็นตัวแทนในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อย และเดือนกันยายน ซึ่งเป็นตัวแทนในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก เฉลี่ยในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2524–2553) ของสถานีตรวจอากาศจังหวัดชุมพร โดยสถานีตรวจอากาศจังหวัดชุมพรมีระยะห่างกับพื้นที่วิจัยประมาณ 86 กิโลเมตร

การเก็บข้อมูลปัจจัยสิ่งแวดล้อม

เก็บตัวอย่างทรายที่ระดับผิวดิน จนถึงความลึก 10 เซนติเมตร โดยเก็บตัวอย่างทรายบริเวณกึ่งกลาง และทุกมุมของแปลงสำรวจพรรณไม้พื้นล่าง (รวมจุดเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 5 จุดต่อแปลงสำรวจ) เพื่อเทียบสีของทรายโดยการเทียบตัวอย่างกับสมุดเทียบสีดิน และค่าความเค็มของทรายโดยใช้สมการของ Leksungnoen et al., (2018)

ความชื้นในทราย ทำการวัดความชื้นด้วยเครื่องมือวัดความชื้นในดินที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร โดยวัดบริเวณกึ่งกลางของแปลงสำรวจพรรณไม้พื้นล่าง

ความเข้มแสงของแปลงสำรวจพรรณไม้พื้นล่าง ทำการวัดความเข้มแสงด้วย Lux meter ที่ความสูงจากพื้นดิน 80 เซนติเมตร บริเวณกึ่งกลาง และทุกมุมของแปลงสำรวจพรรณไม้พื้นล่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแต่ละแปลง

ทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ ทำการวัดทิศด้านลาดของแปลงสำรวจด้วยเข็มทิศโดยชี้เข็มทิศไปในทิศทางตามความลาดของแปลงสำรวจและอ่านค่าทิศ

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าดัชนีความหลากชนิดในแต่ละรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย โดยใช้ Shannon-Weiner index จากสูตรของ (Shannon-Wiener ,1949; อ้างโดย คณาจารย์ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้, 2550) คือ $H' = -\sum_{i=1}^{s} (pi \ln pi)$ สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่างกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมบางประการ ได้แก่ ความเค็มของทราย สีของทราย ความชื้นในทราย การปกคลุมเรือนยอด ความเข้มแสง และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ ด้วยการวิเคราะห์การจัดลำดับชั้น (Ordination analysis) โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Canonical Correspondence Analysis (CCA) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป PC-ORD Version 6 for Window

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความหลากชนิดของพรรณไม้พื้นล่าง

จากการสำรวจพรรณไม้พื้นล่างบนสันทรายบางเบิด อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร ในเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นตัวแทนของรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อย และเดือนกันยายน ซึ่งเป็นตัวแทนของรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก พบพรรณไม้พื้นล่าง 50 ชนิด สามารถระบุชนิดได้ 48 ชนิด และไม่สามารถระบุชนิดได้ 2 ชนิด พรรณไม้ที่สามารถระบุชนิดได้สามารถจัดอยู่ใน 47 สกุล 34 วงศ์ ในจำนวนนี้พบพรรณไม้พื้นล่างในวงศ์หญ้า (Poaceae หรือ Gramineae)

มากที่สุด จำนวน 5 ชนิด รองลงมา คือ วงศ์ถั่ว (Fabaceae) และวงศ์เงาะ (Sapindaceae) พบวงศ์ละ 3 ชนิด พบวงศ์ละ 2 ชนิด จำนวน 8 วงศ์ และพบวงศ์ละ 1 ชนิด จำนวน 23 วงศ์ เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่าง พบว่า พรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อย (H'=4.23) มีค่ามากกว่าในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก (H'=3.31)

ความสัมพันธ์ระหว่างความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่างกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม

ผลการจัดลำดับของพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมากและน้อย โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธี CCA พบว่า ปัจจัยสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลต่อความหลากหลายของพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อย (low average rainfall period) จากการวิเคราะห์ค่า Eigenvalues ของ แกน 1 (Axis 1) แกน 2 (Axis 2) และแกน 3 (Axis 3) เท่ากับ 0.824, 0.324 และ 0.209 ตามลำดับ ค่าความสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson Correlation ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับพรรณไม้พื้นล่างอยู่ระดับสูงในแกน 1 (Axis 1) มีค่า 0.927 และแกน 2 (Axis 2) มีค่า 0.714 (Table 1) ดังนั้น การใช้ผลการวิเคราะห์แกน 1 และแกน 2 จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้อธิบายปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์กับพรรณไม้พื้นล่าง ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ Monte Carlo permutation test พบว่า ปัจจัยสิ่งแวดล้อม 5 ปัจจัยได้แก่ สีของทราย ความชื้นในทราย การปกคลุมเรือนยอด ความเข้มแสง และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ มีความสัมพันธ์กับพรรณไม้พื้นล่าง 44 ชนิด ได้แก่ หญ้าพุ่งชู้ (*Chrysopogon orientalis*) เขากวาง (*Mischocarpus sundaicus*) หญ้าไหวทาม (*Ischaemum muticum*) มะนาวผี (*Atalantia monophylla*) แกลบหนู (*Dendrolobium lanceolatum*) ช้างน้าว (*Ochna integerrima*) หญ้ากาบหอย (*Cyanotis vaga*) เตยทะเล (*Pandanus odorifer*) กกชายหาด (*Fimbristylis sericea*) ปลาไหลเผือก (*Phyllanthus acutissimus*) กระแตไต่ไม้ (*Drynaria quercifolia*) ผักบุ้งทะเล (*Ipomoea pes-caprae*) นางจุ่ม (*Cansjera rheedei*) ถอบแถบเครือ (*Connarus semidecandrus*) กกลำซ้อนใบ (*Cyperus radians*) ตานซ่าน (*Schizaea dichotoma*) รสสุคนธ์ขาว (*Tetracera loureireii*) ตานขโมย (*Allophylus cobbe*) รักทะเล (*Scaevola taccada*) หัสคุณ (*Clausena excavate*) เข็มทอง (*Gardneria ovata*) เสม็ดชุน (*Syzygium antisepticum*) น้ำใจใคร่ (*Olax psittacorum*) เมา (*Gmelina arborea*) มะหวด (*Lepisanthes rubiginosa*) หญ้าหนูต้น (*Dianella ensifoli*) ชะมวง (*Garcinia cowa*) จั่นดิน (*Asparagus racemosus*) เป็นต้น โดยปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลักที่กำหนดการจัดลำดับของพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อย คือ การปกคลุมเรือนยอด

Table 1 Summary table of statistical analysis for CCA during the low average rainfall period

	Monte Carlo test		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3
CCA			
Eigenvalue	0.824	0.324	0.209
Variance explained (%)	8.4	3.3	2.1
Cumulative explained (%)	8.4	11.7	13.9
Pearson Correlation (Species-Environment)	0.927	0.714	0.959
Kendall (Rank) correlation (Species-Environment)	0.692	0.560	0.432

Note: Cumulative variance in species data (p = 0.01)

จาก Fig. 1 สามารถแบ่งกลุ่มพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อย ออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย

1) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่มีความสัมพันธ์กับการปกคลุมเรือนยอด ความชื้นในทราย และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ กล่าวคือ เป็นพรรณไม้พื้นล่างที่ขึ้นได้ในพื้นที่ที่มีการปกคลุมเรือนยอดสูง ความชื้นที่ค่อนข้างสูงกว่าในพื้นที่โล่งแจ้ง และทิศด้านลาดของแปลงเป็นทิศที่ส่วนใหญ่รับแสงได้ดี คือแปลงที่หันไปในทิศตะวันตกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ ได้แก่ เขากวาง (*Mischocarpus sundaicus*, MISU) มะนาวผี (*Atalantia monophylla*, ATMO) ช้างน้าว (*Ochna integerrima*, OCIN) เตยทะเล (*Pandanus odorifer*, PAOD) ปลาไหลเผือก (*Phyllanthus acutissimus*, PHAC) กระแตไต่ไม้ (*Drynaria quercifolia*, DRQU) นางจุ่ม (*Cansjera rheedei*, CARH) ถอบแถบเครือ (*Connarus semidecandrus*, COSE) ตานซ่าน (*Schizaea dichotoma*, SCDI) เป็นต้น

2) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับสีของทราย และความเข้มแสง กล่าวคือ เป็นพรรณไม้พื้นล่างที่ชอบแสงและเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ ได้แก่ หญ้าพุ่งชู้ (*Chrysopogon orientalis*, CHOR) กกชายหาด (*Fimbristylis sericea*, FISE) แกลบหนู (*Dendrolobium lanceolatum*, DELA) หญ้ากาบหอย (*Cyanotis vaga*, CYVA) หยีทะเล (*Derris indica*, DEIN) เป็นต้น

3) พรรณไม้พื้นล่างที่มักพบกระจายทั่วไป (generalist species) ซึ่งการแสดงผลของกราฟ (Fig. 1) พบกระจายไม่สัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมใดๆ ได้แก่ หญ้าไหวทาม (*Ischaemum muticum*, ISMU) ผักบุ้งทะเล (*Ipomoea pes-caprae*, IPPE) กกลำซ้อนใบ (*Cyperus radians*, CYRA) รสสุคนธ์ขาว (*Tetracera loureireii*, TELO) รักทะเล (*Scaevola taccada*, SCTA) เมา (*Ixora cibdela*, GMAR) จั่นดิน (*Asparagus racemosus*, ASRA) เป็นต้น

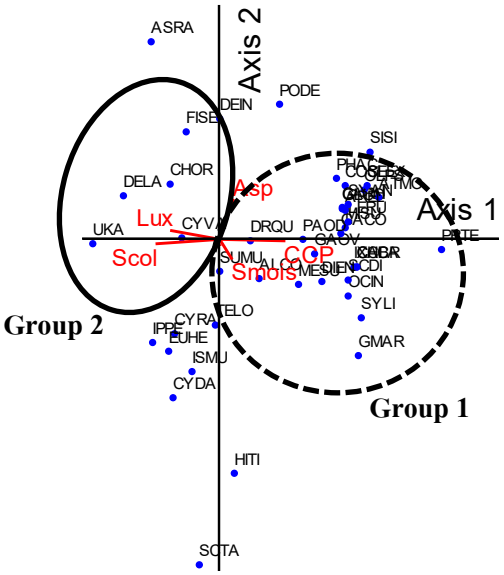


Fig. 1 Canonical correspondence analysis CCA diagram of species diversity on undergrowth. (The low average rainfall period)

ในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก (high average rainfall period) จากการวิเคราะห์ CCA พบว่า มีค่า Eigenvalues ของ แกน 1 (Axis 1) แกน 2 (Axis 2) และแกน 3 (Axis 3) เท่ากับ 0.735, 0.430 และ 0.330 ตามลำดับ ค่าความสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson Correlation ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับพรรณไม้พื้นล่างอยู่ระดับสูงในแกน 1 (Axis 1) มีค่า 0. 898 และแกน 2 (Axis 2) มีค่า 0.796 (Table 2) ดังนั้น การใช้ผลการวิเคราะห์แกน

1 และแกน 2 จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้อธิบายปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์กับพรรณไม้พื้นล่าง ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ Monte Carlo permutation test พบว่า ปัจจัยสิ่งแวดล้อม 6 ปัจจัย ได้แก่ ความเค็มของทราย สีของทราย ความชื้นในทราย การปกคลุมเรือนยอด ความเข้มแสง และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ มีความสัมพันธ์กับพรรณไม้พื้นล่าง 39 ชนิด ได้แก่ หญ้าพุ่งชู้ (*Chrysopogon orientalis*) มะนาวผี (*Atalantia monophylla*) หญ้าไหวทาม (*Ischaemum muticum*) ผักบุ้งทะเล (*Ipomoea pescaprae*) เขากวาง (*Mischocarpus sundaicus*) เตยทะเล (*Pandanus odorifer*) กกชายหาด (*Fimbristylis sericea*) ยายแพก (*Phymatosorus scolopendria*) รสสุคนธ์ขาว (*Tetracera loureireii*) กกลำซ้อนใบ (*Cyperus radians*) ช้างน้าว (*Ochna integerrima*) หัสคุณ (*Clausena excavate*) รักทะเล (*Scaevola taccada*) ถอบแถบเครือ (*Connarus semidecandrus*) หญ้ากาบหอย (*Cyanotis vaga*) เมา (*Gmelina arborea*) ปลาไหลเผือก (*Phyllanthus acutissimus*) เข็มทอง (*Gardneria ovata*) เสม็ดชุน (*Syzygium antisepticum*) มะค่าแต้ (*Sindora siamensis*) ขวาด (*Syzygium lineatum*) ตานซ่าน (*Schizaea dichotoma*) กุ๊ก (*Lannea coromandelica*) แกลบหนู (*Dendrolobium lanceolatum*) นางจุ่ม (*Cansjera rheede*)*i* หญ้าหนูต้น (*Dianella ensifoli*) เป็นต้น โดยปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลักที่กำหนดการจัดลำดับของพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก คือ การปกคลุมเรือนยอด

Table 2 Summary table of statistical analysis for CCA during the low average rainfall period

	Monte Carlo test		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3
CCA			
Eigenvalue	**0.735**	**0.430**	**0.330**
variance explained (%)	5.7	3.3	2.6
Cumulative explained (%)	5.7	9.1	**11.6**
Pearson Correlation (Species-Environment)	0.898	0.796	0.796
Kendall (Rank) correlation (Species-Environment)	0.710	0.452	0.385

Note: Cumulative variance in species data (p = .01)

จาก Fig. 2 สามารถแบ่งกลุ่มพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก ออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย

1) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปกคลุมเรือนยอด ความชื้นในทราย และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ กล่าวคือ เป็นพรรณไม้พื้นล่างที่ขึ้นได้ในพื้นที่ที่มีการปกคลุมเรือนยอดสูง ความชื้นที่ค่อนข้างสูงกว่าในพื้นที่โล่งแจ้ง และทิศด้านลาดของแปลงเป็นทิศที่ส่วนใหญ่รับแสงได้ดี คือแปลงที่หันไปในทิศตะวันตกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ ได้แก่ มะนาวผี (*Atalantia monophylla*,ATMO) เขากวาง (*Mischocarpus sundaicus*, MISU) ยายแพก (*Phymatosorus scolopendria*, PHSC) หัสคุณ (*Clausena excavate*, CLEX) เสม็ดชุน (*Syzygium antisepticum*, SYAN) มะค่าแต้ (*Sindora siamensis*, SISI) เป็นต้น

2) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับสีของทราย ความเค็มของทราย และความเข้มแสง กล่าวคือ เป็นพรรณไม้พื้นล่างที่ชอบแสงและความเค็มของทราย และเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุ

ต่ำ ได้แก่ หญ้าพุ่งชู้ (*Chrysopogon orientalis*, CHOR) หญ้าไหวทาม (*Ischaemum muticum*, ISMU) กกชายหาด (*Fimbristylis sericea*, FISE) รสสุคนธ์ขาว (*Tetracera loureireii*, TELO) หญ้าหนูต้น (*Dianella ensifoli*, DIEN) เป็นต้น

3) พรรณไม้พื้นล่างที่มักพบกระจายทั่วไป (generalist species) ซึ่งการแสดงผลของกราฟ (Fig. 2) พบกระจายไม่สัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมใดๆ ได้แก่ ผักบุ้งทะเล (*Ipomoea pes-caprae*, IPPE) เตยทะเล (*Pandanus odorifer*, PAOD) กกลำซ้อนใบ (*Cyperus radians*, CYRA) ช้างน้าว (*Ochna integerrima*, OCIN) หญ้ากาบหอย (*Cyanotis vaga*, CYVA) เมา (*Gmelina arborea*, GMAR) ปลาไหลเผือก (*Phyllanthus acutissimus*, PHAC) เข็มทอง (*Gardneria ovata*, GAOV) เป็นต้น

จากผลการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการปรากฏของพรรณไม้พื้นล่าง โดยมีปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันในพรรณไม้พื้นล่างกลุ่มที่ 2 กล่าวคือ ในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมากมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเค็มของทรายเพิ่มเติมจากในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อยที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสีของทรายและความเข้มแสงเท่านั้น จึงทำให้พรรณไม้พื้นล่างบางชนิดย้ายกลุ่มระหว่าง กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่ 2 และ 3 ได้แก่ หญ้ากาบหอย (*Cyanotis vaga*, CYVA) ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 ที่ตอบสนองต่อสีของทราย และความเข้มแสง ในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อย แต่ในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมากย้ายไปกลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่ 3 ที่ไม่สัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมใดๆ เนื่องจากพรรณไม้พื้นล่างกลุ่มที่ 2 ในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมากตอบสนองต่อปัจจัยความเค็มของทราย ซึ่งหญ้ากาบหอยอาจเป็นพรรณไม้ที่ไม่ทนต่อความเค็มของทรายจึงทำให้เกิดการย้ายกลุ่ม

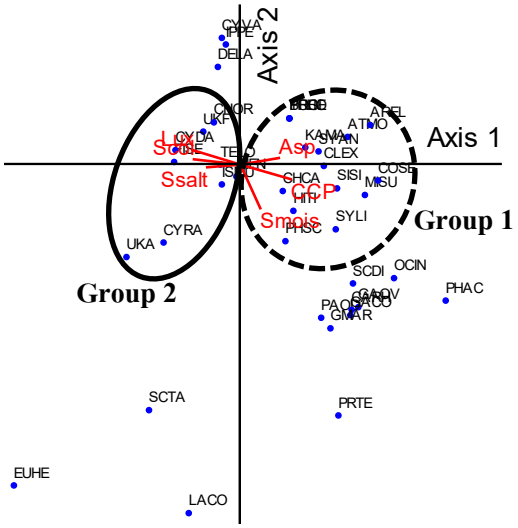


Fig. 2 Canonical correspondence analysis CCA diagram of species diversity on undergrowth. (The high average rainfall period)

สรุป

ผลการศึกษาพบพรรณไม้พื้นล่าง ไม้พื้นล่าง 50 ชนิด สามารถระบุชนิดได้ 48 ชนิด (จัดอยู่ใน 47 สกุล 34 วงศ์) ส่วนอีก 2 ชนิดไม่สามารถระบุชนิดได้ พบพรรณไม้พื้นล่างในวงศ์หญ้า Poaceae มากที่สุด ดัชนีความหลากหลาย (Shannon-Wiener index) ของพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อยมีค่ามากกว่าพรรณไม้พื้นล่างในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก (H' = 4.23 และ 3.31 ตามลำดับ) และเมื่อวิเคราะห์การจัดลำดับชั้น พบว่าในรอบ

ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อยสามารถแบ่งพรรณไม้พื้นล่างได้ออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่มีความสัมพันธ์กับการปกคลุมเรือนยอด ความชื้นในทราย และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ 2) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับสีของทราย และความเข้มแสง 3) พรรณไม้พื้นล่างที่มักพบกระจายทั่วไปไม่สัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมใดๆ และในรอบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมาก สามารถแบ่งพรรณไม้พื้นล่างได้ออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปกคลุมเรือนยอด ความชื้นในทราย และทิศด้านลาดของแปลงสำรวจ 2) กลุ่มพรรณไม้พื้นล่างที่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับสีของทราย ความเค็มของทราย และความเข้มแสง 3) พรรณไม้พื้นล่างที่มักพบกระจายทั่วไป โดยไม่สัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมใดๆ ผลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการจัดการพื้นที่สันทราย ให้มีการทดแทนตามธรรมชาติไปในแนวทางที่เหมาะสม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากการเปิดเป็นแหล่งท่องเที่ยวและนันทนาการจนทำให้ทรัพยากรในพื้นที่สันทรายเกิดความเสื่อมโทรม

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. สุธีระ เหิมฮึก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการวิเคราะห์การจัดลำดับชั้นโดยใช้การวิเคราะห์แบบ Canonical Correspondence Analysis (CCA) ขอขอบคุณนายเสกสรร ไกรทองสุข ที่ให้ความช่วยเหลือในการจำแนกชนิดพรรณไม้ และขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนที่สนับสนุนการเก็บข้อมูลภาคสนามจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

คณาจารย์ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้. 2550. นิเวศวิทยาป่าไม้ภาคสนาม. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จักรพงษ์ ทองสวี. 2558. การทดแทนแบบปฐมภูมิบนสันทรายบางเบิด อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร. วทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดอกรัก มารอด, อุทิศ กุฏอินทร์. 2552. นิเวศวิทยาป่าไม้. โรงพิมพ์อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ

นิวัติ เรืองพานิช. 2542. การอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งและล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 3. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เต็ม สมิตินันท์. 2557. ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย เต็ม สมิตินันทน์ ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2557. กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วัฒนปฤดา. 2557. รายงานวิชาการ ฉบับที่ สธส 2/2557 การใช้องค์ความรู้ธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมชายฝั่งและธรณีวิทยาทางทะเล เพื่อลดผลกระทบธรณีพิบัติภัยในพื้นที่ชายฝั่งและพัฒนาคุณภาพชีวิตประชาชน. สำนักธรณีสิ่งแวดล้อม, กรมทรัพยากรธรณี.

อัจฉา ตีระวัฒนานนท์, ภานุมาศ จันทร์สุวรรณ, สราวุธ สังข์แก้ว. 2556. พรรณไม้พื้นล่าง. บริษัท ไอติแอดเวิร์ไทซิ่ง, กรุงเทพฯ.

Leksungnoen, N., Andriyas, T., Andriyas, S. 2018. EC_e prediction from $EC_{1:5}$ in inland salt-affected soils collected from Khorat and Sakhon Nakhon basins, Thailand. Commun. Soil Sci. Plan. 49: 2627–2637.

รูปแบบกิจกรรมและการซ้อนทับในเชิงเวลาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

Activity pattern and temporal overlap of carnivorous mammal species in Khao Yai National Park

พนิตสุภา บั้งทอง, นรเศรษฐ์ เขียวศรี, มนันยา พลาอาด, รองลาภ สุขมาสรวง*

Phanitsupha Bangthong, Noraset Khiwosree, Mananya Pla-ard, Ronglarp Sukmasuang*

ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Biology, Faculty of Forestry Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding Author. E-mail: mronglarp@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษารูปแบบกิจกรรมและการซ้อนทับในเชิงเวลาของสัตว์ป่ากินเนื้อในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ดำเนินการระหว่างเดือนธันวาคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2563 ด้วยการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพในพื้นที่รวมจำนวน 72 ตำแหน่ง จำนวน 4,500 กับดักคืน พบสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อรวม 7 ชนิด วิเคราะห์รูปแบบกิจกรรมของสัตว์ป่ากินเนื้อที่อาศัยในพื้นที่เดียวกัน โดยใช้ Overlap Package ในโปรแกรม R เพื่อทดสอบสมมุติฐานของการหลบเลี่ยงกันในเชิงเวลาของสัตว์ป่ากินเนื้อหลายชนิดที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เดียวกัน พบว่า สามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่มีกิจกรรมในเวลากลางวันเป็นส่วนใหญ่ คือ หมาใน กลุ่มที่มีกิจกรรมส่วนใหญ่ในช่วงเวลากลางคืน ได้แก่ หมูหริ่ง และหมาจิ้งจอก และกลุ่มที่มีกิจกรรมในช่วงเวลากลางคืน ได้แก่ อีเห็นธรรมดา ชะมดแผงหางปล้อง ชะมดแผงสันหางดำ และแมวดาว ซึ่งเสนอแนะให้มีการจัดการกิจกรรมการท่องเที่ยว การหลีกเลี่ยงการเดินทางในพื้นที่โดยเฉพาะในเวลากลางคืน การจัดการพื้นที่อาศัย เพื่อการฟื้นฟูประชากรสัตว์ป่าที่เป็นเหยื่อของสัตว์ป่ากินเนื้อในพื้นที่ต่อไป

คำสำคัญ: กล้องดักถ่ายภาพ, การซ้อนทับในเชิงเวลา, รูปแบบกิจกรรม, อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

Abstract

A study of activity patterns and temporal overlap of carnivorous mammal species in Khao Yai National Park was operated between December 2017 and March 2020. Camera trap techniques was used with a total of 4,500 trap nights, 72 camera trap locations. Seven species of carnivorous mammals were photographically recorded. The results of analyzing the activity patterns of the wild animals by Overlap Package in the R program to test the hypothesis of the temporal avoidance of various carnivorous wildlife in the same area were found to be divided into three groups. These were those with mostly diurnal activity: dhole. The most nocturnal activity patterns were found in two groups: hog badger and Asiatic jackal and the group with strongly nocturnal activity patterns were: common palm civet, large Indian civet, large spotted civet and leopard cat. Recommendations for conservation management include tourism activities management, traveling in the area, especially at night, habitat management for further rehabilitation of prey species in the area.

Keywords: activity pattern, Camera trap, Khao Yai National Park, temporal overlap

คำนำ

สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อ จัดว่าที่มีความสำคัญในระบบนิเวศ เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งสูงสุดของระบบห่วงโซ่อาหาร (Ripple et al., 2014) ในการควบคุมประชากรของสัตว์ป่าที่เป็นเหยื่อในธรรมชาติ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อบางชนิดสามารถกินอาหารได้หลากหลายทั้งพืชและสัตว์ จึงทำให้มีบทบาทช่วยกระจายเมล็ดพันธุ์พืชได้อีกด้วย วัตถุประสงค์ในการศึกษา เพื่อศึกษาชนิด และรูปแบบกิจกรรมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อ ซึ่งเป็นสัตว์ที่หากินในเวลากลางคืนเป็นส่วนใหญ่ การสำรวจโดยการพบเห็นตัวโดยตรงจึงเป็นไปได้ยาก การใช้กล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่าจึงมีความเหมาะสมในการศึกษา เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ส่งผลกระทบกับสัตว์มากนัก (Lucherini et al., 2009) อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่จัดเป็นที่ที่มีความหลากหลายทางธรรมชาติที่สำคัญ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่มรดกโลก (Jenks et al., 2011) หากมีการศึกษาสัตว์ป่าอย่างต่อเนื่องทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญไม่ว่าจะเป็นข้อมูลความหลากชนิดของสัตว์ป่า ช่วงเวลาทำกิจกรรม พื้นที่อยู่อาศัย เป็นต้น ซึ่งนั่นถือเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการอนุรักษ์สัตว์ป่า (Jiménez et al., 2010) สามารถนำมาวางแผนจัดการพื้นที่อยู่อาศัยของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อ รวมไปถึงสัตว์ป่าชนิดอื่นได้อีกด้วย นอกจากนั้นยังสามารถนำไปใช้วางแผนการลาดตระเวนเพื่อการอนุรักษ์ ใช้เป็นข้อมูลประชาสัมพันธ์ให้เห็นถึงคุณค่า ความสำคัญของพื้นที่ และการศึกษาวิจัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ตั้งอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 14°22′55″เหนือ 101°25′54″ตะวันออก มีเนื้อที่ประมาณ 2,165.55 ตร.กม. (1,353,471.53 ไร่) (สำนักอุทยานแห่งชาติ, 2563) อยู่ทางด้านทิศตะวันตกของเทือกเขาพนมดงรัก สภาพป่าส่วนใหญ่เป็นป่าดิบแล้งป่าดิบชื้นและป่าดิบเขา นอกจากนี้ยังมีป่าเบญจพรรณและทุ่งหญ้าจากการทำไร่หมุนเวียนในอดีต ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์มีกระดูกสันหลังมากกว่า 800 ชนิด ประกอบด้วยสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 112 ชนิด นก 392 ชนิดและสัตว์เลื้อยคลานและสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำมากกว่า 200 ชนิด ในจำนวนนี้มีสัตว์ใกล้สูญพันธุ์ 4 ชนิด สัตว์ที่อยู่ในข่ายใกล้สูญพันธุ์ 19 ชนิด และสัตว์ใกล้สูญพันธุ์ขั้นวิกฤต 1 ชนิด (UNESCO, 2021) จึงได้รับการประกาศเป็น พื้นที่มรดกโลกทางธรรมชาติ จากองค์การยูเนสโก ในปี 2548 ภายใต้ชื่อผืนป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ ร่วมกับพื้นที่อนุรักษ์อีก 4 แห่ง คือ อุทยานแห่งชาติทับลาน อุทยานแห่งชาติปางสีดา อุทยานแห่งชาติตาพระยา และเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าดงใหญ่ (ส่วนจัดการท่องเที่ยวและนันทนาการ สำนักอุทยานแห่งชาติ, 2560) อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีประมาณ 23 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปีวัดได้ 2,270 มิลลิเมตร (สำนักอุทยานแห่งชาติ, 2563) (Fig.1)

อุปกรณ์

1. กล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่า (camera trap)
2. การ์ดบันทึกภาพ (Memory card)
3. เครื่องหาพิกัดภูมิศาสตร์ (GPS receiver)

4. คอมพิวเตอร์

5. แบบฟอร์มบันทึกข้อมูล

วิธีการ

1. เลือกตำแหน่งติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่า พิจารณาจากความเหมาะสมในแต่ละสภาพพื้นที่ เช่น เลือกพื้นที่ที่พบร่องรอยของสัตว์ เส้นทางด่านสัตว์ เป็นต้น ทำการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่าให้สูงจากพื้นประมาณ 30–50 เซนติเมตร (Jansen et al., 2014)

2. กำหนดให้กล้องถ่ายภาพ 3 ภาพทุกๆ 10 วินาที ตลอด 24 ชั่วโมง โดยตั้งกล้องไว้ประมาณ 30 วัน โดยในแต่ละตำแหน่งของกล้องให้บันทึกค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ ด้วย GPS บันทึกวันและเวลาที่ทำการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพ เมื่อครบกำหนดที่ต้องทำการเก็บกล้องดักถ่ายภาพ เก็บกล้องและนำการ์ดบันทึกภาพออกจากตัวกล้อง เก็บกล้องเพื่อนำไปตั้งจุดถัดไป (Jansen et al., 2014) ดำเนินการระหว่างเดือนธันวาคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2563 โดยการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพจำนวน 72 ตำแหน่ง

3. จำแนกชนิดสัตว์ที่ได้จากกล้องดักถ่ายภาพ ใช้ชื่อสามัญ และชื่อวิทยาศาสตร์ ยึดชื่อตามจอห์น พาร์ (2553) จากหนังสือคู่มือสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในประเทศไทย (ฉบับปรับปรุง) เฉพาะรูปที่สามารถจำแนกชนิดได้ชัดเจนมีวันที่ เวลา แสดงอยู่บนภาพถ่าย โดยจะดูตามเกณฑ์ของ O'Brien, Kinnaird, and Wibisono (2003) ที่ใช้ในการจำแนกภาพสัตว์ป่าที่เป็นอิสระต่อกัน คือ 1) ภาพที่ไม่ต่อเนื่องกัน เช่น ภาพที่ถ่ายได้หลังจากที่ถ่ายชนิดอื่นแล้ว 2) ภาพที่ต่อเนื่องกันของสัตว์ตัวเดียวกันในชนิดเดียวกัน โดยมีช่วงเวลาห่างกันมากกว่า 30 นาที 3) ภาพที่ต่อเนื่องกัน อาจเป็นสัตว์ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน (Saisamorn et al., 2019; จิตติมา, 2561)

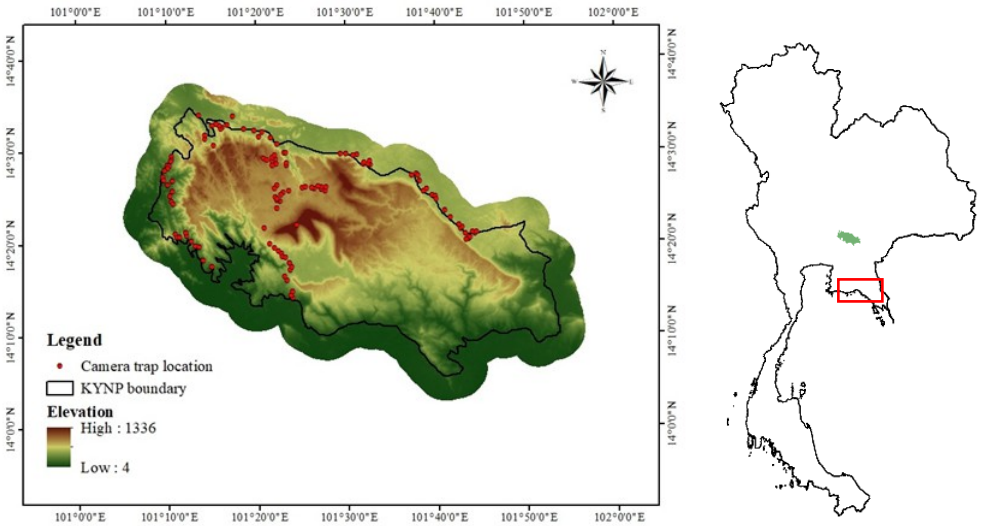


Fig. 1 The location of camera traps in Khao Yai National Park during the study period between December 2017–March 2020

4. การวิเคราะห์ช่วงเวลาทำกิจกรรมด้วยข้อมูลจากกล้องดักถ่ายภาพ โดยวิเคราะห์เฉพาะสัตว์กินเนื้อที่มีจำนวนภาพถ่ายเท่ากับหรือมากกว่า 10 ภาพ กำหนดรูปแบบกิจกรรมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อเป็นช่วงเวลา

กลางวัน ระหว่างเวลา 06:01–17.59 น. และช่วงเวลากลางคืน ระหว่าง 18:00–06:00 น. (Lynam et al., 2013) จากนั้นทำการจำแนกช่วงเวลากิจกรรมของสัตว์แต่ละชนิด ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์โดยใช้สูตรคำนวณตาม Equation 1

เปอร์เซ็นต์ของช่วงเวลากิจกรรม = [(A or B)/A+B]× 100 (1)

เมื่อ A คือ ความถี่ของช่วงเวลากิจกรรมในตอนกลางวัน
B คือ ความถี่ของช่วงเวลากิจกรรมในตอนกลางคืน

นำค่าเปอร์เซ็นต์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกันระหว่างช่วงเวลากิจกรรมในตอนกลางวัน และตอนกลางคืน โดยแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม (Lynam et al., 2013; Schaik and Griffiths, 1996) ได้ดังนี้ Strongly nocturnal (จัดเป็นกลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมในตอนกลางคืน ≥ 85%) Mostly nocturnal (กลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมส่วนใหญ่ในตอนกลางคืน 61–84%) Cathemeral (กลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมระหว่างกลางวันและกลางคืน 40–60%) Mostly diurnal (กลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมส่วนใหญ่ในตอนกลางวัน 61–84%) Strongly diurnal (กลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมในตอนกลางวัน ≥ 85%)

5. การวิเคราะห์ช่วงเวลากิจกรรมที่ซ้อนทับกัน โดยใช้โปรแกรม R Package Overlap (Meredith & Ridout, 2020) เพื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาทำกิจกรรมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยกินเนื้อด้วยกันเอง หรือกับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมชนิดอื่นๆ โดยการหาค่าสหสัมพันธ์และร้อยละการซ้อนทับกันของช่วงเวลา

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษารูปแบบกิจกรรมและการซ้อนทับในเชิงเวลาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพในพื้นที่ 72 ตำแหน่ง จำนวน 4,500 กับดักคืน พบสัตว์ป่าเลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อรวม 7 ชนิด ได้แก่ อีเห็นธรรมดา หมาใน หมาจิ้งจอก หมูหริ่ง ชะมดแผงหางปล้อง ชะมดแผงสันหางดำ และแมวดาว

ช่วงเวลาทำกิจกรรมในรอบวันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อ

ช่วงเวลาทำกิจกรรมในรอบวันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อ สามารถวิเคราะห์รูปแบบกิจกรรมได้ดังนี้ กลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมในตอนกลางคืน ได้แก่ อีเห็นธรรมดา (*Paradoxurus hermaphroditus*) ชะมดแผงหางปล้อง (*Viverra Zibetha*) ชะมดแผงสันหางดำ (*Viverra megaspila*) และแมวดาว (*Prionailurus bengalensis*) กลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมส่วนใหญ่ในตอนกลางคืน ได้แก่ หมาจิ้งจอก (*Canis aureus*) และหมูหริ่ง (*Arctonyx collaris*) กลุ่มที่มีรูปแบบกิจกรรมส่วนใหญ่ในตอนกลางวัน คือ หมาใน (*Cuon alpinus*) (Table 1)

สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ มีช่วงเวลาทำกิจกรรมในเวลากลางคืนเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นหมาในที่มีกิจกรรมส่วนใหญ่ในเวลากลางวัน จากการศึกษาของ Sukmasuang et al. (2020) พบว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อบริเวณแนวเชื่อมต่อสัตว์ป่าที่สร้างเพื่อเชื่อมต่ออุทยานแห่งชาติเขาใหญ่และอุทยานแห่งชาติทับลานบริเวณหน่วยพิทักษ์ป่าลำพระยาธาร ทางหลวงสาย 304 ที่มีการรบกวนจากการคมนาคมส่วนใหญ่ออกหากินตอนกลางคืน ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของทีรทัศน์ อยู่เจริญ (2560) ที่ทำการศึกษาในอุทยานแห่งชาติเขา

ใหญ่เช่นเดียวกัน พบว่าช่วงเวลาทำกิจกรรมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อมีช่วงเวลาทำกิจกรรมในตอนกลางคืนเช่นกัน เมื่อเปรียบกับการศึกษาของจิตติมา เรืองติก (2561) ที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาอ่างฤาไน พบว่าแมวดาวที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาอ่างฤาไนมีรูปแบบกิจกรรมส่วนใหญ่ในตอนกลางคืน ซึ่งเมื่อเปรียบกับการศึกษาของ Lynam et al. (2013) พบว่าแมวดาวในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ออกหากินเวลากลางคืน มีกิจกรรมสูงสุดในช่วงเช้ามืดและพลบค่ำ ซึ่งอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่เป็นแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติที่ผู้คนนิยมไป นั่นอาจเป็นเหตุที่ทำให้สัตว์ป่าถูกรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ ทำให้สัตว์เลี้ยงลูกด้วยกินเนื้อบางชนิดอาจมีการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงการถูกรบกวนจากมนุษย์ Griffiths and Schaik (1993) กล่าวว่าสัตว์อาจมีการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาทำกิจกรรมเป็นตอนกลางคืนมากขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงกิจกรรมของมนุษย์

Table 1 Activity pattern of species was classified based on the percentage of the number of pictures taken.

Common name	Scientific	Total of day time (06.01–17.59)	% observation of day time	Total of night time (18.00–06.00)	% observation of night time	Activity pattern
Asian Palm Civet	*Paradoxurus hermaphroditus*	0	0	29	89.65	SN
Dhole	*Cuon alpinus*	22	68.75	10	31.25	MD
Golden Jackal	*Canis aureus*	23	32.86	47	67.14	MN
Hog Badger	*Arctonyx collaris*	6	20.69	23	79.31	MN
Large Indian Civet	*Viverra zibetha*	2	5.26	36	94.74	SN
Large-spootted Civet	*Viverra megaspila*	2	3.92	49	96.08	SN
Leopard Cat	*Prionailurus bengalensis*	5	13.16	33	86.84	SN

Note: SN = strongly nocturnal, MN = mostly nocturnal, MD = mostly diurnal

จากการวิเคราะห์ช่วงเวลากิจกรรมที่ซ้อนทับกันด้วยโปรแกรม R พบว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อที่มีพื้นที่ใต้กราฟซ้อนทับกันมากที่สุด พบว่า อีเห็นธรรมดาและชะมดแผงหางปล้อง มีพื้นที่ซ้อนทับกับชะมดแผงสันหางดำมากที่สุด (Δ_1 = 0.91, Δ_1 = 0.88 ตามลำดับ) (Fig.2) หมาในมีพื้นที่ซ้อนทับกับหมาจิ้งจอกมากที่สุด (Δ_1 = 0.63) (Fig.2) หมาจิ้งจอกกับหมูหริ่งมากที่สุด (Δ_1 = 0.74) (Fig.2) หมูหริ่งและแมวดาวมีพื้นที่ซ้อนทับกับชะมดแผงหางปล้องมากที่สุด (Δ_1 = 0.80, Δ_1 = 0.85 ตามลำดับ) (Fig.2)

Table 2 Estimate of activity pattern overlap between carnivorous mammals

Species	Dhole	Golden Jackal	Hog Badger	Large Indian Civet	Large-spotted Civet	Leopard Cat
Asian Palm Civet	0.29	0.65	0.67	0.83	0.91	0.74
Dhole		0.63	0.47	0.36	0.31	0.40
Golden Jackal			0.74	0.72	0.68	0.73
Hog Badger				0.80	0.73	0.80
Large Indian Civet					0.88	0.85
Large-spotted Civet						0.82

พบว่ามีสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อ 6 คู่ที่มีการซ้อนทับกันของกิจกรรมในรอบวันมากที่สุด (ค่าสัมประสิทธิ์การซ้อนทับโดยประมาณ ≥ 0.80) ได้แก่ ชะมดแผงหางปล้องกับชะมดแผงสันหางดำ อีเห็นธรรมดากับชะมดแผงหางปล้อง หมูหริ่งกับชะมดแผงหางปล้อง แมวดาวกับชะมดแผงสันหางดำ แมวดาวกับชะมดแผงสันหางปล้อง และแมวดาวกับหมูหริ่ง (Table 2) เมื่อเปรียบกับการศึกษาของ Lynam et al. (2013) พบว่าแมวดาวมีพื้นที่ซ้อนทับกับเสือลายเมฆมากถึง 0.90 นอกจากนั้นยังพบว่าหมาในมีการซ้อนทับกันที่ต่ำกับทั้งอีเห็นธรรมดาและชะมดแผงสันหางดำ (< 0.35) (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Khoewsree et al. (2019) พบว่าหมาในที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มีกิจกรรมในช่วงเวลากลางวันมากกว่าเวลากลางคืน เนื่องจากเหยื่อหลักของมันมีกิจกรรมในตอนกลางวันมากกว่ากลางคืน จึงทำให้หมาในมีช่วงเวลาซ้อนทับกันกับสัตว์ชนิดอื่นต่ำ (Table 2) จากการศึกษาของจิตติมา เรืองติก (2561) พบว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อที่มีขนาดตัวใกล้เคียงกันมีความต้องการใช้ทรัพยากรดำรงชีวิตเหมือนกัน และมีช่วงเวลากิจกรรมที่ซ้อนทับกัน การแยกตามเวลาเป็นอีกกลไกหนึ่งที่สิ่งมีชีวิตที่คล้ายคลึงกันในระบบนิเวศ สามารถใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขัน (Lucherini et al., 2009)

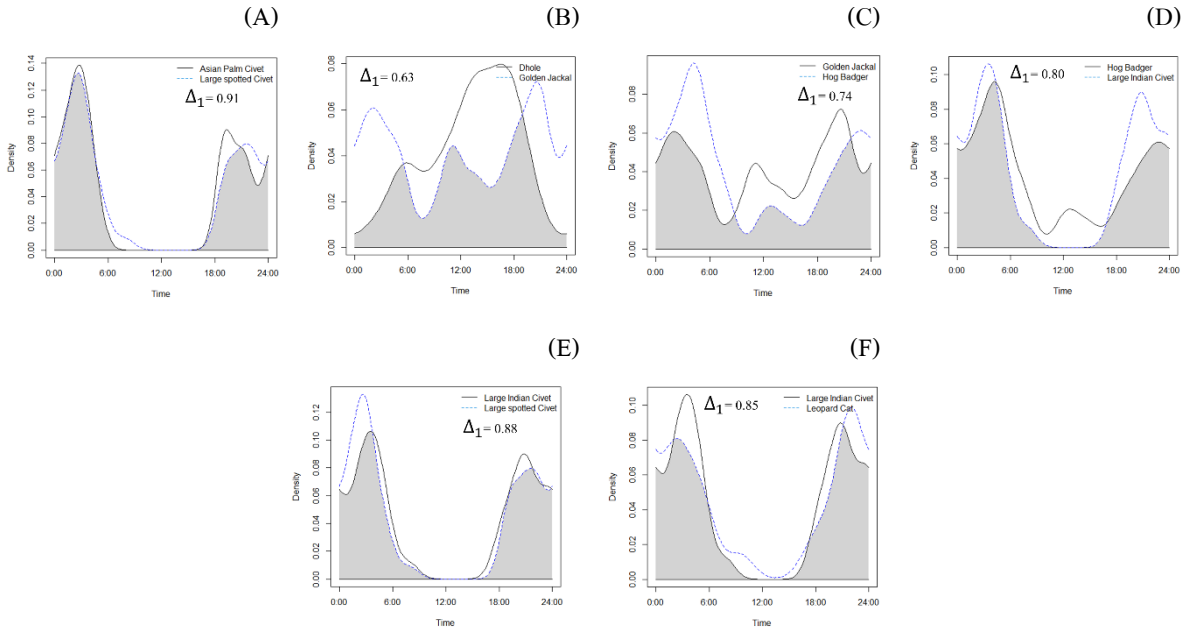


Fig. 2 Estimate of daily activity pattern and overlap of carnivores. The overlap coefficient is the shaded area under the two density estimates. Asian Palm Civet & Large-spotted Civet (A), Dhole & Golden Jackal (B), Golden Jackal & Hog Badger (C), Hog Badger & Large Indian Civet (D), Large Indian Civet & Large-spotted Civet (E), Leopard Cat & Large Indian Civet (F)

สรุป

ผลการศึกษาพบว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ที่พบในกล้องดักถ่ายภาพเกือบทั้งหมดมีรูปแบบกิจกรรมเป็นตอนกลางคืน ยกเว้นหมาในที่มีรูปแบบกิจกรรมส่วนใหญ่ในตอนกลางวัน การซ้อนทับกันของช่วงเวลาทำกิจกรรมพบว่าอีเห็นธรรมดาและชะมดแผงหางปล้องมีพื้นที่ใต้กราฟที่ซ้อนทับกันกับชะมดแผงสันหางดำมากที่สุด หมาในมีพื้นที่ใต้กราฟที่ซ้อนทับกันกับหมาจิ้งจอกมากที่สุด หมาจิ้งจอกมีพื้นที่ใต้

กราฟที่ซ้อนทับกันกับหมูหริ่งมากที่สุด หมูหริ่งและแมวดาวมีพื้นที่ใต้กราฟที่ซ้อนทับกันกับชะมดแผงหางปล้องมากที่สุด

จากการศึกษาในครั้งนี้ขอเสนอแนะให้มีการจัดการกิจกรรมการท่องเที่ยว หลีกเลี่ยงการเดินทางในพื้นที่โดยเฉพาะในเวลากลางคืน เนื่องจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อส่วนใหญ่มีช่วงเวลาทำกิจกรรมในตอนกลางคืน จัดการพื้นที่อาศัย เพื่อการฟื้นฟูประชากรสัตว์ป่าที่เป็นเหยื่อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อในพื้นที่ และควรมีการติดตามและศึกษาอย่างต่อเนื่อง ขยายพื้นที่ให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.รองลาภ สุขมาสรวง ที่สนับสนุนให้การช่วยเหลือในทุกๆด้าน ทั้งคำแนะนำ คำปรึกษา ข้อแก้ไขในการปรับแก้และพัฒนางานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาภายใต้โครงการนิเวศวิทยาของสัตว์ป่าสำคัญเพื่อการอนุรักษ์ นันทนาการ และความเป็นเลิศทางวิชาการ ที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ขอขอบคุณเพื่อน wildlife 38 พี่ น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการวิเคราะห์ข้อมูล จนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

จอห์น พาร์. 2553. สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในประเทศไทย (ฉบับปรับปรุง). สำนักพิมพ์สารคดี, กรุงเทพฯ.

จิตติมา เรืองติก. 2561. ความหลากชนิด ความมากมาย และการใช้ถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมกินเนื้อในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาอ่างฤาไน จังหวัดฉะเชิงเทรา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทีรทัศน์ อยู่เจริญ. 2560. ความหลากชนิด และความมากมายของสัตว์ผู้ล่าเลี้ยงลูกด้วยนมในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา. (ปริญญาตรี), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ส่วนจัดการท่องเที่ยวและนันทนาการ สำนักอุทยานแห่งชาติ. 2560. คู่มือท่องเที่ยวอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่. บริษัท ดีดี มีเดีย พลัส จำกัด, กรุงเทพฯ.

สำนักอุทยานแห่งชาติ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2563. อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่. http://park.dnp.go.th/visitor/nationparkshow.php?PTA_CODE=1001

Griffiths, M., Schaik, C.P.v. 1993. The Impact of Human Traffic on the Abundance and Activity Periods of Sumatran Rain Forest. Conserv. Biol. 7: 632–626.

Jansen, P.A., Forrester, T.D., McShea, W.J. 2014. Protocol for Camera-Trap Surveys of Mammals at CTFS-ForestGEO Sites. Panama: Smithsonian Tropical Research Institute.

Jenks, K.E., Chanteap, P., Damrongchainarong, K., Cutter, P., Redford, T., Lynam, A.J., Leimgruber, P. 2011. Using relative abundance indices from camera-trapping to test wildlife conservation hypotheses-an example from Khao Yai National Park, Thailand. Trop. Conserv. Sci. 4: 113–131.

Jiménez, C.F., Quintana, H., Pacheco, V., Melton, D., Torrealva, J., Tello, G. 2010. Camera trap survey of medium and large mammals in a montane rainforest of northern Peru. Revista Peruana de Biología 17: 191–196.

Khoewsree, N., Charaspet, K., Sukmasuang, R., Songsasen, N., Pla-ard, M., Thongbantum, J., Srinopawan, K. 2019. Abundance, prey, and activity period of dholes (*Cuon alpinus*) in Khao Yai National Park, Thailand. Biodiversitas. 21: 345–354.

Lucherini, M., Reppucci, J.I., Walker, R.S., Villalba, M.L., Wurstten, A., Gallardo, G., Perovic, P. 2009. Activity pattern segregation of carnivores in the high andes. J. Mammal. 90: 1404–1409.

Lynam, A.J., Jenks, K.E., Tantipisanuh, N., Chutipong, W., Ngoprasert, D., Gale, G.A., Leimgruber, P. 2013. Terrestrial activity patterns of wild cats from camera-trapping. The Raffles bulletin of zoology 61: 407–415.

Meredith, M., Ridout, M. 2020. Overview of the overlap package. Retrieved from https://cran.uib.no/web/packages/overlap/vignettes/overlap.pdf

O'Brien, T.G., Kinnaird, M.F., Wibisono, H.T. 2003. Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. Anim. Conserv. 131–139.

Ripple, W.J., Estes, J.A., Beschta, R.L., Wilmers, C.C., Ritchie, E.G., Hebblewhite, M., Wirsing, A. J. 2014. Status and Ecological Effects of the World's Largest Carnivores. Science 343: 1241484. doi.org/10.1126/science.1241484

Saisamorn, A., Duengkae, P., Pattanavibool, A., Duangchantrasiri, S., Simcharoen, A., Smith, J.L.D. 2019. Spatial and temporal analysis of leopards (*Pantera pardus*), their prey and tigers (*Panthera tigris*) in Huai Kha Khaeng Wildlife Santuary, Thailand. Folia Oecologica 46: 73–82.

Schaik, C.P.v., Griffiths, M. 1996. Activity periods of Indonesian rain forest mammals. Biotropica 28: 105–112.

Sukmasuang, R., Charaspet, K., Panganta, T., Pla-ard, M., Khoewsree, N., Thongbantum, J. 2020. Diversity, abundance, activity period, and factors affecting the appearance of wildlife around the corridors between Khao Yai-Thap Lan National Parks, Thailand by camera trapping. Biodiversitas 21: 2310–2321.

UNESCO. 2021. Dong Phayayen-Khao Yai Forest Complex. Retrieved from https://whc.unesco.org/en/list/590

การประเมินผลของมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ และการเพิ่มพื้นที่ป่า ต่อลักษณะทางอุทกวิทยา บริเวณลุ่มน้ำพระธาตุ จังหวัดตาก

Assessing the effects of soil and water conservation and increasing forestlands measures on hydrological characteristics in Phra That Basin, Tak Province

สหภาพ พันธ์ปัญญากรกุล[a], ยุทธพงษ์ คีรีมังคละ[b,*], วีนัส ต่วนเครือ[b], อนิศรา เพ็ญสุข ติ๊บแก้ว[c]

Sahapap Panphanyakorakul[a], Yutthaphong Kheereemangkla[b,*], Venus Tuankrua[b], Anisara Pensuk Tibkaew[c]

[a]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[c]ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]The Graduate School, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Conservation, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[c]Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: fforypk@ku.ac.th, kyutth@gmail.com

บทคัดย่อ

การประเมินการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางอุทกวิทยา บริเวณลุ่มน้ำพระธาตุ จังหวัดตาก ทำการศึกษาผลของมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ และการอนุรักษ์ป่าไม้ต่อระบบนิเวศลุ่มน้ำ โดยกำหนดสถานการณ์ของการใช้มาตรการอนุรักษ์รวม 7 สถานการณ์ วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool: SWAT เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงน้ำท่าและตะกอน และเปรียบเทียบกับสถานการณ์การใช้ที่ดินปัจจุบัน (พ.ศ. 2559) ผลการศึกษา พบว่า สถานการณ์การเพิ่มพื้นที่ป่าในบริเวณที่มีความลาดชันมากกว่าร้อยละ 35 ร่วมกับการทำขั้นบันไดดิน และการปลูกพืชตามแนวขอบเขา ส่งผลให้ปริมาณน้ำท่าลดลงร้อยละ 0.01–1.01 ส่วนปริมาณตะกอนลดลงร้อยละ 41.97 ทั้งนี้ มาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ และการเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ช่วยลดอัตราการชะล้างพังทลาย และการสูญเสียดินออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการจัดการลุ่มน้ำในการสร้างความยั่งยืนต่อทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ตะกอน, น้ำท่า, แบบจำลอง SWAT, มาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ, ลุ่มน้ำพระธาตุ

Abstract

Assessing changes in hydrological characteristics to the soil and water conservation and increasing forestlands measures in Phra That Basin, Tak Province was designed to assess the effects of conservation practices and forest management measure on discharge and sediment yields variation. Seven scenarios of soil and water conservation practices were modeled with the Soil and Water Assessment Tool: SWAT and the results were compared to the existing or baseline conditions (BS)─ land use of the year 2016. The findings indicated that the scenario of increasing forestlands in the areas which having slopes greater than 35% with the addition of terracing and contour cultivation had a small decrease by 0.01–1.01 percent in discharge, but greatly influenced in decreasing sedimentation by 41.97 percent. These results informed that the conservation measure that adopt soil and water conservation practices together with increasing of forestlands has a strong effect on decreasing soil loss and sediment loads. The research outputs will serve the watershed management objectives─to meet natural resources and environmental sustainability.

Keywords: discharge, Phra That Basin, sediment yields, soil and water conservation, SWAT model

คำนำ

ปัญหาการชะล้างพังทลาย และการสูญเสียดินที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูฝนบริเวณพื้นที่สูงซึ่งมีความลาดชันมาก และไม่มีป่าปกคลุม หรือสภาพป่าเสื่อมโทรมที่พบในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศ เกิดรุนแรง และบ่อยครั้งขึ้น ซึ่งสร้างผลกระทบต่อสภาพเศรษฐกิจ สังคม และความเป็นอยู่ของชุมชนโดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทซึ่งครัวเรือนมีรายได้ต่ำ และยังพึ่งพิงทรัพยากรธรรมชาติ โดยมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน มีการบุกรุกแผ้วถาง และจับจองพื้นที่ป่าโดยเฉพาะบริเวณต้นน้ำที่ภูมิประเทศเป็นพื้นที่สูง และลาดชัน เพื่อทำการเกษตร การตั้งชุมชน และพัฒนากิจกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะการขยายตัวของพื้นที่การเกษตรเพื่อปลูกข้าวโพด พืชไร่ และไม้ยืนต้นอื่น ๆ ซึ่งมีการวิจัยว่า การทำลายป่าต้นน้ำทำให้การชะล้างพังทลายของดินเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 10.02 เท่าเมื่อเทียบกับป่าธรรมชาติ (พงษ์ศักดิ์ และคณะ, 2555) นอกจากนั้น เมื่อไม่มีมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม ก็ส่งผลให้การชะล้างพังทลาย และการสูญเสียดินรุนแรง เกิดการสูญเสียหน้าดินที่อุดมสมบูรณ์ทำให้ผลผลิตลดลง และตะกอนดินที่ถูกพัดพาลงไปทับถมในแหล่งน้ำทำให้การเก็บกักน้ำลดลง มีการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาณ คุณภาพ และลักษณะการไหลของน้ำ ทั้งนี้ หากมีมาตรการอนุรักษ์ดิน และน้ำ รวมถึงมาตรการเพิ่มพื้นที่ป่า จึงเป็นแนวทางในการป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้น และช่วยควบคุมความสมดุลของระบบนิเวศลุ่มน้ำให้สามารถทำหน้าที่ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ลุ่มน้ำพระธาตุ อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก ประสบปัญหาการบุกรุกพื้นที่ป่า และเกิดการสูญเสียดินอย่างรุนแรงเป็นประจำในช่วงฤดูฝน สาเหตุสำคัญเกิดจากการขยายพื้นที่เกษตรกรรมตามความต้องการที่เพิ่มขึ้นของชุมชน ทำให้พื้นที่ป่าลดลง และสภาพเสื่อมโทรมลงไป รวมทั้งการเกษตรที่ไม่มีมาตรการอนุรักษ์ดิน และน้ำ จากข้อจำกัดด้านความรู้ และความเข้าใจถึงประโยชน์ของมาตรการต่าง ๆ และงบประมาณ ประชาชนจึงไม่ให้ความสำคัญ และตระหนักถึงปัญหา ทำให้ผลกระทบรุนแรงขึ้น และส่งผลถึงทรัพยากรธรรมชาติอื่น ๆ รวมทั้งสภาพเศรษฐกิจ และสังคมของชุมชนด้วย การวิจัยนี้ศึกษาผลของมาตรการอนุรักษ์ดิน และน้ำ และการเพิ่มพื้นที่ป่าโดยเฉพาะป่าต้นน้ำลำธารต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางอุทกวิทยา โดยใช้แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool: SWAT เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่า และตะกอนที่เกิดขึ้นภายใต้สถานการณ์การใช้มาตรการอนุรักษ์ต่าง ๆ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของการใช้ประโยชน์ที่ดินกับมาตรการต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะทางอุทกวิทยา ซึ่งสามารถเสนอแนวทางในการจัดการป่าไม้ และกำหนดมาตรการอนุรักษ์ดิน และน้ำ ที่ใช้ในพื้นที่ได้เพื่อป้องกันและแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้น รวมทั้งช่วยสนับสนุนการจัดการทรัพยากรต่าง ๆ ให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของการจัดการลุ่มน้ำได้อย่างยั่งยืน

วิธีการศึกษา

พื้นที่วิจัย

ลุ่มน้ำพระธาตุ อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก พื้นที่ประมาณ 81 ตารางกิโลเมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางระหว่าง 250–982 เมตร กลุ่มดินเป็นดินในพื้นที่ลาดชันเชิงซ้อน (SC: slope complex) หรือกลุ่มชุดดิน 62 ส่วนการใช้ประโยชน์ที่ดิน (พ.ศ. 2559) ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ป่าไม้ มีพื้นที่ 54.31 ตารางกิโลเมตร (Fig. 1)

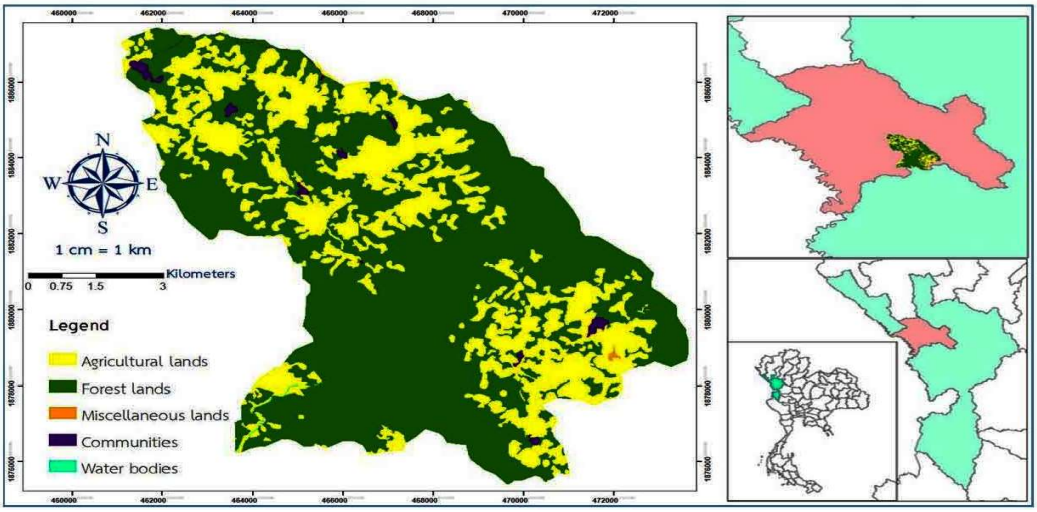


Fig. 1 Location and land use classification of Pra That Basin, Mae Ramat District, Tak Province (generated from Land Development Department (LDD) land use database of the year 2016)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำท่า และตะกอน

การเตรียมข้อมูลนำเข้าแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model: DEM) ซึ่งแสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ลุ่มน้ำ เตรียมด้วยโปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) โดยการแปลงข้อมูลเส้นชั้นความสูง (Contour) จากฐานข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินเป็นข้อมูลความสูงเชิงตัวเลข และกำหนดขนาด cell size เป็น 20×20 เมตร

การใช้ที่ดิน จากฐานข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use map) ของกรมพัฒนาที่ดิน (ปี พ.ศ.2559) ใช้โปรแกรม GIS จัดทำแผนที่โดยแบ่งกลุ่มประเภทการใช้ที่ดิน และสร้างตารางข้อมูล (Attributed Data) ที่กำหนด SWAT Code ประกอบด้วยที่นา (RICE) พื้นที่ทิ้งร้าง/ไร่เลื่อนลอย (MEDM) ข้าวโพด (CORN) ข้าวไร่ (RYEE) ยางพารา (RUBR) ไม้ผล (ORCD) ป่าไม้ผลัดใบ (FRSD) ป่า และสวนไม้ป่า (FRST) ทุ่งหญ้า/ไม้พุ่ม (WSEV) ถนน (OTHR) หมู่บ้าน/ชุมชน (URBN) และแหล่งน้ำ (WATR) ส่วนค่าการจัดการพืช (Crop management: C) และค่ามาตรการจัดการที่ดิน (Support practices: P) ของแต่ละประเภทการใช้ที่ดินกำหนดตามกรมพัฒนาที่ดิน (2545)

ดิน และสมบัติดิน (Soil groups and properties) ใช้โปรแกรม GIS ในการจัดทำแผนที่ดิน กำหนดตามกลุ่มชุดดิน (Soil groups: SG) ที่จำแนกโดยกรมพัฒนาที่ดิน และสร้างตารางข้อมูลเพื่อกำหนด Soil Code ส่วนค่าความคงทนของดิน (Soil erodibility factor: K) กำหนดตามกรมพัฒนาที่ดิน (2545) สร้างข้อมูลใน SWAT Access ส่วนค่าสมบัติดินได้จากการรวบรวมเอกสารงานวิจัยต่าง ๆ

ลักษณะอากาศ ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของปริมาณฝน และอุณหภูมิ ตรวจวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่สอด จังหวัดตาก กรมอุตุนิยมวิทยา ระหว่างปี พ.ศ. 2555–2559 วิเคราะห์ข้อมูลรายเดือนเพื่อใช้ในแบบจำลอง

อุทกวิทยา ข้อมูลปริมาณน้ำท่า และตะกอนแขวนลอย ตรวจวัดที่สถานีอุทกวิทยาน้ำแม่จะเรา บ้านตีนธาตุ อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก กรมทรัพยากรน้ำ และกรมชลประทาน ระหว่างปี พ.ศ. 2555–2559 วิเคราะห์ข้อมูลรายเดือน ใช้เพื่อปรับเทียบ (Calibration) และตรวจสอบ หรือสอบเทียบ (Validation) แบบจำลอง

การประยุกต์แบบจำลอง SWAT

การกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำ และการวิเคราะห์หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา นำเข้าแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (DEM) ในโปรแกรม ArcSWAT version 2012 เพื่อกำหนดขอบเขตของลุ่มน้ำซึ่งแยกตามสภาพภูมิศาสตร์กายภาพ และนำเข้าข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และชุดดินเพื่อวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลภูมิศาสตร์กายภาพ สำหรับกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic responses units: HRUs) โดยมีการใช้ประโยชน์ที่ดิน 12 ประเภท กลุ่มดิน 1 กลุ่ม และความลาดชันของพื้นที่ซึ่งแบ่งเป็น 5 ระดับที่สอดคล้องกับการกำหนดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ (เกษม, 2539) ได้แก่ ความลาดชันร้อยละ 0–12 (ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 5) ร้อยละ 12–17 (ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 4) ร้อยละ 17–21 (ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 3) ร้อยละ 21–35 (ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 2) และมากกว่าร้อยละ 35 (ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 1)

ข้อมูลลักษณะอากาศ และอุทกวิทยา นำเข้าข้อมูลลักษณะอากาศ ประกอบด้วยข้อมูลปริมาณฝน และอุณหภูมิรายวัน (ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ย) และข้อมูลอุทกวิทยา (ปริมาณน้ำท่า และตะกอนแขวนลอย) ระหว่างปี พ.ศ. 2555–2559 เพื่อใช้วิเคราะห์ ปรับเทียบ และสอบเทียบข้อมูลสำหรับประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

การตั้งค่าเพื่อประมวลผลข้อมูล นำเข้าข้อมูลตำแหน่งที่ตั้งสถานีตรวจวัดอากาศ และข้อมูลลักษณะอากาศ (ไฟล์ .txt) โดยกำหนดข้อมูลปี พ.ศ. 2555 เพื่อเริ่มการประมวลผล (Warm up) ใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2556–2557 ในการปรับเทียบ และข้อมูลปีพ.ศ. 2558–2559 ในการสอบเทียบแบบจำลอง

พารามิเตอร์ในการปรับแก้ปริมาณน้ำท่า และตะกอน พารามิเตอร์สำหรับปรับแก้ปริมาณน้ำท่าประกอบด้วย Base flow alpha factor (ALPHA_BF), Soil water conductivity (CH_K), Initial SCS runoff curve number for moisture condition II (CN2), Groundwater delay (GW_DELAY), Soil depth (SOL_Z), Value of water content; land can hold water (SOL_AWC), Soil water conductivity (SOL_K), Manning's *n* value for the main channel (CH_N2), Compensation factor for surface evaporation (ESCO), Surface runoff lag time (SURLAG), and Maximum water retention value on leaf surface (CANMX) ส่วนพารามิเตอร์สำหรับปรับแก้ปริมาณตะกอนประกอบด้วย Exponential parameters of sediment in streams (SPEXP), USLE equation support practice factor (USLE_P), Sediment linear parameters (SPCON), River cover factor value (CH_COV), Soil erosion factor in streams (CH_EROD), Minimum value of USLE_C for water erosion applicable to the land cover/plant (USLE_C), and Average slope length (SLSUBBSN)

การปรับเทียบ และสอบเทียบข้อมูล และประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ปรับค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ (Simulation) เทียบกับค่าตรวจวัดจริง (Observed) จนยอมรับได้ โดยปรับพารามิเตอร์ปริมาณน้ำท่าก่อนจึงปรับค่าพารามิเตอร์ปริมาณตะกอน ใช้ข้อมูลรายเดือนปี พ.ศ. 2556–2557 สำหรับปรับเทียบ และข้อมูลปีพ.ศ. 2558–2559 ในการสอบเทียบแบบจำลอง

ส่วนการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination: r^2 และ Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient: NSE กำหนดค่า r^2 และ NSE ตั้งแต่ 0.75 ขึ้นไป

การจำลองสถานการณ์มาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ และการเพิ่มพื้นที่ป่า กำหนดสถานการณ์การใช้มาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ (Table 1) ประกอบด้วยการปลูกพืชตามแนวขอบเขา (Contour cultivation) การปลูกพืช

สลับเป็นแถบ (Strip-cropping) และทำขั้นบันไดดินร่วมกับการปลูกพืช (Terracing) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถดำเนินการได้ เป็นที่นิยม และลดผลกระทบจากการสูญเสียดิน และน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการเพิ่มพื้นที่ป่ากำหนดให้พื้นที่ที่มีความลาดชันร้อยละ 35 ขึ้นไป (ต้นน้ำลำธาร หรือชั้นคุณภาพลุ่มน้ำชั้นที่ 1) มีการใช้ที่ดินปกคลุมด้วยพื้นที่ป่าไม้ รวมถึงการใช้มาตรการต่าง ๆ ร่วมกับการเพิ่มพื้นที่ป่า

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง SWAT

ขอบเขตลุ่มน้ำ และหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา แบ่งได้ 51 ลุ่มน้ำย่อย และมีหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา 370 HRUs

พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลในการวิเคราะห์ลักษณะทางอุทกวิทยา อ้างอิงจากการศึกษาของ Sittichok (2016) โดยพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์น้ำท่า ได้แก่ Base flow alpha factor: ALPHA_BF (0.2), Soil water conductivity: CH_K (10), Initial SCS runoff curve number for moisture condition II: CN2 (35-98), Groundwater delay: GW_DELAY (180), and Soil depth: SOL_Z (60) ส่วนพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ตะกอน ได้แก่ Exponential parameters of sediment in streams: SPEXP (0.6) and USLE equation support practice factor: USLE_P (0.9) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของธีรวัฒน์ (2554) โดยพื้นที่สูง และมีความลาดชันมาก พารามิเตอร์ด้านน้ำใต้ดิน ดิน และการจัดการมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า ส่วนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับลุ่มน้ำ และมาตรการอนุรักษ์ ส่งผลต่อปริมาณตะกอน

ประสิทธิภาพของแบบจำลอง SWAT

การปรับเทียบปริมาณน้ำท่าให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (r^2) 0.9 และค่า Nash-Sutcliffe efficiency: NSE 0.7 ส่วนการสอบเทียบ ได้ค่า r^2 0.8 และค่า NSE 0.8 ซึ่งแบบจำลองมีประสิทธิภาพในระดับเหมาะสมมาก ส่วนประสิทธิภาพของแบบจำลองอยู่ในระดับเหมาะสมปานกลางในการปรับเทียบปริมาณตะกอน (ค่า r^2 0.8 และค่า NSE 0.6) ส่วนการสอบเทียบ ประสิทธิภาพอยู่ในระดับเหมาะสม (ค่า r^2 0.5 และค่า NSE 0.3) ทั้งนี้ โดย Fig. 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า และตะกอน เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลตรวจวัด และค่าวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทั้งในช่วงการปรับเทียบ และสอบเทียบข้อมูล ทั้งนี้ ผลการสอบเทียบมีค่าไม่สูงมากซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของธีรวัฒน์ (2554) และ Kheereemangkla et al. (2016) เนื่องจากประสิทธิภาพของแบบจำลอง และข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองทั้งข้อมูลลักษณะอากาศ และอุทกวิทยาที่มีความผันแปรในแต่ละปี

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า และตะกอน ในแต่ละสถานการณ์ของมาตรการอนุรักษ์

ปริมาณน้ำท่า สถานการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินปัจจุบัน (BS) มีปริมาณน้ำท่ารวม 246.44 ล้านลูกบาศก์เมตร (ปี พ.ศ. 2556–2559) เป็นน้ำท่าในช่วงน้ำหลาก หรือฤดูฝน (Rainy season) ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม 158.23 ล้านลูกบาศก์เมตร และน้ำท่าในช่วงแล้งฝน หรือฤดูร้อน (Dry season) ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน 8,821 ล้านลูกบาศก์เมตร และการคำนวณในแต่ละสถานการณ์ของมาตรการอนุรักษ์ (Table 2) พบว่า การปลูกพืช

Table 1 Management scenarios description in SWAT Model

Scenarios	Descriptions
Baseline scenario (BS); Present situation	- Current land use (2016) - Without soil and water conservation practices and forest management measures
Scenario 1 (S1); Contour cultivation	- Current land use (2016) - Apply contour cultivation to all agricultural lands - Without forest management measures
Scenario 2 (S2); Strip-cropping	- Current land use (2016) - Apply strip-cropping to all agricultural lands - Without forest management measures
Scenario 3 (S3); Contour cultivation and terracing practice	- Current land use (2016) - Apply contour cultivation and terracing to all agricultural lands - Without forest management measures
Scenario 4 (S4); Increased forestlands measure	- Current land use (2016) - Increase forestlands in the areas which having slopes greater than 35% - Without soil and water conservation practices
Scenario 5 (S5); Contour cultivation with increased forestlands measure	- Current land use (2016) - Increase forestlands in the areas which having slopes greater than 35% - Apply contour cultivation to all agricultural lands
Scenario 6 (S6); Strip-cropping with increased forestlands measure	- Current land use (2016) - Increase forestlands in the areas which having slopes greater than 35% - Apply strip-cropping to all agricultural lands
Scenario 7 (S7); Contour cultivation and terracing practice with increased forestlands measure	- Current land use (2016) - Increase forestlands in the areas which having slopes greater than 35% - Apply contour cultivation and terracing to all agricultural lands

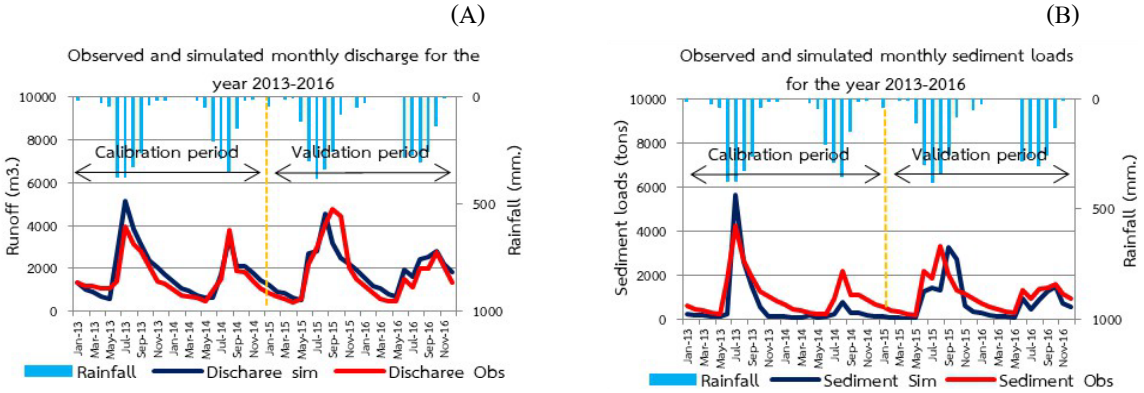


Fig. 2 Simulated and observed monthly discharge (A) and sediment yield (A) at the watershed outlet

Table 2 Discharge and sediment loads variability under different conservation measure scenarios

Scenario	Discharge (MCM)			Sediment yields (Tons)		
	Total	Seasonal		Total	Seasonal	
		Rainy (May–Oct.)	Dry (Nov.–Apr.)		Rainy (May–Oct.)	Dry (Nov.–Apr.)
Baseline scenario (BS)	246.44	158.23	88.21	50,121	35,555	14,566
Scenario 1 (S1)	246.41	158.22	88.19	50,120	35,556	14,564
	(-0.01)	(-0.01)	(-0.02)	(-0.01)	(0.01)	(-0.02)
Scenario 2 (S2)	246.29	158.15	88.14	50,089	35,540	14,549
	(-0.06)	(-0.05)	(-0.08)	(-0.06)	(-0.04)	(-0.12)
Scenario 3 (S3)	246.14	158.07	88.07	47,493	34,982	12,511
	(-0.12)	(-0.10)	(-0.16)	(-5.24)	(-1.61)	(-14.11)
Scenario 4 (S4)	244.19	158.90	85.29	32,246	23,932	8,314
	(-0.91)	(0.42)	(-3.31)	(-35.66)	(-32.69)	(-42.92)
Scenario 5 (S5)	244.16	158.88	85.28	32,242	23,930	8,312
	(-0.93)	(0.41)	(-3.32)	(-35.67)	(-32.70)	(-42.92)
Scenario 6 (S6)	244.06	158.83	85.23	30,327	22,020	8,307
	(-0.97)	(0.38)	(-3.38)	(-39.49)	(-38.07)	(-42.97)
Scenario 7 (S7)	243.96	158.77	85.19	29,085	20,784	8,301
	(-1.01)	(0.34)	(-3.42)	(-41.97)	(-41.54)	(-43.02)

Note: number in parentheses indicated percent changes compared to baseline scenario (BS)

ตามแนวขอบเขา การปลูกพืชสลับเป็นแถบ และการทำขั้นบันไดดินร่วมกับการปลูกพืช รวมทั้งการเพิ่มพื้นที่ป่าบริเวณต้นน้ำลำธาร ทำให้ปริมาณน้ำท่าลดลงเล็กน้อย (ร้อยละ 0.01–1.01) เมื่อเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน เนื่องจากมาตรการต่าง ๆ ทำให้เกิดการปรับโครงสร้าง และเพิ่มความสามารถในการเก็บกักน้ำของดิน การเก็บสะสมน้ำในดินเพิ่มขึ้น น้ำจึงถูกระบายสู่แหล่งน้ำลดลง แต่ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในลำธาร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wangpimool et al. (2013) และเมื่อพิจารณารายฤดูกาล พบว่า ปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 0.34–0.42) เมื่อมีมาตรการเพิ่มพื้นที่ป่าร่วมกับมาตรการอนุรักษ์อื่น ๆ ในช่วงฤดูฝน แต่ช่วงฤดูแล้ง ปริมาณน้ำท่าลดลง (ร้อยละ 3.31–3.42) ซึ่งการมีพื้นที่ป่าส่งผลต่อการที่น้ำจะซึมลงไปในดินได้น้อยลงจากการที่มีเศษซากต่าง ๆ ปกคลุมในพื้นที่ป่าโดยเฉพาะในฤดูฝนที่มีปริมาณมาก น้ำไม่สามารถซึมลงดินได้จึงไหลบ่าตามผิวหน้าดิน ทำให้น้ำในแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น แต่ช่วงฤดูแล้ง ต้นไม้ใช้น้ำในกระบวนการเจริญเติบโต รวมทั้งการสูญเสียน้ำจากการคายระเหยน้ำปริมาณน้ำจึงลดลง ซึ่งเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้นแนวโน้มของปริมาณน้ำท่ารายปีไม่แตกต่างจากเดิม แต่ในช่วงฤดูแล้งปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kheereemangkla et al. (2016)

ปริมาณตะกอน สถานการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินปัจจุบัน (BS) มีปริมาณตะกอนรวม 50,121 ตัน (ปี พ.ศ. 2556–2559) เป็นตะกอนที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน 35,555 ตัน และช่วงฤดูร้อน 14,566 ตัน และผลการคำนวณในแต่ละสถานการณ์ พบว่า การปลูกพืชตามแนวขอบเขา การปลูกพืชสลับเป็นแถบ และการทำขั้นบันไดดินร่วมกับการปลูกพืช รวมทั้งการเพิ่มพื้นที่ป่า ทำให้ตะกอนลดลง โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มพื้นที่ป่าไม้บริเวณต้นน้ำลำธารร่วมกับการใช้

มาตรการอนุรักษ์อื่นๆ (ลดลงร้อยละ 35.66–41.97) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Gathagu et al. (2017) เนื่องจากมาตรการต่างๆ ช่วยควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการชะล้างพังทลายของดินโดยการมีพืชปกคลุมผิวหน้าดินทำให้ลดแรงตกกระทบของฝนลงสู่ผิวหน้าดิน โอกาสการแตกกระจายของดินจึงลดลง การลดความลาดชัน และความยาวของความลาดชันโดยการทำขั้นบันไดดิน หรือการปลูกพืชขวางความลาดชัน ทำให้การเคลื่อนย้ายตะกอนน้อยลง นอกจากนั้น มาตรการเหล่านี้ยังทำให้ดินมีการพัฒนาโครงสร้าง และทนต่อการสูญเสียดินที่เกิดขึ้น โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Elangovan and Seetharaman (2015); Kheereemangkla et al. (2016) และ Gathagu et al, (2018) ซึ่งสรุปว่า มาตรการอนุรักษ์ดิน และน้ำ ทั้งการทำขั้นบันไดดินร่วมกับการปลูกพืชตามแนวระดับ การปลูกพืชสลับเป็นแถบ และการเพิ่มพื้นที่ป่า ช่วยลดปริมาณตะกอนได้

สรุป

การประเมินผลของมาตรการอนุรักษ์ดิน และน้ำ และการเพิ่มพื้นที่ป่า ต่อน้ำท่า และตะกอน บริเวณลุ่มน้ำพระธาตุ จังหวัดตาก โดยกำหนดสถานการณ์ของมาตรการต่าง ๆ 7 สถานการณ์ วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง SWAT เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงน้ำท่า และตะกอน และเปรียบเทียบกับสถานการณ์การใช้ที่ดินปัจจุบัน (พ.ศ.2559) ผลการศึกษา พบว่า มาตรการอนุรักษ์ดิน และน้ำ และการเพิ่มพื้นที่ป่า ทำให้ปริมาณน้ำท่าทั้งหมดลดลงเล็กน้อย (ร้อยร้อยละ 0.01–1.01) แต่ปริมาณตะกอนทั้งหมดลดลงมาก (ร้อยละ 35.66–41.97) เมื่อมีมาตรการเพิ่มพื้นที่ป่าบริเวณต้นน้ำลำธารร่วมกับการใช้มาตรการอนุรักษ์อื่น ๆ โดยสถานการณ์ที่ 7 (S7) ซึ่งมีทั้งการเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ร่วมกับการปลูกพืชตามแนวขอบเขา และการทำขั้นบันไดดิน ทำให้ปริมาณตะกอนรวมลดลงร้อยละ 41.97 ผลการศึกษาสรุปได้ว่า มาตรการอนุรักษ์ต่าง ๆ สามารถลดผลกระทบด้านการชะล้างพังทลาย และการสูญเสียดินที่เกิดขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานกรมพัฒนาที่ดิน กรมทรัพยากรน้ำ และกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และขอบคุณผู้เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยจนแล้วเสร็จ โดยมีเนื้อหาสมบูรณ์ และครบถ้วน

เอกสารอ้างอิง

เกษม จันทร์แก้ว. 2539. หลักการจัดการลุ่มน้ำ. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2545. การประเมินการสูญเสียดินในประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตร และสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ธีรวัฒน์ สุวรรณเลิศเจริญ. 2554. การประยุกต์แบบจำลอง SWAT ในการประเมินปริมาณน้ำท่า และตะกอนแขวนลอยจากพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็ก: กรณีศึกษา ลุ่มน้ำย่อยแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชุติกุล, พิณทิพย์ ธิติโรจนะวัฒน์, สำเริง ปานอุทัย. 2555. สถานการณ์ป่าต้นน้ำ 2555. เอกสารเผยแพร่เล่มที่ 2/2555 ส่วนวิจัยต้นน้ำ สำนักอนุรักษ์และจัดการต้นน้ำ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

Elangovan, A., Seetharaman, R. 2015. Evaluation and focusing of soil and water conservation measures using SWAT model in Krishnagiri reservoir catchment area, south India. International SWAT Conference, Italy.

Gathagu, J.N., Sang, J.K., Maina C.W. 2017. Modelling the impacts of structural conservation measures on sediment and water yield in Thika-Chania catchment, Kenya. International Soil and Water Conservation Research. 6: 165–174. doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.12.007.

Gathagu, J.N., Mourad, K.A., Sang, J.K. 2018. Effectiveness of contour farming and filter strips on ecosystem services. Water. 10: 1312. doi.org/10.3390/w10101312.

Kheereemangkla, Y., Shrestha, R.P., Shrestha, S., Jourdain, D. 2016. Modeling hydrologic responses to land management scenarios for the Chi River Sub-basin Part II, Northeast Thailand. Environ. Earth Sci. 75: 793. doi.org/10.1007/s12665-016-5512-x.

Sittichok, K. 2016. Improving Seasonal Rainfall and Streamflow Forecasting in the Sahel Region via Better Predictor Selection, Uncertainty Quantification and Forecast Economic Value Assessment. Ph.D. thesis. University of Ottawa, Canada.

Wangpimool, W., Pongput, K., Sukvibool, C., Sombatpanit, S., Gassman, P.W. 2013. The effect of reforestation on stream flow in Upper Nan river basin using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. International Soil and Water Conservation Research. 1: 53–63. doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30039-3

การศึกษาธรณีนิเวศของแหล่งพุน้ำร้อนเพื่อการจัดการท่องเที่ยวเชิงส่งเสริมสุขภาพในจังหวัดแม่ฮ่องสอน

Study on ecological geology of hot springs for wellness tourism management in Mae Hong Son Province

กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ[a]*, พงศกร จิวาภรณ์คุปต์[a], อาณัติ เฮงเจริญ[b]

Kannaree Chuangcham[a*], Pongsakorn Jiwapornkupt[a], Anut Hengcharoen[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ 10900

[b]ภาควิชาปฐพีกำแพงแสน คณะปฐพี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

[a]Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

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

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาธรณีนิเวศของแหล่งพุน้ำร้อนเพื่อการจัดการท่องเที่ยวเชิงส่งเสริมสุขภาพในจังหวัดแม่ฮ่องสอน ประกอบด้วย แม่อุมลอง (MUL) หนองแห้ง (NH) ผาบ่อง (PB) ไทรงาม (SNG) และ ท่าปาย (TP) โดยทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของแหล่งพุน้ำร้อน ผลการศึกษาพบว่า แหล่งกำเนิดพุน้ำร้อนของ MUL และ TP มาจากหินแกรนิต มีอุณหภูมิ 76 และ 84 องศาเซลเซียส PB และ SNG มาจากหินปูน มีอุณหภูมิ 62.5 และ 36 องศาเซลเซียส ส่วน NH มาจากหินดินดาน มีอุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส TP มีกลิ่นกำมะถันรุนแรง ส่วน MUL NH และ PB มีกลิ่นกำมะถันเล็กน้อย ส่วน SNG ไม่มีกลิ่นกำมะถัน PB และ SNG มีปริมาณไบคาร์บอเนตสูงสุด (567 และ 482 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ) ส่วน MUL NH และ TP พบมี แบไรต์ (0.0–0.59 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ ฟลูออไรด์ (10.70–17.80 มิลลิกรัมต่อลิตร) สูง ผลการศึกษาสรุปได้ว่าคุณภาพทางเคมีของพุน้ำร้อนสัมพันธ์กับธรณีวิทยาแหล่งแร่ และพุน้ำร้อนทุกแหล่งมีความเหมาะสมสำหรับอาบแช่ในเชิงรักษาสุขภาพเนื่องจากอุดมไปด้วยแร่ธาตุต่าง ๆ แต่ไม่เหมาะสำหรับการจัดทำน้ำแร่เพื่อการบริโภค

คำสำคัญ: การท่องเที่ยวเชิงส่งเสริมสุขภาพ, พุน้ำร้อน, แม่ฮ่องสอน

Abstract

This research aimed to study the ecological geology of hot springs for wellness tourism management in Mae Hong Son Province, including Mae Um Long (MUL), Nong Haeng (NH), Pha bong (PB), Sai Ngam (SNG), and Tha Pai (TP). The physical and chemical properties of hot springs were analyzed. This study reported that the hot water in TP and MUL come out along granitic rock, which has a temperature of 76 and 84°C, respectively. The hot water in PB and SNG come out along limestone, which has a temperature of 62.5 and 36°C, respectively, whereas the hot water of NH comes out along shale and chert with a temperature of 76°C. The smell of sulfur is observed in MUL, PB and TP hot springs. Moreover, PB and SNG hot springs have a high bicarbonate concentration (567 and 482 mg/l respectively), whereas MUL, NH, and TP have a rich barite (0.0–0.59 mg/l) and fluorite (1.73–13.90 mg/l) than the others. From these findings, it can be concluded that the water quality of these hot springs is related to the geology and mineral deposits in terms of their location. Therefore, these hot springs are properly for balneotherapy in terms of wellness due to the enrichment of minerals and may concern in case of drinking.

Keywords: hot spring, Mae Hong Son, wellness tourism

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงทางด้านธรณีวิทยาในอดีต ก่อกำเนิดลักษณะภูมิประเทศเทือกเขาสลับซับซ้อน และสัมพันธ์กับการเกิดพุน้ำร้อนในพื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน แหล่งพุน้ำร้อนในจังหวัดแม่ฮ่องสอนหลายแหล่งได้รับการพัฒนาพื้นที่เพื่อรองรับการท่องเที่ยว เช่น บริการอาบแช่ ต้มไข่ และเป็นแหล่งพักผ่อนหย่อนใจ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แหล่งพุน้ำร้อนเหล่านี้ยังไม่มีข้อมูลทางวิชาการด้านธรณีนิเวศเพื่อสนับสนุนและรองรับการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยว เช่น พุน้ำร้อนประเภทต่าง ๆ ข้อมูลส่วนประกอบทางเคมีของน้ำแร่และประโยชน์ต่อการอาบแช่พุน้ำร้อนแหล่งนั้น ๆ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งพุน้ำร้อนเป็นทรัพยากรธรณีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีความสัมพันธ์กับชั้นดินชั้นหินในบริเวณพื้นที่แหล่งพุน้ำร้อน ดังนั้นการศึกษาข้อมูลทางธรณีนิเวศ ซึ่งจะครอบคลุมถึงธรณีวิทยา ที่ทำให้ทราบถึงประวัติความเป็นมาทางธรณี ข้อมูลอุทกธรณีวิทยา สภาพแวดล้อมของพื้นที่บริเวณแหล่งพุน้ำร้อน และคุณลักษณะทางกายภาพ และ เคมี ของพุน้ำร้อนที่บ่งบอกถึงปริมาณแร่ธาตุในพุน้ำร้อนและประโยชน์ในการอาบแช่ในแต่ละแหล่ง ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาข้อมูลเชิงลึกทางด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ สภาพแวดล้อมธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาการท่องเที่ยวพุน้ำร้อนล้านนา ได้อย่างเหมาะสมสอดคล้องกับฐานทรัพยากรธรรมชาติต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิเคราะห์แหล่งพุน้ำร้อนในจังหวัดแม่ฮ่องสอน จำนวน 5 แหล่ง คือ แหล่งพุน้ำร้อนแม่อุมลอง แหล่งพุน้ำร้อนหนองแห้ง แหล่งพุน้ำร้อนธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม แหล่งพุน้ำร้อนผาบ่อง และ แหล่งพุน้ำร้อนท่าปาย จังหวัดแม่ฮ่องสอน คณะผู้วิจัยมีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้ (1) ศึกษาลักษณะธรณีวิทยา โครงสร้างทางธรณีวิทยา และอุทกธรณีวิทยา ของแหล่งพุน้ำร้อน จากรายงานเก่าที่เกี่ยวข้อง (2) สำรวจภาคสนามศึกษาข้อมูลด้านภูมิประเทศธรณีวิทยา และอุทกธรณีวิทยา ของพื้นที่ศึกษา (3) ศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และ เคมี ของพุน้ำร้อนในแต่ละแหล่งเพื่อประเมินศักยภาพของแหล่งพุน้ำร้อนเชิงคุณภาพ โดยเก็บตัวอย่างพุน้ำร้อนในช่วงฤดูแล้ง ในแต่ละจุด 3 ซ้ำ เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สี กลิ่น ความขุ่น คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง โซเดียม โปแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม โลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ทองแดง สังกะสี แมงกานีส เหล็ก แบเรียม สารหนู ซีลีเนียม อะลูมินัม และ ปรอท และอโลหะ ได้แก่ ฟลูออไรด์ และ ซิลิกา วิธีการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นไปตามวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (Standard Method for the Examination of Water and Wastewater) กำหนดโดย APHA, AWWA และ WEF (2005) และ(4) ประเมินคุณภาพของพุน้ำร้อน ได้แก่ แร่ธาตุต่าง ๆ ในพุน้ำร้อน พร้อมคุณประโยชน์และความเหมาะสมสำหรับกิจกรรมในพื้นที่ เช่น อาบ แช่ เป็นต้น เพื่อศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จากแหล่งพุน้ำร้อนตลอดจนเสนอแนวทางการจัดการท่องเที่ยวจากพุน้ำร้อน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ข้อมูลพื้นฐานทางธรณีนิเวศของแหล่งพุน้ำร้อน จังหวัดแม่ฮ่องสอน

ข้อมูลพื้นฐานทางธรณีนิเวศ ประกอบด้วย แหล่งที่ตั้ง (Fig. 1) ข้อมูลทางกายภาพ ข้อมูลทางเคมี ลักษณะทางธรณีวิทยา กิจกรรมในแหล่งท่องเที่ยว และ หน่วยงานผู้รับผิดชอบ กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

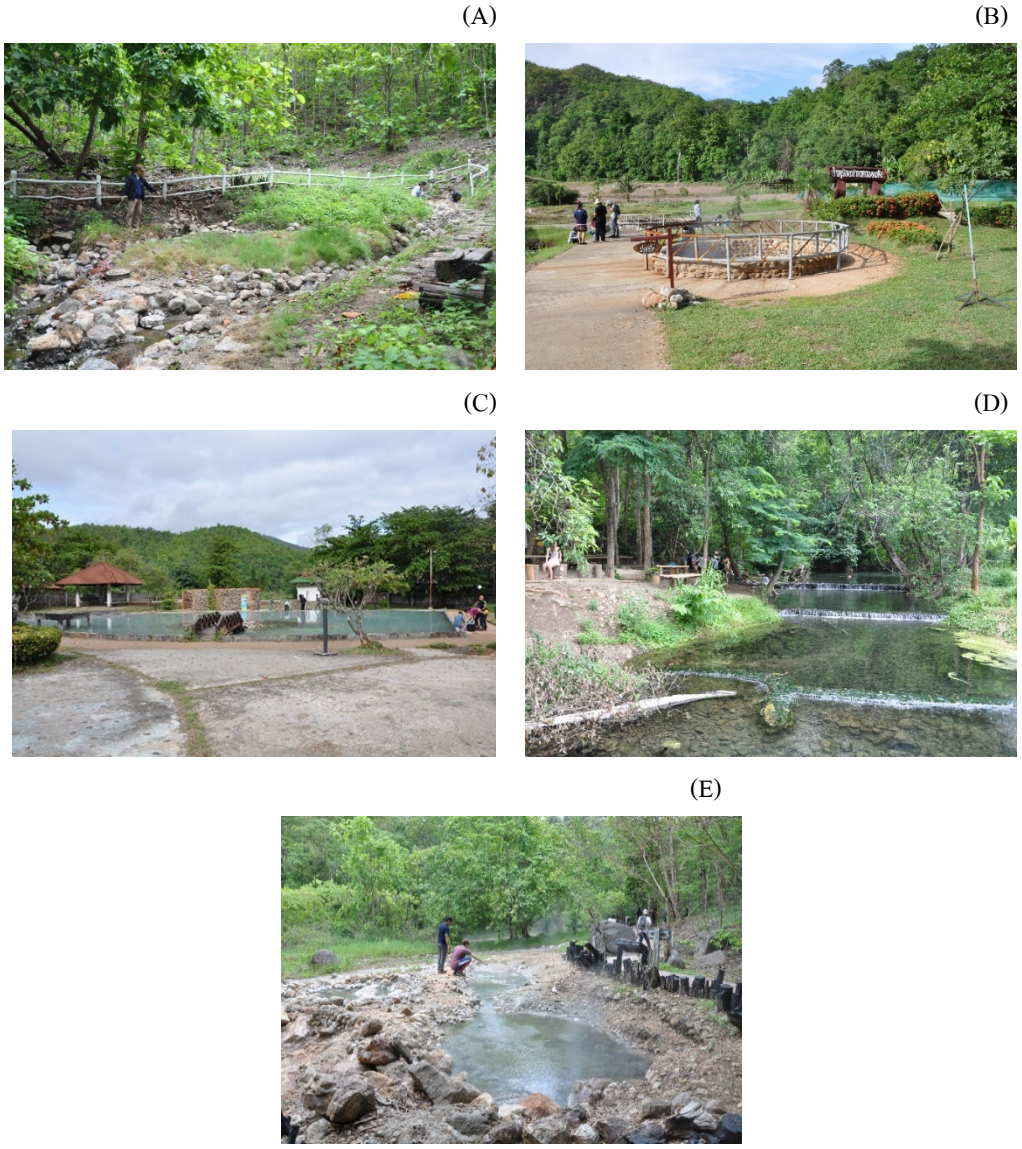


Fig. 1 Hot springs in the study area. Mae Um Long Hot Spring (A), Nong Haeng Hot Spring (B), Pha Bong Hot Spring (C), Sai Ngam Hot Spring (D), Tha Pai Hot Spring (E)

แหล่งพุน้ำร้อนแม่อุมลอง (A) ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่สวนป่าสาละวัน อยู่ในความรับผิดชอบขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ บ้านป่าแป๋ ตำบลแม่สะเรียง อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ลักษณะภูมิประเทศเป็นเทือกเขาหินไบโอไทต์แกรนิต สีขาว มีอายุในยุคไทรแอสซิก ลักษณะของบ่อพุน้ำร้อนพบกระจายตัวอยู่ใกล้ ๆ กัน มีทั้งหมด 5 บ่อ และไหลลงสู่แม่น้ำสะเรียง บ่อพุน้ำร้อนมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 66–78 องศาเซลเซียส พุน้ำร้อนมีกลิ่น

กำมะถันเล็กน้อย กิจกรรมในแหล่งพุน้ำร้อนได้แก่ ท่องเที่ยว/นันทนาการ ชมธารน้ำร้อน อาบและแช่น้ำแร่ ต้มไข่ กางเต็นท์พักแรม

แหล่งพุน้ำร้อนหนองแห้ง (B) ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่บ้านหนองแห้ง ตำบลเมืองปอน อำเภอขุนยวม จังหวัดแม่ฮ่องสอน อยู่ในความรับผิดชอบขององค์การบริหารส่วนตำบลเมืองปอน ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบเชิงเขา หินดินดานและหินเชิร์ต มีอายุในยุคคาร์บอนิเฟอรัส ลักษณะของบ่อพุน้ำร้อนดั้งเดิมเป็นแหล่งที่มีน้ำร้อนผุดขึ้นมาในพื้นที่และชาวบ้านได้สร้างบ่อรองรับน้ำผุด โดยมีบ่อพุน้ำร้อนหลัก จำนวน 4 บ่อ บ่อพุน้ำร้อนมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 64-78 องศาเซลเซียส พุน้ำร้อนมีกลิ่นกำมะถันเล็กน้อย กิจกรรมในแหล่งพุน้ำร้อนได้แก่ ท่องเที่ยว/นันทนาการ ชมธารน้ำร้อน อาบและแช่น้ำแร่ แช่หน่อไม้ ต้มไข่

แหล่งพุน้ำร้อนผาบ่อง (C) ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่บ้านผาบ่อง ตำบลผาบ่อง อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน จังหวัดแม่ฮ่องสอน อยู่ในความรับผิดชอบขององค์การบริหารส่วนตำบลผาบ่อง ลักษณะภูมิประเทศเป็นหุบเขาหินปูน สีขาวเทา มีอายุอยู่ในยุคออร์โดวิเชียน ลักษณะของบ่อพุน้ำร้อนดั้งเดิมเป็นแหล่งที่มีน้ำร้อนผุดขึ้นมาในพื้นที่และชาวบ้านได้สร้างบ่อรองรับน้ำผุด เป็นบ่อรูปแบบสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่เพื่อรองรับพุน้ำร้อนจากบ่อเล็กที่ผุดขึ้นมาตลอดเวลาโดยในบ่อน้ำผุดมีอุณหภูมิสูงสุดคือ 62.5 องศาเซลเซียส ส่วนบ่อรองรับน้ำผุดมีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พุน้ำร้อนมีกลิ่นกำมะถันบ้างแต่ไม่รุนแรง กิจกรรมในแหล่งพุน้ำร้อนได้แก่ ท่องเที่ยว/นันทนาการ ชมน้ำพุร้อน แช่และอาบน้ำแร่ นวดแผนโบราณ

แหล่งพุน้ำร้อนธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม (D) ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่บ้านไทรงาม ตำบลนาเติง อำเภอปาย จังหวัดแม่ฮ่องสอน อยู่ในความรับผิดชอบขององค์การบริหารส่วนตำบลแม่นำเติง ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบและเนินลอนลาดล้อมรอบด้วยเทือกเขาหินปูน มีอายุในยุคออร์โดวิเชียน ลักษณะของบ่อพุน้ำร้อนเป็นบ่อพุน้ำร้อนธรรมชาติ ที่มีน้ำร้อนผุดมาจากพื้นท้องน้ำ มีลักษณะเป็นแอ่งน้ำขนาดเล็ก มีฝายน้ำล้นคั่นเป็นช่วง ๆ เพื่อให้เกิดการลดหลั่นเป็นชั้นคล้ายกับฝายน้ำล้นเล็ก ๆ พุน้ำร้อนมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 36 องศาเซลเซียส พบก๊าซผุดขึ้นมากับน้ำพุร้อนในปริมาณไม่มาก ไม่มีกลิ่นกำมะถัน พบแร่แปรสภาพ คาร์บอเนต กิจกรรมในแหล่งพุน้ำร้อนได้แก่ ท่องเที่ยว/นันทนาการ เป็นสถานที่พักผ่อนหย่อนใจของชาวบ้านในละแวกใกล้เคียง แช่และอาบน้ำแร่

แหล่งพุน้ำร้อนท่าปาย (E) ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติห้วยน้ำดัง บ้านโป่งไหม้ ตำบลแม่ฮี้ อำเภอปาย จังหวัดแม่ฮ่องสอนอยู่ในความรับผิดชอบของหน่วยพิทักษ์อุทยานที่ นด.2 (โป่งน้ำร้อน) อุทยานห้วยน้ำดัง ลักษณะภูมิประเทศเป็นเทือกเขาของหินไบโอไทต์แกรนิต สีเทาขาว มีเนื้อดอกของแร่เฟลด์สปาร์ มีอายุในยุคไทรแอสซิก ลักษณะของบ่อพุน้ำร้อนน้ำพุร้อนผุดขึ้น 2 แห่ง ห่างกันประมาณ 400 เมตร วางตัวแนวตะวันออก-ตะวันตก พุน้ำร้อนไหลเป็นธารน้ำร้อนสู่ห้วยโป่งไหม้ บ่อพุน้ำร้อนมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 84-95 องศาเซลเซียส พบก๊าซผุดขึ้นมากับน้ำพุร้อนเป็นจำนวนมาก มีกลิ่นกำมะถันรุนแรง กิจกรรมในแหล่งพุน้ำร้อนได้แก่ ท่องเที่ยว / นันทนาการ ชมน้ำพุร้อน แช่น้ำแร่ตามลำธาร ต้มไข่

ข้อมูลสมบัติทางกายภาพและเคมีพร้อมประโยชน์และความสำคัญของแหล่งพุน้ำร้อน จังหวัดแม่ฮ่องสอน

ข้อมูลสมบัติทางกายภาพและเคมีพร้อมประโยชน์และความสำคัญของแหล่งพุน้ำร้อน จังหวัดแม่ฮ่องสอน แสดงดัง Table 1 ถึง Table 2 กล่าวโดยสรุปดังนี้

แหล่งพุน้ำร้อนทั้ง 5 แหล่ง มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 7.41–8.82 ค่าพีเอชของน้ำในบ่อพุน้ำร้อนหนักไปทางด่าง ประโยชน์ในการอาบแช่จะช่วยให้ผิวนุ่มและช่วยชะลอการเกิดริ้วรอย มีค่าโซเดียมอยู่ในช่วง 32.30 ถึง 128.10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประโยชน์ช่วยให้ผิวพรรณเปล่างปลั่ง โดยพบมีค่าสูงในแหล่งพุน้ำร้อนผาบ่อง หนอง

แห้ง และท่าปาย ตามลำดับ มีค่าโปแทสเซียมอยู่ในช่วง 3.86 ถึง 30.01 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประโยชน์ช่วยรักษาสมดุลความเป็นกรด-ด่างของร่างกาย และช่วยบำรุงและควบคุมความชุ่มชื้นของเซลล์ผิว พบมีค่าสูงในแหล่งพุน้ำร้อนผาบ่อง หนองแห้ง และท่าปาย มีค่าแคลเซียมอยู่ในช่วง 2.38 ถึง 87.56 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประโยชน์ช่วยปรับสภาพความสมดุลของผิวไม่ให้เกิดความแห้งกร้านและช่วยฟื้นฟูสภาพผิว พบมีค่าสูงในแหล่งพุน้ำร้อนธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม ผาบ่อง และหนองแห้ง มีค่าแมกนีเซียมในช่วง 0.34 ถึง 7.62 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประโยชน์ช่วยต้านความเหนื่อยล้าของผิวและสร้างและซ่อมแซมเซลล์ผิวที่เสื่อมสภาพไป พบมีค่าสูงในแหล่งพุน้ำร้อนธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม ผาบ่อง และแม่อุมลอง และท่าปาย มีค่าซัลเฟตอยู่ในช่วง 6.71 ถึง 32.29 มิลลิกรัมต่อลิตร ประโยชน์ของกำมะถันช่วยรักษาโรคผิวหนัง (สมชัย บวรกิตติ, 2554) พบมีค่าสูงในแหล่งพุน้ำร้อนผาบ่อง ท่าปาย และ แม่อุมลอง มีค่าไบคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 187.88 ถึง 576.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วยลดการอักเสบของผิวหนัง พบมีค่าสูงในแหล่งพุน้ำร้อนผาบ่อง ธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม และหนองแห้ง มีค่าคลอไรด์อยู่ในช่วง 1.69 ถึง 13.49 มิลลิกรัมต่อลิตร ประโยชน์ช่วยทำความสะอาดผิวได้ลึกถึงรูขุมขน (พานาโซนิค, 2562) พบมีค่าสูงในแหล่งพุน้ำร้อนผาบ่อง แม่อุมลอง และหนองแห้ง

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีรวมถึงแร่ธาตุที่สำคัญในแหล่งพุน้ำร้อนแม่ฮ่องสอน พบว่ามีค่าสูง เทียบกับแหล่งน้ำบาดาลอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภคบริโภค (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551) พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด จึงมีความปลอดภัยเหมาะสมหรับอาบแช่เชิงสุขภาพ สอดคล้องกับสมชัย บวรกิตติ (2554) ได้กล่าวถึงประโยชน์ในการอาบแช่พุน้ำร้อนไว้ว่า พุน้ำร้อนมีประโยชน์ในการอาบแช่รักษาโรคปวดประสาท และ โรคปวดข้อ การอาบน้ำร้อนเป็นประจำจะช่วยในการฟื้นฟูสมรรถภาพ การรักษาด้วยน้ำอุณภูมิประมาณ 42 องศาเซลเซียส จะช่วยเพิ่มการไหลเวียนเลือด มีผลต่อการผ่อนคลายความตึงเครียดของกล้ามเนื้อ ช่วยกระตุ้นสภาพของร่างกาย ทำให้ร่างกายปลอดโปร่ง และ การอาบแช่น้ำร้อนทำให้รูขุมขนของร่างกายเปิดกว้างและเป็นการทำความสะอาดรูขุมขน และช่วยให้แร่ธาตุในน้ำไหลเข้าทางรูขุมขนเข้าไปในร่างกาย ทำให้ร่างกายกระปรี้กระเปร่า ลดความเครียด และเกิดสมดุลในระบบประสาท (Simon et al., 2019) การที่แร่ธาตุในพุน้ำร้อนจะซึมผ่านรูขุมขนเข้าไปในร่างกายได้ กินเวลาแช่นาน 6–7 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามอาจมีโทษจากการอาบแช่พุน้ำร้อนจากการติดเชื้อลีจิโอเนลลา ซึ่งก่อให้เกิดโรคปอดลีจิโอเนลลาและพบเชื่ออะมีบาเสรี (นีกลอเรียและอะแคนธามีบา) เป็นเชื้อก่อโรคสมองอักเสบ ข้อห้ามสำหรับบุคคบางประเภทที่ไม่ควรอาบแช่พุน้ำร้อน เช่น ผู้ป่วยภาวะหัวใจล้มเหลว โรคตับแข็งระยะสุดท้าย วัณโรคปอดระยะกัมมันต์ โรคอัมพาตรุนแรง โรคซึมเศร้ารุนแรง และ หญิงมีครรภ์ เป็นต้น

Table 1 Physical-chemical properties analysis and usage of the 5 hot springs in Mae Hong Sorn Province

Item	Parameter	Hot Spring				
		Mae Um Long	Nong Haeng	Pha Bong	Sai Ngam	Tha Pai
1	pH	8.29±0.04	8.06±0.02	7.41±0.16	7.71±0.07	8.82±0.02
2	Temperature (°C)	78.50±0.3	78.00±0.2	62.50±0.5	36.00±0.5	95.00±0.5
3	Sodium (mg/l)	63.86±1.5	111.33±1.0	128.10±4.4	32.30±2.8	79.02±1.6
4	Potassium (mg/l)	9.08±0.18	16.04±0.09	30.01±0.99	4.73±0.31	3.86±0.31

Table 1 (continued).

Item	Parameter	Hot Spring				
		Mae Um Long	Nong Haeng	Pha Bong	Sai Ngam	Tha Pai
5	Calcium (mg/l)	8.97±0.07	9.15±0.21	57.68±0.58	87.56±0.76	2.38±0.32
6	Magnesium (mg/l)	2.68±0.07	2.08±0.02	4.58±0.43	7.62±0.06	0.34±0.05
7	Sulphate (mg/l)	12.16±0.24	12.28±0.22	32.29±0.75	6.71±0.31	12.84±0.3
8	Carbonate (mg/l)	ND	ND	ND	ND	8.40±0.6
9	Bicarbonate (mg/l)	266.45±6.5	427.00±3.2	567.06±7.2	481.66±8.7	187.88±6.1
10	Chloride (mg/l)	6.89±0.23	4.22±0.14	13.49±0.34	3.44±0.09	1.69±0.02

Note: ND = not detected

Table 2 Heavy metals and fluoride analysis in dry season of the 5 hot springs in Mae Hong Sorn Province

Item	Parameter	Hot Spring					Permissible Limit	Maximum permissible Limit
		Mae Um Long	Nong Haeng	Pha Bong	Sai Ngam	Tha Pai		
1	Arsenic (mg/l)	0.091±0.004	0.210±0.010	0.265±0.010	0.019±0.001	0.008±0.002	* 0 ** less than 0.01	*0.05
2	Cadmium (mg/l)	ND	0.006±0.001	ND	ND	ND	* 0 ** less than 0.003	*0.01
4	Copper (mg/l)	ND	0.005±0.001	0.004±0.001	0.002±0.0001	0.005±0.001	* less than 1.0 ** less than 1.0	*1.5
5	Mercury (mg/l)	0.011±0.001	0.009±0.0005	0.054±0.001	0.001±0.0001	0.002±0.0001	* 0 ** less than 0.001	*0.001
6	Manganese (mg/l)	ND	0.058±0.001	ND	ND	ND	* less than 0.3 ** less than 0.05	*0.5
7	Nickle (mg/l)	ND	ND	ND	ND	0.090±0.005	** less than 0.02	No relaxation
8	Lead (mg/l)	0.860±0.005	ND	ND	0.030±0.005	0.270±0.004	* 0 ** less than 0.01	*0.05
9	Selenium ((mg/l)	ND	0.004±0.0003	ND	ND	ND	* 0 ** less than 0.01	*0.01
10	Zinc (mg/l)	ND	ND	ND	ND	ND	* less than 5.0 ** less than 5.0	*15.0
11	Aluminum (mg/l)	0.186±0.001	0.102±0.001	ND	0.134±0.002	0.123±0.002	No guideline	No guideline
12	Barium (mg/l)	0.092±0.001	0.587±0.003	0.250±0.004	ND	ND	No guideline	No guideline
13	Fluoride (mg/l)	11.70±0.05	9.90±0.05	9.90±0.05	1.73±0.01	13.90±0.05	* less than 0.7	*1.0
14	Iron (mg/l)	0.221±0.003	ND	0.124±0.002	0.117±0.002	0.083±0.003	* less than 0.5	*1.0
15	Titanium (mg/l)	0.011±0.002	0.009±0.001	0.009±0.001	0.007±0.001	0.009±0.001	No guideline	No guideline

Notes: *Groundwater Quality Standard (Department of Groundwater Resources, 2008), **Groundwater Quality Standard (Pollution Control Department, 2000)

ผลการวิเคราะห์โลหะและอโลหะ ที่ดำเนินการเก็บตัวอย่างในช่วงฤดูแล้ง พบว่า มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตฐานน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภคบริโภค (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551) เกือบทั้งหมด ยกเว้นปริมาณความเข้มข้นของสารหนู ปรอท และ ฟลูออไรด์ พบค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภคบริโภคทุกตัวอย่าง ส่วนปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว ตรวจพบเฉพาะตัวอย่างพุน้ำร้อนแม่อุมลอง และ พุน้ำร้อนท่าปาย มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภคบริโภค นอกจากนี้พบอีกว่าปริมาณความข้มข้นของฟลูออไรด์ อะลูมินัม และ แบเรียมมีความสัมพันธ์กับลักษณะธรณีวิทยาแหล่งแร่ โดยฟลูออไรด์พบมีความสัมพันธ์กับแหล่งพุน้ำร้อนทั้ง 5 แหล่ง อะลูมินัมมีความสัมพันธ์กับธรณีวิทยาแหล่งแร่บริเวณพุน้ำร้อนแม่อุมลอง หนองแห้ง ธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงามและท่าปาย ส่วนแบเรียมมีความสัมพันธ์กับธรณีวิทยาแหล่งแร่บริเวณพุน้ำร้อนแม่อุมลอง พุน้ำร้อนหนองแห้ง และ พุน้ำร้อนผาบ่อง

กล่าวโดยสรุปแหล่งพุน้ำร้อนแม่อุมลอง หนองแห้ง ผาบ่อง ธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม และ ท่าป่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมสำหรับการอาบแช่ อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณสารหนู ปรอท ตะกั่ว และฟลูออไรด์ เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำบาดาล เมื่อพิจารณาในแง่ประโยชน์การอาบแช่ของแหล่งพุน้ำร้อน ทั้ง 5 แหล่ง และเส้นทางการสัมผัสเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ของสารเหล่านี้ พบว่า เกิดได้จากการกินอาหารและดื่มน้ำที่ปนเปื้อน การหายใจที่มีฝุ่นละอองปนเปื้อน และการดูดซึมทางผิวหนัง (Engwa et al., 2019; Jaishankar et al., 2014; Osman et al., 2019; Simon et al., 2019) พุน้ำร้อนทั้ง 4 แหล่ง ยกเว้น แหล่งธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม มีอุณหภูมิสูง เมื่อจะอาบแช่ต้องมีการผสมกับน้ำเย็น เพื่อปรับสภาพอุณหภูมิให้เหมาะสำหรับการอาบแช่ ดังนั้นสารปนเปื้อนจะถูกเจือจางลงมาระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากการอาบแช่พุน้ำร้อนทั้ง 5 แหล่ง ต้องพิจารณาเส้นทางการสัมผัสการปนเปื้อน ปริมาณสารปนเปื้อนที่สัมผัส และระยะเวลาการสัมผัสร่วมด้วย ดังนั้นการจัดการเชิงท่องเที่ยวเชิงสุขภาพในแหล่งพุน้ำร้อน 5 แหล่ง จึงมีความเหมาะสมสำหรับพัฒนากิจกรรมการอาบแช่เชิงรักษาสุขภาพแต่ไม่เหมาะสมสำหรับบริโภค ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sudjaroen et al., 2017 ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแหล่งพุน้ำร้อนจังหวัดระนองและตรวจพบว่ามีการปนเปื้อนของโลหะหนัก จึงเสนอแนะกิจกรรมอาบแช่ในพื้นที่เท่านั้น

สรุป

แหล่งพุน้ำร้อนแม่อุมลอง หนองแห้ง ผาบ่อง ธรรมชาติป่าอนุรักษ์ไทรงาม และ ท่าป่าย มีความเหมาะสมสำหรับพัฒนากิจกรรมการอาบแช่เชิงรักษาสุขภาพและแหล่งพักผ่อนหย่อนใจในพื้นที่แต่ไม่เหมาะสำหรับการพัฒนาเพื่อบริโภค

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการตรวจติดตามและเฝ้าระวังสารปนเปื้อนต่าง ๆ เหล่านี้ต่อเนื่องอย่างน้อย 2 ครั้งต่อปี ในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง และเพิ่มการตรวจติดตามคุณภาพน้ำทางชีวภาพในแหล่งพุน้ำร้อนที่มีการอาบแช่เป็นกลุ่มใหญ่ เพื่อ

เฝ้าระวังการปนเปื้อน และควรติดป้ายแนะนะวิธีการอาบแช่ในแหล่งพุน้ำร้อนตลอดจนวิธีการป้องกันอันตรายที่เกิดจากการอาบแช่ ทั้งในแง่มุมวิธีการอาบแช่ให้ได้ประโยชน์ การป้องกันตนเองจากการอาบแช่ ไม่ดื่ม ไม่กลืนพุน้ำร้อนระหว่างอาบแช่ รวมทั้งการทำความสะอาดร่างกาย หลังเสร็จสิ้นการอาบแช่

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) และได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจาก องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้สวนป่าสาละวิน อำเภอแม่สะเรียง องค์การบริหารส่วนตำบลเมืองปอน อำเภอขุนยวม องค์การบริหารส่วนตำบลผาบ่อง อำเภอเมือง องค์การบริหารส่วนตำบลแม่นาเติง และหน่วยพิทักษ์อุทยานที่ นด.2 (โป่งน้ำร้อน) อุทยานห้วยน้ำดัง อำเภอปาย จังหวัดแม่ฮ่องสอน ตลอดจนชุมชนพุน้ำร้อนในพื้นที่ศึกษาที่ได้มีส่วนร่วมในการดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2543. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน. หน้า 1–5.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2551. ราชกิจจานุเบกษา “ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการป้องกันด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551”. หน้า 15–18.

สมชัย บวรกิตติ. 2554. คุณและโทษจากการอาบแช่น้ำแร่. ธรรมศาสตร์เวชสาร. 11: 132–134

พานาโซนิค. 2562. บ่อน้ำพุร้อนนั้นมีประโยชน์อย่างไร. https://www.panasonic.com, 15 พฤษภาคม 2562.

APPHA, AWWWA, WEF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th ed., American Public Health Association, Washington, DC, USA.

Engwa, G.A., Ferdinand, P.U. 2019. Mechanism and health effects of heavy metal toxicity in humans. doi.org/10.5772/intechopen.82511.

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B, Beeregowda, K.N. 2014. Toxicity, mechanism and effects of some heavy metals. Interdisciplinary Toxicology. 7: 60–72.

Osman, M.A., Yang, F., Massey, I.Y. 2019. Exposure routes and health effects of heavy metals on children. Biometals 32: 563–573. doi.org/10.1007/s10534-019-00193-5.

Simon, N., Unjah, T., Yusry, M., Dzulkafli, M.A. 2019. Physico-chemical characterization and potential health. benefit of the Hulu Langat hot spring in Selango, Malasia. Sians Malaysiana 48: 2451–2462. doi.org/10.17576/jsm-2019-4811-15.

Sudjaroen, Y., Thongkao, K., Suwannahong, K. 2017. Characteristics of mineral water from nature hot springs in Ranong Province, Thailand. Annals of Tropical Medicine and Public Health 10: 366–370.

The utilization of high quality bamboo charcoal as an adsorbent for improving the quality of undistilled whisky

Khin Moe Moe Htet*, Pongsak Hengniran
Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.
*Corresponding Author. E-mail: khinmoemoehtet.h@ku.th

Abstract

Bamboo charcoal is the carbonaceous residue which is left after heating bamboo in the absence of oxygen. Thanks to its extra-ordinarily large surface area, this can be used as adsorbents for purifying desired fluids. In this research, three types of bamboo charcoal were applied for filtering Thai whisky in order to improve its qualities to meet a new market opportunity by applying a simply inexpensive process. The properties of three types of bamboo charcoal were tested to perform the whisky filtration process and to optimize the process condition–according to Thai Industrial Standard for local whisky from Phrae province. The approximate analysis showed the fixed carbon content of three bamboo charcoals were statistically significant difference ($p = 0.037$), however their specific surface areas did not show any significant difference. Results of the filtration process showed that the charcoal species I and II could reduce most ester, fusel oil, and acid content in the raw whisky. As for taste tests by volunteers, the filtered whisky offered the better flavor and smell, with no cloudiness. This confirms that the bamboo charcoal has an intriguingly effect on the property and taste of Thai whisky, and therefore, it is expected to share the market from popular imported whisky.

Keywords: Bamboo Charcoal, Distillation, Whisky filtration

Introduction

After about 3–5 years plantation, suitable bamboo can be harvested for utilization in a variety of ways. As for the high quality charcoal production, the bamboo was carbonized in the specific kilns at high temperatures ranging between 800 and 1200℃. Without any specific action, the fine and tasteless black powder from bamboo charcoal is an excellent adsorbent for many toxics, gases and drugs. In the case of bamboo charcoal, it has much higher absorptivity because it has a very high specific surface area of about 150–400 m^2/g, approximately 2–3 times in comparison with that of wood charcoal (Kaur et al., 2018).

Bamboo charcoal which is porous carbon-based materials has high thermal and chemical stability and excellent adsorption capacity. Different functional groups of bamboo charcoal can make difference in adsorption capacities of bamboo charcoal with micropore, mesopore and macropore distributions. Bamboo charcoal which has high specific area and high porosity can reduce carbon dioxide emissions (Huang et al., 2014).

Bamboo charcoals have been widely used as adsorbents for the removal of contaminating organic compounds in the treatment of liquids (Bharadwaj, 2015). Especially, they are used to remove undesirable products including in the whisky formed during its fermentation process (Fallin, 1942). There are a large number of bamboo species in tropical countries. Among them, species of *Thyrsostachys*, *Bambusa* and *Dendrocalamus* are many in Thailand. Therefore, producing bamboo charcoal from these available bamboos is easy and cost-effective (Visuphaka, 1985).

In this research, three types of bamboo charcoal were applied in the filtration process for local Thai whiskies to enhance their qualities, especially taste property. The raw whisky for our experimental was local sticky rice whisky, one of the most popular spirits in Thailand, from Phrae province. Having strong smell, unpleasant flavor, and cloudiness are the main current disadvantage situations that make this local spirit facing limited number of customers. Therefore, the quality of this whisky has been needed to improve for a new market opportunity by applying simply inexpensive processes for keeping the selling price. Filtering this local sticky rice whisky through the bamboo activated charcoal will selectively reduce the original organoleptic characteristics of used raw materials and improve the quality of whisky (Siříšťová et al., 2012).

The optimization condition for sticky rice whisky filtration through bamboo charcoal needs to be studied. In this research, three types of bamboo charcoal are tested. Among them, the first one (species I) is from the laboratory of the department of forest products, Faculty of Forestry, Kasetsart University. The second one (species II) from the commercial private company and the last one is the bamboo charcoal from local made (species III). Three types of bamboo charcoal are obtained from only *Dendrocalamus asper* species. The properties of bamboo charcoal were tested and the optimization condition of the sticky rice whisky filtering through bamboo charcoal was observed with the different flow rate of rice whisky in the filtering apparatus.

Materials and Methods

The materials used in this research are analytical balance, crucible, high heating furnaces, ovens, spectrophotometer, fine grinder, Whatman filter paper, carbon filtering apparatus, local sticky rice whisky, and bamboo charcoal particles from *Dendrocalamus asper.* Firstly, the properties of bamboo charcoal are tested by the respective standard methods. The test method includes Approximate analysis and Methylene blue. Then, the whisky filtration process is carried out.

Approximate analysis

Moisture content

Moisture content of bamboo charcoal is analyzed according to ASTM D 2867–04 (American Society, 1998). The sample is weighed before putting in the oven and then heated at 103 ± 2 degrees Celsius for the period of 24 hours. Then bring out the scale to calculate the amount of moisture.

Volatile matter

Volatile Matter test is carried out according to ASTM D 5832–98 (American Society, 1998). It is analyzed by placing a 1 g of sample to the furnace at a temperature of 950 ± 20 degrees Celsius for 7 minutes, then weighing to know the lost weight and calculate the amount of volatile matter.

Ash content

Ash content is analyzed according to the ASTM 2866-94 standard (American Society, 1998). The sample size is 1 gram. The crucible is not closed and burn at 500 degrees Celsius for 30 minutes and increases temperature to 750 ± 25 degrees Celsius. Keep the duration for 3 hours. Then move out and weigh the samples to calculate the amount of ash.

Fixed carbon

Fixed Carbon is calculated from testing moisture content, volatile substance and amount of ash. Then, the value of the amount of fixed carbon will be obtained.

Fixed Carbon content (%) = 100 – (Moisture content (%) + Volatile substance content (%) + Quantity of ash (%))

Methylene blue

This test is analyzed according to the estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue (Nunes et al., 2011).

Whisky filtration

Testing characteristic of whisky

Before and filtering whisky, the characteristics of whisky is checked out by the following seven methods according to Thai Industrial Standard for local whisky: (1)

Determination of degree of alcohol in sample liquors using Hydrometer method; (2) Determination of Aldehyde content in sample liquors using titrimetric method; (3) Determination of Ester content in sample liquors using titrimetric method; (4) Determination of Fusel oil in sample liquors using spectrophotometric method; (5) pH measurement for sample liquors and; (6) Determination of acid content (%) in sample liquors using titrimetric method

Whisky filtering process

As shown in figure 1, the whisky filtering process is performed by the filtering device where three species of bamboo charcoal are packed each per one filtration process. The raw whisky is flowed through the bamboo charcoal particles by applying metering pump for controlling the flow rate of 10ml/min and 20ml/min. The temperature inside the filtering device must not be greater than 20℃ and the input and output whisky is also kept under the temperature of 20℃ because the alcohol can volatile over this high temperature.

The output whisky is filtered again by the Whatman filter paper for removing bamboo charcoal particles. Then, the resulted product is checked out by the whisky testing method and sensory analysis as mentioned above. The sensory analysis is made by preparing the questionnaire and interviewing the volunteers. The difference between the characteristics of whisky before and after filtering whisky was compared.

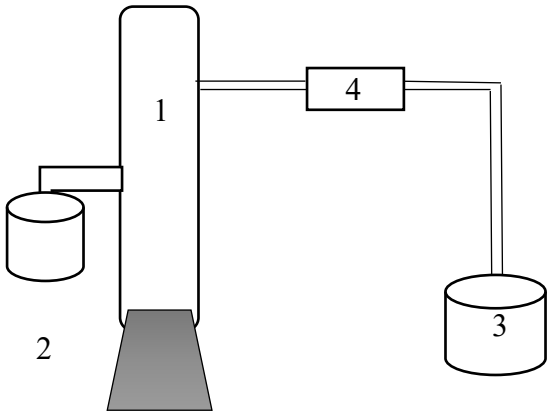


Fig. 1 Whisky Filtering Apparatus (1– filtration charcoal column, 2– output whisky, 3– input whisky, 4– metering pump)

Statistical analyses

Result data were analyzed using one-way analysis of variance with significance tested at $p < 0.05$ for the properties of bamboo charcoal and characteristics of whisky. All statistical analyses were performed using the SPSS software.

Results and Discussion

Approximate analysis of bamboo charcoal

The results of approximate analysis statistically show that the mean amounts (±SD) of the fixed carbon content of three types of bamboo charcoal were 74.76 ± 0.81%, 73.68 ± 2.02%

and 68.44 ± 3.52% respectively. The detailed of their mean values and statistically significant differences are shown in Table 1.

Table 1 Mean Difference of fixed carbon content of three types of bamboo charcoal

Types of charcoal	Fixed carbon content (mean±SD)
Charcoal 1	74.76 ± 0.81^{a}
Charcoal 2	73.68 ± 2.02^{a}
Charcoal 3	68.44 ± 3.52^{b}

Note: mean values superscripted with different lowercase superscript letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between groups

Methylene blue test

Methylene blue test resulted the estimation of the surface area of three types of bamboo charcoal so called methylene blue number. The mean values (±*SD*) of the methylene blue number are shown in table 2. There is no significant difference between the mean values.

Table 2 Mean differences of methylene blue number of three types of bamboo charcoal

Types of charcoal	Methylene blue no. (mean±SD)
Charcoal 1	2.43 ± 0.21^{a}
Charcoal 2	2.42 ± 0.20^{a}
Charcoal 3	2.49 ± 0.02^{a}

Comparison of the characteristics of whisky

As mentioned in the method, three types of bamboo charcoal and two different flow rates were used for filtering whisky. Then, the characteristics of whisky before and after filtration is checked out by seven standards from testing characteristic of whisky. The whisky before filtration is considered as control and those after filtration is considered as six different treatments (three types of bamboo charcoal x two different flow rates). Seven different results of whisky characteristics are compared and analysis by one-way ANOVA. The mean values show statistically significant different except the amount of aldehyde. The results with their significant difference are shown in the following figures:

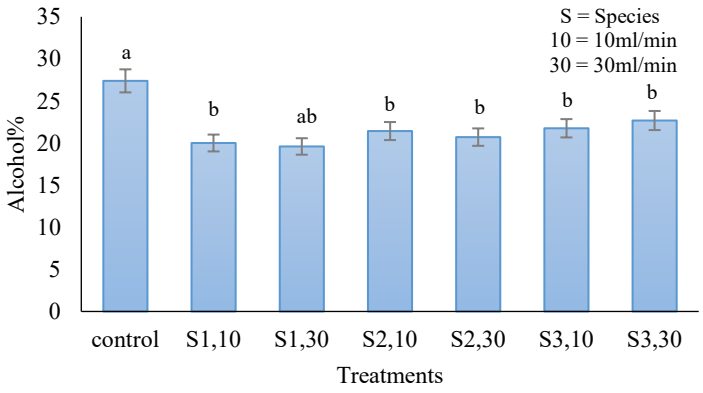


Fig. 2 Mean values of Alcohol% in control and six treatments: Different lowercase letters in the figure indicate significant difference $p < 0.05$

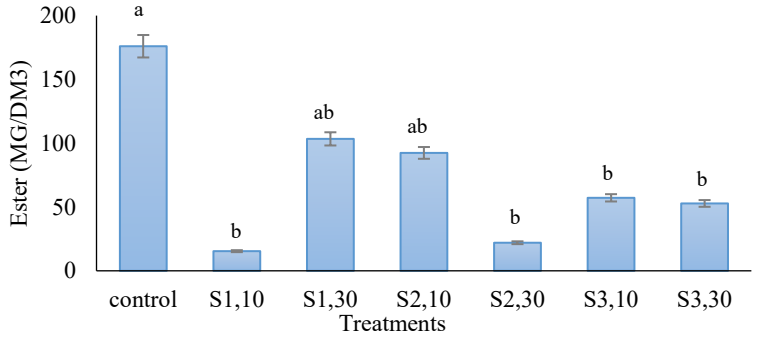


Fig. 3 Mean values of Ester content in control and six treatments: Different lowercase letters in the figure indicate significant difference $p < 0.05$

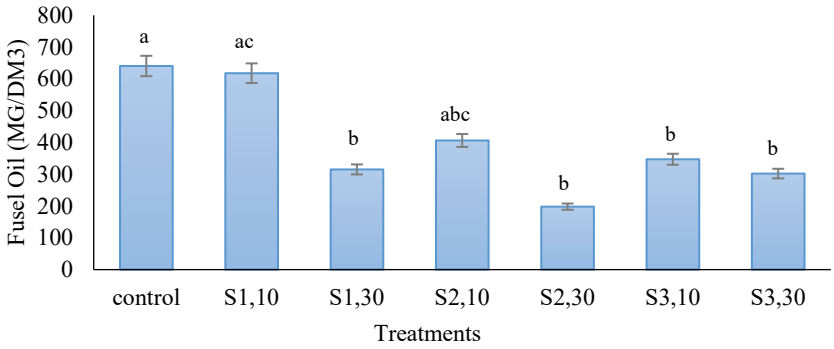


Fig. 4 Mean values of Fusel oil content in control and six treatments: Different lowercase letters in the figure indicate significant difference $p < 0.05$

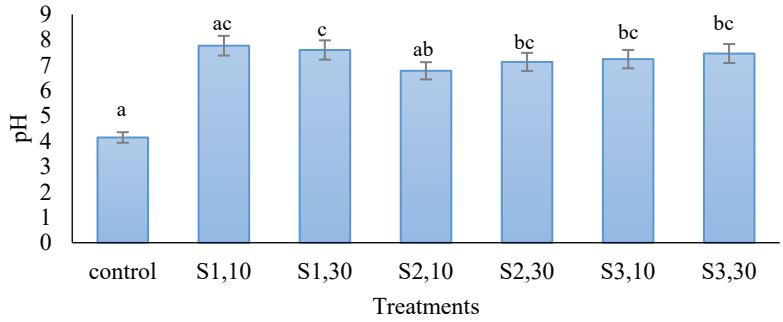


Fig. 5 Mean values of pH in control and six treatments: Different lowercase letters in the figure indicate significant difference $p < 0.05$

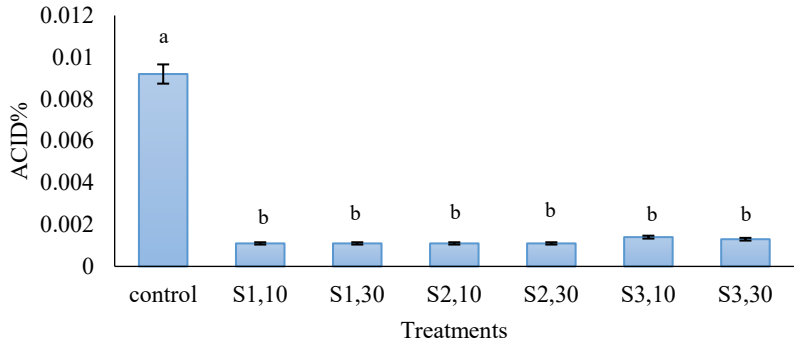


Fig. 6 Mean values of Acid% in control and six treatments: Different lowercase letters in the figure indicate significant difference $p < 0.05$

The vascular bundles of the bamboo charcoal are arranged in various sizes. The pore characteristics of this material can be macropore (> 50 nm), mesopore (2–50 nm) or micropore (< 2nm). This pore characteristic and the resistant coefficient of this material are affected by the temperature of carbonization process. As the temperature increases, the material will change from insulator to semiconductor or even to conductor, while the pore size is getting bigger. Thus, bamboo charcoal has the ability to absorb chemicals and substances from air and water. This excellent adsorption property is contributed by the van der Waals force (Isa et al., 2016). According to the results, the porosity of bamboo charcoal could adsorb ester, fusel oil and acid included in the sticky rice whisky and could reduce the percentage of alcohol.

Sensory analysis of whisky

The sensory analysis of whisky is tested by preparing questionnaire for the volunteers who taste the filtered and unfiltered whisky. They responded that the color of the whisky was unchanged and still clear after filtration, the odor of the unfiltered whisky was stronger than the filtered one, the taste of the filtered whisky was more preferable, and the quality of the filtered whisky was better. Moreover, they found cloudiness in unfiltered whisky but it was disappeared in filtered ones.

The research paper about filtration of vodka through charcoal also mentioned that the evaluators preferred samples that were subjected to filtration using the charcoal filled column; furthermore, slightly better rating scored the samples filtered at higher flow rates (Siříšťová et al., 2012).

As conclusion, Species 1 with 30ml/min reduces most alcohol% among all treatments. Species 1 with 10ml/min reduces most ester content; Species 2 with 30ml/min reduces most fusel oil; Species 1 with 10ml/min gives the highest pH value; Species 1 with 10ml/min, Species 1 with 30ml/min and Species 2 with 30ml/min reduces most acid content among other methods. It is assumed that reducing alcohol% is negative effect because the consumer might not like spirit with low alcohol%. For ester, fusel oil and acid, reducing their content is the positive effect because the more they contained, the more adverse effects consumers experienced. The literature about filtration of vodka through charcoal also described that the filtered vodka resulted in low alcohol% and reduced ester and acid content (Siříšťová et al., 2012).

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Acknowledgements

This paper and the research behind it would not have been possible without the exceptional support of my advisor, Pongsak Hengniran, Ph.D. His advice, suggestion and encouragement are invaluable and I would like to thank him for his patience and willingness in doing this research. I am also grateful to my thesis committee members for their useful comments and suggestion. I would like to express my special thanks to Kasetsart University Scholarships for ASEAN for Commemoration of the 60th Birthday Anniversary of Professor Dr. Her Royal Highness Princess Chulabhorn Mahidol for providing scholarship and funding to undertake this study. Finally, I wish to acknowledge the committee members who take responsibility to hold the 59th Kasetsart University Annual Conference for their checking and suggestion on my research paper.

References

Bharadwaj, A. V. S. L. 2015. Preparation and characterization of activated carbon from tire and biomass char and its applications in liquid phase adsorption. M.Sc. thesis, Faculty of Chemical Engineering, National Institute of Technology-Rourkela. Rourkela, India.

Fallin, E. A. 1942. Activated carbon treatment of raw whiskey. M.Sc. thesis, Faculty of Chemical Engineering, University of Louisville. USA.

Huang, P. H., Jhan, J. W., Cheng, Y. M., Cheng, H. H. 2014. Effects of carbonization parameters of moso-bamboo-based porous charcoal on capturing carbon dioxide. The Scientific World Journal 2014: 937867. doi.org/10.1155/2014/937867

Kaur, V., Kaur, B., Kaur, M., Kaur, S. 2018. Preparation and characterization of charcoal material derived from bamboo for the adsorption of sulfur contaminated water. Press: Natural and Formal. London, UK.

Nunes, C.A., Guerreiro, M.C. 2011. Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers. Química Nova. 34: 472–476. doi.org/10.1590/S0100-40422011000300020

Siřišťová, L., Přinosilová, Š., Riddellová, K., Hajšlová, J., Melzoch, K. 2012. Changes in quality parameters of vodka filtered through activated charcoal, Czech. J. Food Sci. 30: 474–482. doi.org/10.17221/361/2011-CJFS

The American Society for Testing and Materials. 1998. Annual book of ASTM standards. USA.

Visuphaka, K. 1985. The Role of Bamboo as a Potential Food Source in Thailand. Hangzhou, Republic of China.

Isa, S.S.M., Ramli, M.M., Hambali, N.A.M.A., Kasjoo, S.R., Isa, M.M., Nor, N.I.M., Khalid, N., Ahmad, N. 2016. Adsorption properties and potential applications of bamboo charcoal: A review. MATEC Web of Conferences. 78: 7. doi.org/10.1051/matecconf/20167801097

ผลของรูปแบบการให้ปุ๋ยต่อการคงเหลือของธาตุอาหารในดินและผลผลิตของน้ำยางพารา

Effects of fertilizer applying methods on the nutrient retention in soil and yield of rubber latex

ประพันธ์ สุวรรณมามูล, ณัฐฐา แสงนรินทร์ เหมจินดา*

Praphan Suwanmamoon, Natta Sangnarin Hamjinda*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Department of Environment Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University 12120, Thailand.

* Corresponding author, E-mail address: nutta_sh@tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของรูปแบบการให้ปุ๋ยเคมีแก่ยางพาราบนพื้นที่ราบตีนเขา บนเขา และเชิงเขา ระหว่างการให้ปุ๋ยแบบหว่านและการฝังกลบที่ความลึก 15 เซนติเมตร โดยปริมาณปุ๋ยอ้างอิงตามตารางค่าแนะนำของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ผลการศึกษาพบว่าการให้ปุ๋ยแบบฝังกลบให้ผลผลิตของน้ำยางสูงกว่าแบบหว่าน และไม่ใส่ปุ๋ย มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 38–47 45–77 และ 16–35 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และพบว่าการให้ปุ๋ยแบบฝังกลบมีปริมาณธาตุอาหาร (ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด) สะสมในดินน้อยกว่าการใส่ปุ๋ยแบบหว่าน โดยพบว่า ปริมาณผลผลิตน้ำยางแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง รูปแบบการให้ปุ๋ย และลักษณะภูมิประเทศ (p-value < .05) ส่วนปริมาณสารอาหารคงเหลือในดิน ส่วนใหญ่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งวิธีการให้ปุ๋ย ความลึกของดิน และสภาพภูมิประเทศ และพบว่าผลผลิตน้ำยางมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงแบบผกผันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับปริมาณคงเหลืออินทรียวัตถุในดิน (r = -0.286, p-value = .003) และมีความสัมพันธ์แบบตามกับค่าการนำไฟฟ้า (r = 0.415, p-value = .000)

คำสำคัญ: ผลผลิตน้ำยางพารา, ยางพารา, รูปแบบการให้ปุ๋ย, สารอาหารในดิน

Abstract

Effect of the fertilizer applying methods; spreading and hole buried (at 15 cm depth) applying methods on the rubber plantation was studied. The amount of fertilizer was based on the recommended guideline of the Rubber Research Institute, Department of Agriculture, with planted on 3 different topographies: foothill, hilltop, and valley. The results showed that the hole buried method gave significantly higher yields of latex than that of spreading and without applying fertilizer; 45–77, 45–77, and 16–35 kg/rai, respectively. Furthermore, hole buried applying method resulted in significantly less residual of soil nutrient (TN and TP) than that of the others. Additionally, latex yield was significantly different within the treatment of application and topographies. Most of residual nutrients were also significantly different among treatments of application, topographies, and soil depths (p-value < .05). Moreover, latex yield was significantly inversely negatively correlated with soil organic matter content (r = -0.286, p-value = .003), and was positively correlated with soil electrical conductivity (r = 0.415, p-value = .000)

Keywords: fertilizer applying methods, latex production, rubber tree, soil nutrient

คำนำ

อาชีพกรีดยางพาราถือเป็นอีกอาชีพหนึ่งที่ได้รับความสนใจจากเกษตรกรชาวจังหวัดเชียงราย เกษตรกรจำนวนมาก ได้หันมาปลูกยางพารา เนื่องจากอาชีพนี้ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น (การยางแห่งประเทศไทย จังหวัดเชียงราย, 2560) แต่การปลูกยางพาราเพื่อให้ได้ผลผลิตดีต้องคำนึงถึงปัจจัยหลาย ๆ ด้านเช่น ความเหมาะสมของพื้นที่ พันธุ์ยาง และการเลือกใส่ปุ๋ยให้เหมาะสม (สิทธิชัย, 2556) เพราะปุ๋ยเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญที่ช่วยให้ยางพาราโตเร็ว ให้ปริมาณน้ำยางดี ดังนั้นเกษตรกรควรมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความอุดมสมบูรณ์ของดินในพื้นที่เพาะปลูก โดยเฉพาะธาตุปุ๋ยหลักอันได้แก่ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เพื่อใส่ปุ๋ยให้ตรงกับความต้องการของดินทำให้ปุ๋ยมีประสิทธิภาพมากที่สุด (นุชนารถ, 2551) หากใส่ปุ๋ยในปริมาณที่มากเกินไปนอกจากจะสูญเสียค่าใช้จ่ายแล้ว ทำให้สมดุลของธาตุอาหารเปลี่ยนไปปริมาณปุ๋ยที่ไม่ถูกพืชนำไปใช้อาจจะตกค้างจนทำให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (ณัฏฐิณี, 2551) ตามมาได้อีกด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใส่ปุ๋ยยางพาราในช่วงเปิดกรีดตามค่าวิเคราะห์ดินทำให้ผลผลิตยางพาราเพิ่มขึ้นและลดค่าปุ๋ยลงได้ (นุชนารถ, 2551) นอกจากนี้หากใส่ปุ๋ยยางพาราตามค่าวิเคราะห์ดินแก่พาราก่อนเปิดกรีดทำให้ยางพาราโตเร็วและเปิดกรีดได้เร็วขึ้นประมาณ 3–5 เดือน (สิทธิชัย, 2556)

หลักการใส่ปุ๋ยเคมีเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพอย่างเต็มที่นั้น ต้องคำนึงถึงลักษณะดิน ปริมาณปุ๋ย ช่วงเวลาที่เหมาะสม และวิธีการใส่ปุ๋ย (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2544) ซึ่งการวิเคราะห์ค่าสารอาหารดินในแปลงปลูกทำให้สามารถประเมินปริมาณปุ๋ยได้ ระยะเวลาใส่ปุ๋ยสำหรับยางพาราที่เปิดกรีดแล้วคือ ช่วงต้นและปลายฤดูฝน โดยวิธีการใส่ปุ๋ยหลัก ๆ มี 2 วิธี วิธีแรกคือการหว่านปุ๋ยและการฝังกลบปุ๋ยลงไปในดิน กล่าวคือ การหว่านปุ๋ยจะทำให้ปุ๋ยกระจายตัวในดินอย่างสม่ำเสมอ วิธีนี้มีข้อดีคือทำได้ง่าย กระจายตัวในดินได้ดีและไม่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพง ส่วนข้อเสียคือปุ๋ยอาจเกิดการชะล้างออกจากหน้าดินได้ง่าย ซึ่งการให้ปุ๋ยแบบหว่านเหมาะกับพืชที่มีระบบรากตื้น วิธีที่สองคือการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบ วิธีการนี้จะช่วยให้การกระจายที่ดีขึ้นของปุ๋ยในดินเขตรากพืชที่จะดูดซึมได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจนและป้องกันการสูญเสียของสารอาหาร โดยการถูกชะล้างได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะภูมิประเทศมีผลต่อปริมาณการเคลื่อนย้ายสารอาหารในดิน พื้นที่ที่มีความชันมากมักจะประสบปัญหาการกร่อนของหน้าดิน โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนสารอาหารในดินจะถูกน้ำชะเคลื่อนที่จากที่สูงสู่พื้นที่ต่ำลง จากการศึกษาของ Zhang et al.(2011) พบว่าพื้นที่ที่มีความชันมากกว่า 5% มีปริมาณสารอาหารคงเหลือในดิน (OM, TN และ TP) ต่ำกว่าพื้นที่ที่มีความชัน 0–5% และพื้นที่บนเขามีโอกาศสูญเสียอินทรียวัตถุและไนโตรเจนได้มากที่สุด โดยมักจะเคลื่อนย้ายมาสะสมบริเวณเชิงเขา (Zhang et al., 2015)

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการใส่ปุ๋ยเคมีแก่ยางพาราตามตารางค่าวิเคราะห์ดินสำหรับยางพาราหลังเปิดกรีดแล้วตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร โดยมีวิธีการใส่ปุ๋ยแบบหว่านและแบบฝังกลบในสวนยางพาราที่มีลักษณะภูมิประเทศแตกต่างกัน คือ พื้นที่ราบตีนเขา พื้นที่ราบบนเขา และพื้นที่เชิงเขา ในตำบลผางาม อำเภอเวียงชัย จังหวัดเชียงราย เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการคงเหลือของธาตุอาหารในดินและผลผลิตของน้ำยางพารา ทั้งนี้ผลการศึกษาจะได้เป็นประโยชน์ในการแนะนำให้เกษตรกรในพื้นที่ใช้เป็นทางเลือกในการดูแลรักษาสวนยางพาราต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

เลือกแปลงปลูกยางพาราจำนวน 3 แปลงตามลักษณะภูมิประเทศ คือ แปลงที่ 1 พื้นที่ราบตีนเขา (UTM 47N; X = 608481, Y = 2196922) ความชัน 5–7 % แปลงที่ 2 พื้นที่บนเขา (UTM 47N; X = 608675, Y = 2197154) ความชัน 3–7 % แปลงที่ 3 พื้นที่เชิงเขา (UTM 47N; X = 610284, Y = 2195522) ความชัน 16–20 % แปลงทดลองทั้งหมดตั้งอยู่ในเขตตำบลผางาม อำเภอเวียงชัย จังหวัดเชียงราย โดยยางพารามีสายพันธุ์เดียวกันคือ RRIM 600 การเจริญเติบโตของยางพาราสม่ำเสมอ ซึ่งอยู่ในช่วงเปิดกรีด (อายุ 14 ปี)

แผนการทดลอง

ออกแบบการทดลองในแต่ละแปลงแบบบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) จำนวน 3 ทรีตเมนท์ คือ การใส่ปุ๋ยแบบหว่านระหว่างแถว แบบฝังกลบระหว่างแถว และชุดควบคุมที่ไม่มีการใส่ปุ๋ย โดยศึกษาข้อมูลจากยางพาราจำนวน 8 แถว (2 แถว/ทรีตเมนต์ + แนวกันชน 2 แถว) แถวละ 36 ต้น โดยลักษณะภูมิประเทศ คือ พื้นที่ราบตีนเขา พื้นที่ราบบนเขา และพื้นที่เชิงเขา เป็น block จำนวน 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่างดินเพื่อทดสอบลักษณะสมบัติดินทางกายภาพ-เคมีของดิน 2 ครั้ง คือ ก่อนการใส่ปุ๋ยเพื่อหาปริมาณการใส่ปุ๋ยตามตารางค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร และหลังการใส่ปุ๋ยเป็นเวลา 45 วัน จุดเก็บตัวอย่างในแต่ละทรีตเมนต์กระจายสลับกันแบบฟันปลา จำนวน 4 จุด/ทรีตเมนต์ ที่ระดับความลึก 0–5 เซนติเมตร > 5–15 เซนติเมตร และ > 15–30 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างดินก่อนการใส่ปุ๋ยเท่ากับ 3 แปลง × 4 จุดเก็บตัวอย่าง × 3 ระดับความลึก เท่ากับ 36 ตัวอย่าง และ จำนวนตัวอย่างดินหลังการใส่ปุ๋ยเท่ากับ 3 แปลง × 3 รูปแบบการใส่ปุ๋ย × 4 จุดเก็บตัวอย่าง × 3 ระดับความลึก เท่ากับ 108 ตัวอย่าง และเก็บข้อมูลปริมาณผลผลิตยางพาราในเป็นระยะเวลา 6 เดือน ช่วงเดือน กันยายน พ.ศ. 2562–กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

การใส่ปุ๋ยแบบหว่านระหว่างแถว 2 แถว เว้นระยะที่ไม่ใส่ปุ๋ย 2 แถว และการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร โดยขุดหลุมห่างจากต้นระหว่างแถวระยะ 1 เมตร ขนาดความกว้างของหลุม 1×1 เมตร ทำการโรยปุ๋ยให้กระจายทั่วหลุมเท่า ๆ กันแล้วเอาดินที่ขุดขึ้นมาถมกลบเหมือนเดิม

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

นำตัวอย่างดินที่เก็บได้มาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยต้องตากดินผึ่งลมให้แห้ง จากนั้นบดและร่อนผ่านตะแกรงแยกขนาด 2 มิลลิเมตร และ เก็บใส่ถุงพลาสติกและนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ –20 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติดินทางกายภาพ-เคมีของดิน ดังนี้ ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) (น้ำ:ดิน; 5:1) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) (น้ำ:ดิน; 5:1) อินทรียวัตถุ (Organic matter; OM) (จำเป็น, 2547) ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen; TN) (Black, 1965) และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus; TP) (Black, 1965)

ปริมาณผลผลิตยางพาราบันทึกจากการเก็บผลผลิต โดยแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ แปลงที่ใส่ปุ๋ยแบบหว่าน แปลงที่ใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบ และแปลงที่ไม่ใส่ปุ๋ย ผลผลิตยางพาราผ่านการทำก้อนแข็งโดยใส่น้ำกรดสำหรับอุตสาหกรรมยางพาราโดยเฉพาะ ชั่งน้ำหนักผลผลิตแต่ละแปลงที่เก็บในแต่ละรอบตลอดระยะเวลาการกรีดระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562–กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563 โดยหาค่าเฉลี่ยของแต่ละแปลงเพื่อนำมาเปรียบเทียบ

การวิเคราะห์ข้อมูล

เปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารที่คงเหลือในชั้นดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ และนำข้อมูลลักษณะสมบัติดินทางกายภาพ-เคมีของดินและผลผลิตยางพาราวิเคราะห์ความแปรปรวน ทางสถิติตามแผนการทดลองแบบ RCBD และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม Minitab version 13

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะสมบัติดินก่อนการใส่ปุ๋ย

ลักษณะภูมิประเทศที่ตั้งของสวนยางพาราแปลงที่ 1 พื้นที่ราบตีนเขา และ 2 พื้นที่บนเขา จัดเป็นพื้นที่ลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย ส่วนแปลงที่ 3 พื้นที่เชิงเขาจัดเป็นพื้นที่ลูกคลื่นลอนชัน กล่าวคือมีความชันของพื้นที่อยู่ระหว่าง 2–20% (กรมพัฒนาที่ดิน, ม.ป.ป) จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติดินในสวนยางพาราก่อนการใส่ปุ๋ยได้ผลดัง Table 1

ค่าปฏิกิริยาดินในสวนยางพาราทั้ง 3 แปลง มีสภาพเป็นกรดจัดมากถึงเป็นกรดรุนแรงมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.96–4.29, 3.97–4.13, และ 4.52–4.96 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ดารณี (2549) ที่ได้รายงานไว้ว่าสมบัติทางเคมีของดินในพื้นที่ 11 จังหวัดภาคเหนือ มีความเป็นกรดค่อนข้างสูง คืออยู่ในช่วง 4.6–5.3 แล้วก็ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ อลงกรณ์ และคณะ (2559) โดยสภาพพื้นที่ที่มีความลาดชันอยู่ในช่วง 16–30 % ดินจะมีความเป็นกรดจัด pH 5.53 อย่างไรก็ตามยางพาราสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีค่า pH 3.0–8.0 (George and Jacob, 2000) ในขณะเดียวกัน ค่าการนำไฟฟ้าในดินทุกแปลงมีค่าต่ำ 0.01–0.45 ไมโครซิเม็น/เซนติเมตรซึ่งหมายถึงดินมีปริมาณสารอาหารที่ละลายน้ำได้อยู่ต่ำ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าสูง (นุชนารถ, 2551) เมื่อพิจารณาตามความลึกของดินพบว่าดินชั้นบนมีความอุดมสมบูรณ์ของดินมากที่สุด โดยมีค่าสูงถึง 92±0.00–5.25±0.43% และมีค่าลดลงตามความลึกของดิน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินแต่ละแปลงมีค่าค่อนข้างต่ำถึงต่ำมาก อยู่ในช่วง 0.06–0.40%, 0.12–0.22% และ 1.27–1.30% ตามลำดับ และค่าฟอสฟอรัส TP ก็อยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก มีผลอยู่ในช่วง 1.38–1.42 %, 1.33–1.49% และ 1.27–1.30% ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปราโมทย์ และคณะ (2558) ได้สรุปไว้ว่าดินที่มีความเป็นกรด จะมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และยังสอดคล้องกับรายงานของวิลาสลักษณ์ และคณะ (2556) ว่าดินในจังหวัดน่าน มีค่า pH 4.8–5.3 อินทรียวัตถุ 0.97–2.68 % อยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูง ไนโตรเจน 0.05–0.13 % อยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงปานกลาง ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ไม่พบ อยู่ในเกณฑ์ต่ำ จากผลดังกล่าว จึงได้นำค่าไปเปรียบเทียบกับตารางค่าวิเคราะห์ดินสำหรับยางพาราหลังเปิดกรีดของกรมวิชาการเกษตร เพื่อเลือกใช้สูตรปุ๋ยให้เหมาะสมกับลักษณะของดินในพื้นที่ทดลอง ซึ่งก็ได้เลือกใช้แม่ปุ๋ยสูตร 3 สูตร ได้แก่ 46–0–0, 18–46–0และ 0–0–60 ผสมกันในปริมาณ 40, 16 และ 28 กิโลกรัมต่อไร่ และใช้ใส่ต้นยางพาราในอัตราปุ๋ย 1,200 กรัมต่อต้น (นุชนารถ, 2551)

Table 1 Soil properties in difference soil depths and topographies

Topographies	Depth	Soil Properties				
		pH	EC (µs/cm)	OM (%)	TN (%)	TP (%)
Foothill	0–5 cm	4.29±0.31	0.05±0.01	2.92±0.00	0.40±0.40	1.42±0.13
	>5–15 cm	4.01±0.26	0.04±0.01	3.61±0.41	0.10±0.03	1.42±0.15
	>15–30 cm	3.96±0.12	0.03±0.01	3.20±0.03	0.06±0.01	1.38±0.08
Hilltop	0–5 cm	4.00±0.12	0.05±0.01	4.32±0.14	0.16±0.06	1.33±0.12
	>5–15 cm	3.97±0.20	0.04±0.01	3.19±0.14	0.12±0.06	1.49±0.06
	>15–30 cm	4.13±0.24	0.45±0.00	2.23±0.11	0.22±0.05	1.37±0.16
Valley	0–5 cm	4.96±0.19	0.01±0.02	5.25±0.43	1.30±0.19	1.30±0.19
	>5–15 cm	4.52±0.08	0.04±0.00	3.40±0.67	1.27±0.06	1.27±0.06
	>15–30 cm	4.55±0.19	0.03±0.01	2.83±0.53	1.28±0.15	1.28±0.15

ปริมาณการคงเหลือของธาตุอาหารในดินหลังการใส่ปุ๋ย

หลังจากใส่ปุ๋ยรูปแบบการหว่านและฝังกลบแก่ต้นยางพาราเป็นเวลา 45 วัน ได้วิเคราะห์หาปริมาณการคงเหลือของธาตุอาหารในดิน ผลการวิเคราะห์แสดงดัง Fig. 1 โดยค่าปฏิกิริยาของดินของแต่ละแปลงนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน Fig. 1A โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.11–6.03, 3.98–5.87 และ 4.63–5.09 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับก่อนการใส่ปุ๋ย โดยพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าปฏิกิริยาของดินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเฉพาะในส่วนของระดับความลึก (depth) และ วิธีการใส่ปุ๋ย (type)×ระดับความลึก (depth) เท่านั้น ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าสารละลายดิน Fig. 1B พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.22–3.29, 0.25–3.42 และ 0.02–0.05 ไมโครซิเม็นต่อเซนติเมตร ซึ่งแปลงที่มีการใส่ปุ๋ยมีค่าสูงขึ้นจากดินก่อนการใส่ปุ๋ย แสดงให้เห็นว่าในดินมีปริมาณไอออนละลายในน้ำสูงขึ้นซึ่งมาจากปุ๋ยนั่นเอง โดยมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (p-value < .01) ในส่วนของปัจจัยด้าน วิธีการใส่ปุ๋ย (type) ระดับความลึก (depth) และ วิธีการใส่ปุ๋ย (type) × ระดับความลึก (depth) สำหรับปริมาณอินทรียวัตถุในชั้นดิน Fig. 1C พบว่า มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.76–3.35%, 0.97–2.85% และ 0.82–3.82% ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณลดลงจากดินก่อนการใส่ปุ๋ย แสดงให้เห็นว่าอินทรีย์วัตถุในดินมีการสลายตัวระหว่างการทดลอง โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติของวิธีการใส่ปุ๋ย (type) ระดับความลึก (depth) และตำแหน่งของแปลงตัวอย่าง (topography) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่คงเหลือในชั้นดินในแปลงที่มีการใส่ปุ๋ยแบบหว่านทั้ง 2 แปลง มีค่าค่อนข้างสูงกว่าการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบและแปลงที่ไม่มีการใส่ปุ๋ย Fig. 1D โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.58–0.85%, 0.09–0.59% และ 0.14–0.63% ตามลำดับ ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า วิธีการใส่ปุ๋ย (type) ระดับความลึก (depth) และตำแหน่งของแปลงตัวอย่าง (topography) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (p-value = .000, .004 และ.002 ตามลำดับ) สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่คงเหลือในชั้นดินนั้น Fig. 1E พบว่า มีค่าเฉลี่ยคงเหลือในชั้นดินของแปลงที่มีการใส่ปุ๋ยแบบหว่านมีค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับแปลงที่มีการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบและแปลงที่ไม่มีการใส่ปุ๋ย โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.1175–6.03%, 0.4875–2.28% และ 1.33–1.64% โดยพบว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในส่วน

ของ วิธีการใส่ปุ๋ย (type) ระดับความลึก (depth) ตำแหน่งของแปลงตัวอย่าง (topography) และ วิธีการใส่ปุ๋ย (type) × ระดับความลึก (depth)

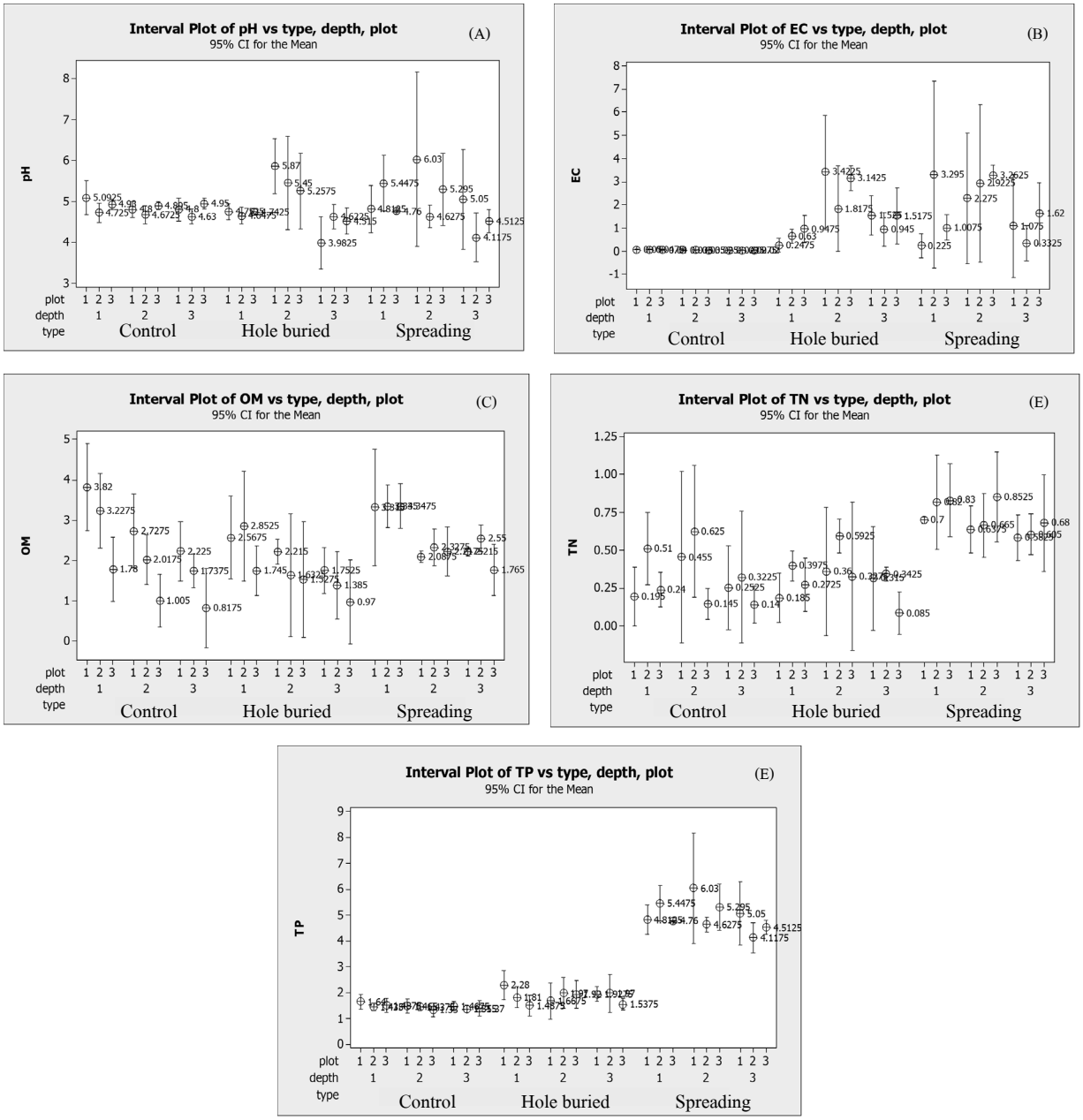


Fig.1 Soil properties after applying chemical fertilizer; pH (A), EC (B), Organic matter (OM) (C), Total nitrogen (TN)(D), and Total phosphorus (TP)(E)

Note: Plot 1: Foothill topography; Plot 2: Hilltop topography; Plot 3: Valley topography; Depth 1: 0–5 cm; Depth 2: >5–15 cm; Depth 3: >15–30 cm; Type Control: without fertilizer; Type hole buried: hole buried method; Type spreading: spreading method

ทั้งนี้การใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบนั้น ทำให้พืชสามารถนำธาตุอาหารไปใช้ได้เร็วเพราะอยู่ในระดับที่มีจำนวนรากพืชอยู่มาก จึงทำให้มีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสคงเหลือในชั้นดินน้อยกว่า ส่วนการใส่ปุ๋ยแบบหว่านการกระจายของปุ๋ยบนพื้นดินมีค่ามาก พืชนำไปใช้ได้น้อยเนื่องจากรากของพืชนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในดิน จึงมีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงกว่าแบบฝังกลบ

ผลผลิตยางพารา

จากการเก็บผลผลิตในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2562–เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563 ผลแสดงดัง Fig. 2 เปรียบเทียบน้ำหนักผลผลิตน้ำยางพาราแบบยางถ้วยก้อน พบว่า ปริมาณผลผลิตสะสมในแปลงที่ใส่ปุ๋ยให้ปริมาณน้ำหนักผลผลิตที่สูงกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยอย่างชัดเจน Fig. 2A นอกจากนี้ยังพบว่า ในส่วนของผลผลิตน้ำยางนั้น พบว่าในแต่ละประเภทการใส่ปุ๋ยนั้นมีความผันแปรน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 38.25–46.52, 44.92–77.25 และ 16.33–35.08 กิโลกรัมต่อไร่ โดยพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างวิธีการใส่ปุ๋ย (type) กล่าวคือ การใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบให้ผลผลิตยางพาราเฉลี่ยสูงกว่าชุดควบคุมและการใส่ปุ๋ยแบบหว่าน 2.37 และ 1.17 เท่า ตามลำดับ และตำแหน่งของแปลงตัวอย่าง (topography) ซึ่งยางพาราที่ปลูกในพื้นที่เชิงเขาที่มีการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบให้ผลผลิตสูงสุด ถึง 77.25 กิโลกรัมต่อไร่ ลักษณะภูมิประเทศที่ให้ผลผลิตต่ำที่สุดในทุกรูปแบบการใส่ปุ๋ยคือพื้นที่บนเขา ที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะว่าเกิดการเคลื่อนย้ายสารอาหารจากพื้นที่บนเขาและสะสมบริเวณเชิงเขา (Zhang et al., 2015) และเมื่อทดสอบค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ กับปริมาณผลผลิตยางพาราถ้วยก้อน (Table 2) พบว่าปริมาณผลผลิตมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงแบบผกผันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (r = -0.286; p-value = 0.003) ซึ่งหมายความว่าเมื่อผลผลิตยางพารางเพิ่มขึ้น อินทรียวัตถุในดินจะมีการลดลง แสดงให้เห็นว่าอาจมีการสลายตัวของสารอินทรียวัตถุให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ (mineralization) ดังนั้นเพื่อรักษาระดับอินทรียวัตถุเกษตรกรควรมีการปลูกพืชคลุมดินโดยเฉพาะพืชตะกูลถั่วระหว่างแถวของยางพารา และมีความสัมพันธ์แบบตามกับปริมาณค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายดิน (r = 0.415; p-value = 0.000) ซึ่งหมายถึงในสารละลายดินต้องมีปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมจึงจะทำให้ผลผลิตยางพาราเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายดินมีความสัมพันธ์แบบตามกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (r = 0.038; p-value = 0.000) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (r = 0.435; p-value = 0.000)

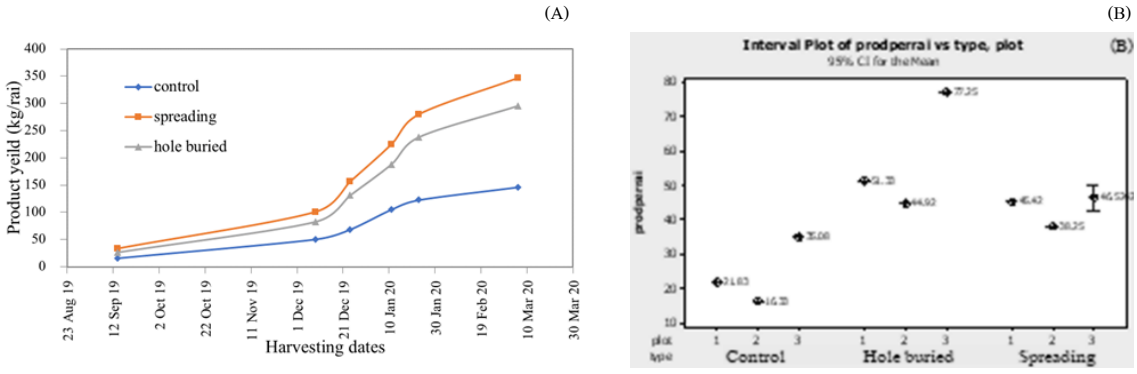


Fig. 2 Rubber yield accumulation by fertilizer applying methods (A) and average rubber yield by fertilizer applying methods and topographies (B)

Note: Plot 1: Foothill topography; Plot 2: Hilltop topography; Plot 3: Valley topography; Type Control: without fertilizer; Type hole buried: hole buried method; Type spreading: spreading method

Table 2 Pearson correlation between soil properties and rubber product yield

Parameter	TN	TP	pH	OM	EC
TP	0.078				
	0.000				
pH	0.205	0.299			
	0.033	0.002			
OM	0.323	0.279	-0.003		
	0.001	0.003	0.979		
EC	0.038	0.435	0.460	-0.013	
	0.000	0.000	0.000	0.893	
Product	-0.100	0.123	0.051	-0.295	0.414
	0.301	0.205	0.602	0.002	0.000

Note: Cell Contents: Pearson correlation and *p*-Value

สรุป

จากการศึกษาลักษณะสมบัติของดินก่อนการใส่ปุ๋ยดินทั้ง 3 แปลง คือ พื้นที่ราบบนเขา พื้นที่ตีนเขา และพื้นที่เชิงเขา มีปริมาณอินทรียวัตถุสูง แต่มีปริมาณธาตุอาหารทั้งไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำ เมื่อใส่ปุ๋ยตามค่าทดสอบดิน ใช้ปุ๋ยสูตร 46–0–0,18–46–0 และ 0–0–60 ผสมกันในปริมาณ 40, 16 และ 28 กิโลกรัมต่อไร่ และใช้ใส่ต้นยางพาราในอัตราปุ๋ย 1,200 กรัมต่อต้น โดยเปรียบเทียบระหว่างการใส่ปุ๋ยแบบหว่าน และแบบฝังกลบใต้ดินที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร หลังจากใส่ปุ๋ยแล้วเป็นระยะเวลา 45 วัน ปริมาณของธาตุอาหารที่คงเหลือในดินโดยวิธีการใส่ปุ๋ยแบบหว่านมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบและพื้นที่ที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ย สำหรับกรณีของระดับความลึกนั้น วิธีการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกันจะให้ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสะสมทั้งหมดมีความแตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้ ยังพบว่าในตำแหน่งของแปลงตัวอย่างที่ต่างกัน (พื้นที่ราบ พื้นที่บนเขา และพื้นที่เชิงเขา) นั้น มีแนวโน้มของปริมาณการสะสมและรวมถึงการเปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกของดินที่คล้ายคลึงกัน จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ factorial block design โดยกำหนดให้วิธีการใส่ปุ๋ย ระดับความลึก และตำแหน่งของแปลงตัวอย่าง พบว่า ทุกปัจจัย รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตำแหน่งของแปลงตัวอย่างนั้น มีผลทำให้ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value < .05) ในส่วนของผลผลิต พบว่าแปลงที่ใช้วิธีการใส่ปุ๋ยแบบฝังกลบให้ปริมาณผลผลิตยางพาราถ้วยก้อนสูงกว่าแปลงที่ใส่ปุ๋ยแบบหว่าน และแปลงที่ไม่ใส่ปุ๋ย

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพระพุทธเจ้า นายประพันธ์ สุวรรณมามูล ขอสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณ ต่อองค์สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี ที่ทรงมีพระเมตตามอบทุนการศึกษานี้ แก่ข้าพเจ้า เพื่อได้ศึกษาเล่าเรียนและทำงานวิจัย จนสำเร็จลุล่วงผ่านไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณคณะคณาจารย์ในภาควิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทุก ๆ ท่าน ที่คอยให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และให้การช่วยเหลือ

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. ม.ป.ป. ข้อมูลการจัดการดิน. https://www.ldd.go.th/Web_Soil/clay.htm, 30 มกราคม 2564.

การยางแห่งประเทศไทย จังหวัดเชียงราย. 2560. ระบบฐานข้อมูลยางพารา. http://emarket.raot.co.th/rdu/, 14 พฤษภาคม 2562.

คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา. 2544. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา, คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

จำเป็น อ่อนทอง. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่, สงขลา.

ณัฏฐิณี ภัทรกุล. 2551. ความแปรปรวนทางพันธุกรรมในความทนทานต่อดินกรดในพันธุ์ข้าวไร่พื้นเมือง. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ดารณี โกสัยเสวี. 2549. การปลูกยางพาราบนที่สูงภาคเหนือ. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

นุชนารถ กังพิสดาร. 2551. การใช้ปุ๋ยยางพาราตามค่าวิเคราะห์ดิน. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ปราโมทย์ ทิมขำ, สุภาพร ชุติประพฤทธิ์, ประกิต ทิมขำ. 2558. การใช้ปุ๋ยตามค่าทดสอบดินร่วมกับการให้น้ำช่วงฤดูแล้งในยางพาราก่อนเปิดกรีด. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, น่าน.

วิลาสลักษณ์ ว่องไว. 2556. ทดสอบเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตยางพารา พื้นที่ภาคเหนือตอนบน. กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สิทธิชัย บุญมณี. 2556. เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยตามค่าทดสอบดินและปุ๋ยเชิงผสมสูตร 20 – 8 – 20 ในยางพาราก่อนเปิดกรีด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. (2546). การผลิตยางธรรมชาติสงขลา. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อลงกรณ์ ขุนไกร, สุรชาติ เพชรแก้ว, เชาวน์ ยงเฉลิมชัย. (2559). ผลของรูปแบบการใช้ที่ดินและสภาพภูมิ ประเทศต่อความความอุดมสมบูรณ์ของดิน บริเวณลุ่มน้ำทุ่งใหญ่ จังหวัดสงขลา. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เขตหาดใหญ่, สงขลา.

Black, C.A. (Ed.). 1965. Method of soil analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy Inc Publisher, Madison, Wisconsin, USA.

George P.J., Jacob, C.K. (Eds). 2000. Natural rubber: Agromanagement and crop processing. Rubber Research Institute of India, Rubber board, Kottayam, India.

Zhang, S., Jiang, L., Liu, X., Zhang, X., Fu, S., Dai, L. 2015. Soil nutrient variance by slope position in a mollisol farmland area of northeast China. Chin. Geogra. Sci. 26: 508–517. doi.org/10.1007/s11769-015-0737-2.

Zhang, S., Zhang, X., Huffman, T., Liu, X., Yang, J. 2011. Influence of topography and land management on soilnutrients variability in northeast China. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 89: 427–438.

การพัฒนาสถานีตรวจวัด และแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนสำหรับบริหารจัดการพื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจ กรณีศึกษาสวนมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ตำบลพันชาลี อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก

The development of monitoring station and smartphone applications for economics crops management: A case study of The Yellow mango orchards in Phan Chali Subdistrict, Wang Thong District, Phitsanulok

ธิติพงศ์ บุญตัน*, ภาสุระ ศรีสุระ, กฤตพร เอี่ยมสอิ้ง, ธนวัฒน์ เมฆนิล, วรฤทธิ์ ประเสริฐ

Thitipong Boontan*, Pasura Srisura, Kritapon Iamsaing, Thanawat Makenin, Worarit Prasert

กองการถ่ายทอดเทคโนโลยี สถานภูมิภาคเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ ภาคเหนือตอนล่าง มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

Division of Technology Transfer, Regional Center of Geo-Informatics and Space Technology, Lower Northern Region, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: thitipongb@nu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาการพัฒนาสถานีตรวจวัดและแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน สำหรับบริหารจัดการพื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจในสวนมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อพัฒนาสถานีตรวจวัด พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับบริหารจัดการพื้นที่เพาะปลูกและส่งเสริมให้เกษตรกรสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาสถานีตรวจวัด เป็นการพัฒนาเซนเซอร์ ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในดิน เซนเซอร์วัดค่าในดินและเซนเซอร์วัดค่าความเข้มของแสงแดด เพื่อใช้เก็บข้อมูลที่เป็นปัจจัยในกระบวนการผลิตและดูแลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน ทำให้เกษตรกรสามารถทราบข้อมูลต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำและเป็นปัจจุบัน เพื่อให้สามารถวางแผนการบริหารจัดการปัจจัยในกระบวนการผลิตและการดูแลพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เกษตรอัจฉริยะ, เซนเซอร์, มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, แอปพลิเคชัน

Abstract

In this research, the researchers studied the development of a monitoring station and smartphone applications for economics crops management in the Yellow mango orchards. The purposes of this study were developed the monitoring station, applications for plantation management and promoted farmers can be applied technology effectively. The development a monitoring station is sensor development consists of Temperature and Air humidity sensor, Temperature and Soil humidity sensor, Soil sensor and sunlight intensity sensor for collected data factors of production process in the Yellow mango orchards and use the data for developed smartphone application. Therefore, the famer received accuracy and real-time information for managed factors of production process and effective plantation.

Keywords: application, internet of thing, sensor, smart farm, yellow mango

คำนำ

การพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรรมที่เติบโตอย่างก้าวกระโดด ทำให้ภาคการเกษตรต้องมีการปรับตัว การบริหารจัดการอย่างไรให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีความแม่นยำมากที่สุด ทำให้ต้องอาศัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมสมัยใหม่เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิต เกษตรอัจฉริยะได้เข้ามามีบทบาทในภาคการเกษตร โดยการนำเอาเทคโนโลยีและนวัตกรรมด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) มาใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เพื่อควบคุมปัจจัยการผลิตให้เกิดความแม่นยำและตัดสินใจบนพื้นฐานข้อมูลที่ถูกต้อง ซึ่งข้อมูลด้านเทคโนโลยีด้านการเกษตรสมัยใหม่มีแพร่หลายมากขึ้น

จึงเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการเกษตร โดยนำเทคโนโลยีและนวัตกรรรมที่มีออกไปถ่ายทอดให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มพัฒนาการผลิตมะม่วงเพื่อการส่งออก ตั้งอยู่ในพื้นที่ตำบลพันชาลี อำเภอวังทอง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีชื่อเสียงในการผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเพื่อการส่งออก และมีความสำคัญทางเศรษฐกิจของจังหวัดพิษณุโลก ทีมผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาสถานีตรวจวัดทางการเกษตรรวมถึงแอปพลิเคชันทางการเกษตรสำหรับวางแผนและสนับสนุนการบริหารจัดการสวนมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองให้กับกลุ่มเกษตรกรในพื้นที่ได้ใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยสถานีตรวจวัดทางการเกษตรจะประกอบด้วยเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดค่าปัจจัยต่าง ๆ ภายในสวนมะม่วง เช่น เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ อุณหภูมิและความชื้นในดิน ค่าความเป็นกรดด่าง ปริมาณธาตุอาหารในดิน และค่าความเข้มของแสงแดด ซึ่งค่าปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการวางแผนการผลิต เช่น การเตรียมต้น การติดดอก และการออกผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง โดยข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดจะถูกส่งถ่ายไปยังฐานข้อมูลกลาง และดึงข้อมูลมาแสดงผลบนหน้าแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน ทำให้เกษตรกรสามารถรับรู้ข้อมูลแบบเรียลไทม์ และสามารถบริหารจัดการการผลิตได้อย่างทันที ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดจะถูกเก็บรวบรวมไว้ในฐานข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลสถิติ และสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ คาดการณ์เพื่อวางแผนการผลิตในอนาคตได้

อุปกรณ์และวิธีการ

ลงพื้นที่สำรวจความคิดเห็นกลุ่มเกษตรกรถึงความต้องการหรืออุปสรรคที่เกิดจากการบริหารจัดการพื้นที่ปลูกมะม่วง เพื่อหาแนวทางในการช่วยเหลือและหาทางออก โดยนำเอาเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เข้าไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ การศึกษาครั้งนี้เป็นพื้นที่แปลงมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มพัฒนาการผลิตมะม่วงเพื่อการส่งออกบ้านคลองวังเรือ มีเนื้อที่ประมาณ 5 ไร่ ลักษณะแปลงเป็นพื้นที่ราบมีมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองประมาณ 300 ต้น ระยะห่างปลูกระหว่างต้น 6x6 เมตร อายุต้นมะม่วงประมาณ 6–8 ปี

การพัฒนาแหล่งพลังงาน เลือกแผงโซล่าเซลล์แบบ Monocrystalline Silicon Solar Cells ขนาด 40 W เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยโซล่าชาร์จเจอร์ (Solar Controller Charge) จะควบคุมการชาร์จประจุไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์เข้ากับแบตเตอรี่ เมื่อการชาร์จประจุไฟฟ้ากับแบตเตอรี่เต็มตัวชาร์จคอนโทรลเลอร์ ก็จะตัดการชาร์จประจุโดยอัตโนมัติ หลังจากที่แบตเตอรี่มีพลังงานไฟฟ้า โซล่าชาร์จคอนโทรลเลอร์ จะจำหน่ายกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า 12 โวล์ท ไปยังสถานีตรวจวัดทางการเกษตรที่มีแผงวงจรที่ถูกติดตั้งภายในแปลงทั้ง 5 สถานี โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาแหล่งพลังงาน โดยแต่ละสถานีจะถูกติดตั้ง

อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า Inverter ภายในแผงวงจรเพื่อไม่ให้แรงดันไฟฟ้าเกินกำหนดที่อุปกรณ์จากสถานีตรวจวัดทางการเกษตรจะรับได้ ซึ่งวิธีการพัฒนาแหล่งพลังงานได้สอดคล้องกับ กองพล (2560)

การออกแบบอุปกรณ์ที่มีตัวเซนเซอร์จำนวนหลายตัวที่ใช้ในการตรวจวัดสภาพแวดล้อมทางด้านการเกษตร สถานีตรวจวัดคุณภาพดินจำนวน 4 สถานี ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้ (1) เซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิในดิน SHT20; (2) ตัวรับตำแหน่งจีพีเอส GY-NEO6MV2; (3) เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรดด่างและความอุดมสมบูรณ์ในดิน Doctor Plant- Soil pH & Fertility; และ (4) ตัวส่งข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว LoRa32u4 II ดัง Fig. 1 (A) และสถานีสำหรับตรวจวัดคุณภาพอากาศ จำนวน 1 สถานี ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้ (1) เซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิในอากาศ DHT22; (2) เซนเซอร์ตรวจวัดค่าความเข้มแสงแดด LDR Photoresistor; และ (3) ตัวส่งข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว LoRa32u4 II ดัง Fig. 1 (B) การออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์เพื่อตรวจวัดและแสดงผลคุณภาพของดิน และคุณภาพอากาศภายในแปลง โดยใช้เทคโนโลยีเครือข่าย LoRaWan ซึ่งสามารถติดตามผลของการตรวจวัดได้แต่ละสถานีตรวจวัด ส่วนอุปกรณ์ตรวจวัดประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่รับค่าจากเซนเซอร์ต่าง ๆ (Client) จำนวน 5 สถานีตรวจวัด และส่งค่าไปยังตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่รับค่าจาก (Master) สามารถส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายได้ ซึ่งการต่อวงจรของสถานีตรวจวัดทั้ง 5 สถานี การพัฒนาเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในดินสอดคล้องกับ จิตติพงษ์ (2561) ที่ได้ศึกษาต้นแบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่สามารถควบคุมการจ่ายน้ำภายในแปลง การพัฒนาเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศสอดคล้องกับ วีรศักดิ์ (2561) ที่ได้ออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับโรงเพาะเห็ด และการพัฒนาเซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรดด่างและธาตุอาหารในดินสอดคล้องกับ ปองพล (2561) ที่ศึกษาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนสภาพดินในสวนทุเรียน ส่วนการพัฒนาสถานีตรวจวัดทั้ง 5 สถานี จะมีการเชื่อมต่อเซนเซอร์แต่ละตัวเข้ากับ LoRa32u4 II ซึ่งการเลือกใช้เซนเซอร์ต่าง ๆ เพื่อพัฒนาสถานีตรวจวัดทั้ง 5 สถานี งานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้อุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพง ง่ายต่อการพัฒนาและเกษตรกรสามารถนำไปใช้ได้จริง

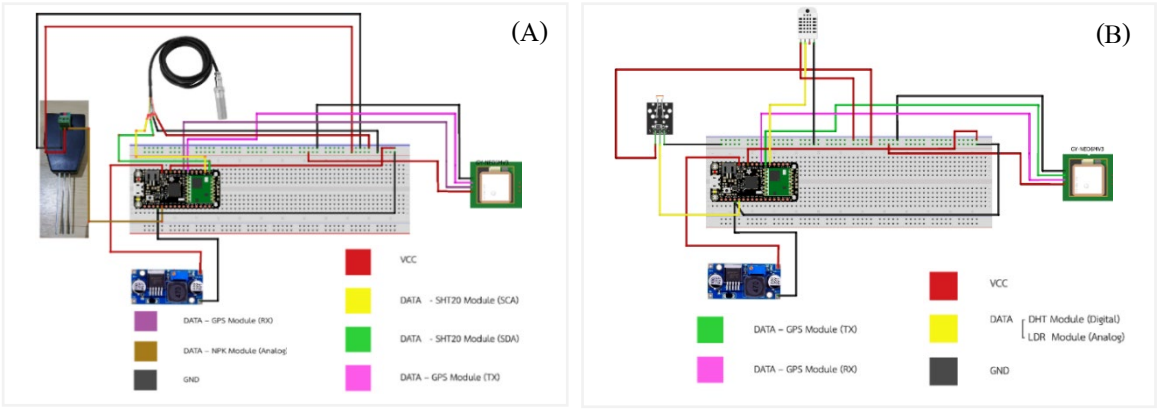


Fig. 1 Soil quality station circuit connection (A), Weather station circuit connection (B)

การออกแบบระบบสถานีตรวจวัดจะใช้ชุดไมโครคอนโทลเลอร์ 2 ชนิด คือ บอร์ด LoRa32U4 II เป็น Client และบอร์ด LoRa SX1278 เป็น Master ซึ่งไมโครคอนโทลเลอร์ทั้ง 2 ชนิดจะทำงานด้วย ชิพ esp32 ผ่านอินเทอร์เน็ตไร้สาย เมื่อไมโครคอนโทลเลอร์เริ่ม ทำงาน ระบบจะมีการทำงาน 2 ส่วนโดยเริ่มต้นจาก ส่วนแรกคือ

Master จะเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเพื่อเรียกค่าข้อมูลจาก Client ทั้ง 5 ตัว โดยสร้างเงื่อนไขส่งตัวแปรไป ที่ Client แต่ละตัวเพื่อตรวจสอบว่า Client แต่ละตัวพร้อมส่งข้อมูลหรือไม่ เมื่อไมโครคอนโทลเลอร์เริ่มทำงาน ในส่วนของ Client จะอ่านค่าจากเซนเซอร์แต่ละชนิด เพื่อเก็บค่าที่ตรวจวัดได้และพร้อมส่งให้ Master เมื่อ Master ร้องขอข้อมูล Client แต่ละตัวโดยใช้เวลา 10 วินาที เมื่อ Master ได้รับค่าข้อมูลจาก Client แต่ละตัวสำเร็จ Master จะนำค่าที่เก็บได้ส่งเข้าฐานข้อมูล โดยจะมีรหัสสถานะของ HTTP น้อยกว่า 300 ที่บอกถึงการส่งข้อมูลที่เสร็จสิ้น หากค่าของรหัสสถานะของ HTTP มากว่า 300 จะเข้าสู่เงื่อนไขการตั้งค่าใหม่ ไมโครคอนโทรเลอร์จะเริ่มต้นการทำงานใหม่ทั้งหมด เมื่อสำเร็จขั้นตอนนี้เป็นที่สมบูรณ์ Master จะทำงานวนซ้ำ จนครบตามจำนวนที่กำหนดไว้และจะหน่วงเวลา 1 นาที ก็จะออกจากการทำงานซ้ำในส่วนของการนับจำนวนและเริ่มต้นนับจำนวนใหม่ ดัง Fig. 2

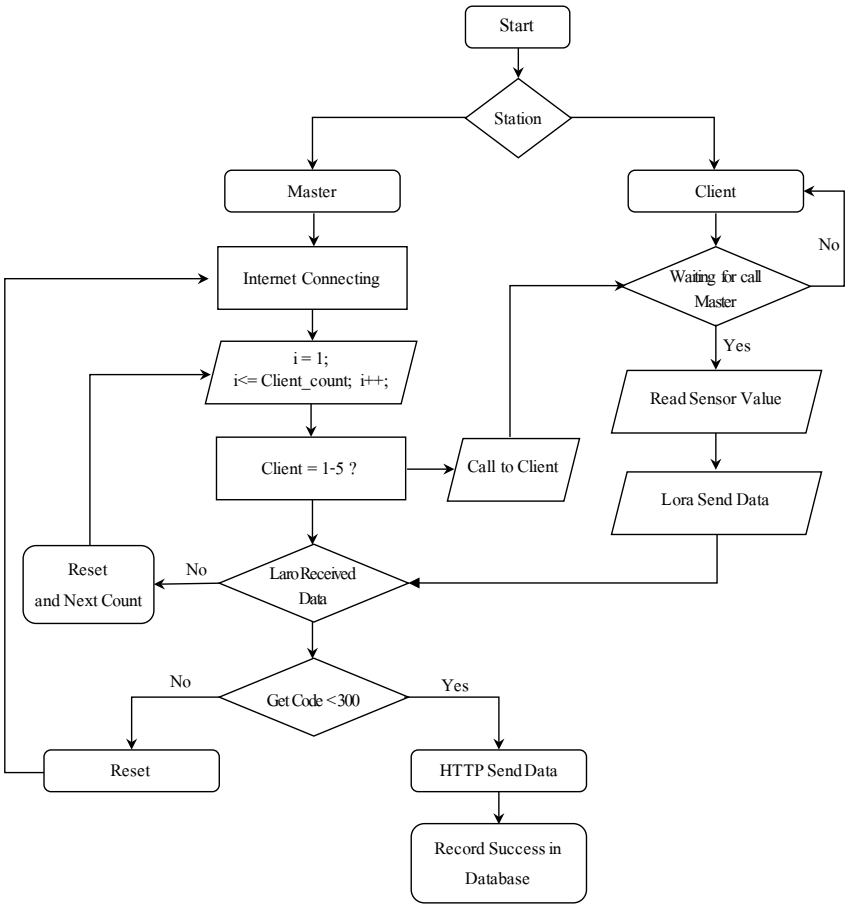


Fig. 2 Flowchart of microcontroller development

เว็บไซต์และแอปพลิเคชัน ขั้นตอนการสร้างและออกแบบหน้าเว็บไซต์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นเว็บไซต์ เพื่อการแสดงผลจากสถานีตรวจวัดทางการเกษตร เพื่อส่งข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดมาแสดงบนหน้าเว็บไซต์ ซึ่งสามารถให้ผู้ใช้งานได้รับรู้ถึงค่าต่าง ๆ ภายในแปลง ภาษาที่ใช้ในการพัฒนาจะเป็นภาษา HTML CSS PHP SQL JavaScript การแสดงผลข้อมูลผ่านเว็บไซต์ เมื่อข้อมูลที่ส่งมาจากสถานีตรวจวัดทางการเกษตร ถูกส่งเข้ามายังฐานข้อมูลผ่านสัญญาณอินเทอร์เน็ตจะทำการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลมาแสดงบนเว็บไซต์ โดยแสดงในรูปแบบของตัวเลข ตารางและแผนภูมิ ดัง Fig. 3 ภาษาที่ใช้ในการแสดงผลนั้น ประกอบไปด้วยภาษา HTML CSS PHP SQL

JavaScript โดยส่วนของโครงสร้างเว็บไซต์จะถูกเขียนด้วยภาษา HTML CSS และ JavaScript ส่วนขั้นตอนการแสดงผลจะถูกเขียนด้วยภาษา PHP และ SQL ที่ถูกการ Query แล้ว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการ จากนั้นเปลี่ยนจากเว็ปไซต์เป็นแอปพลิเคชันโดยใช้ Apache Cordova เพื่อให้งานต่อการนำไปใช้งาน



Fig. 3 Monitoring station data transmission procedure

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการลงพื้นที่สัมภาษณ์กลุ่มเกษตรกรได้ทราบถึงปัญหาและอุปสรรคที่มีผลต่อกระบวนการผลิดมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเพื่อการส่งออก ปัญหาหลัก คือ ดิน เกษตรกรอยากทราบถึงธาตุอาหารในดินเพื่อใช้วางแผนการให้ปุ๋ย ส่วนน้ำ เกษตรกรอยากทราบถึงความต้องการน้ำของต้นมะม่วงและค่าความชื้นในดินเพื่อบริหารจัดการการให้น้ำแก่ต้นมะม่วงอย่างมีประสิทธิภาพ และสภาพอากาศ เกษตรกรอยากทราบถึงสภาพอากาศภายในแปลง เช่น ค่าความชื้นและอุณหภูมิในอากาศ ซึ่งปัญหาและอุปสรรคทั้ง 3 ปัจจัยนี้จึงนำไปสู่การพัฒนาสถานีตรวจวัดทั้ง 5 สถานี

การพัฒนาสถานีตรวจวัดสภาพอากาศจะตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ ค่าความเข้มของแสงแดด จะได้ค่า ดัง Table 1 โดยค่าความเข้มของแสงแดดจะใช้เซนเซอร์ LDR เมื่อแสงมาตกกระทบ ค่าความเข้มแสงน้อย LDR จะมีความต้านทานมาก ถ้าค่าความเข้มแสงมาก LDR จะมีความต้านทานน้อย สถานีตรวจวัดสภาพอากาศ ดัง Fig. 4A

Table 1 Examples of measured values from weather station.

Station	Air temperature (C°)	Air humidity (%)	Light intensity	Date & Time
13	30	98	82	2020-08-05 11:48:35
13	22	99	1023	2020-08-04 23:59:40
13	29	99	144	2020-08-04 16:41:57
13	31	97	11	2020-08-04 11:52:26

สถานีตรวจวัดคุณภาพดินจะตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในดิน ธาตุอาหารในดิน ค่าความเป็นกรดด่าง และตำแหน่งของสถานี ซึ่งจะได้ค่าดัง Table 2 โดยค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความชื้นและอุณหภูมิในดิน ทั้ง 4 สถานีมีความใกล้เคียงกัน ส่วนความอุดมสมบูรณ์และค่าความเป็นกรดด่างในดินของแต่ละสถานีจะมีค่าแตกต่างกับไปขึ้นอยู่กับอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน อุปกรณ์สถานีตรวจวัดคุณภาพดิน ดัง Fig. 4B

Table 2 Examples of measured values from soil quality station

Station	Soil temperature (C°)	Soil humidity (%)	Fertility	pH	Location		Date & Time
					latitude	longitude	
3	26	101	2	6.88	16.5964	100.5525	2020-08-5 11:48:16
6	27	102	1	6.90	16.5962	100.5524	2020-08-5 11:48:22
8	27	102	30	5.32	16.5971	100.5519	2020-08-5 11:48:25
12	26	101	4	6.70	16.5968	100.5521	2020-08-5 11:48:34

แหล่งจ่ายพลังงาน การศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้พัฒนาในลักษณะแท่นเสาตั้งอยู่ตำแหน่งกลางแปลง ประกอบไปด้วยแผ่งโซล่าเซลล์ขนาด 40 วัตต์ แบตเตอรี่ขนาด 12 โวล์ท 12 แอมป์ และโซล่าชาร์จเจอร์ ซึ่งแผงโซล่าเซลล์ถูกติดตั้งบนเสาสูงประมาณ 3 เมตร หันทิศทางของแผ่นโซล่าเซลล์ไปทางทิศใต้โดยทำมุมเอียง 45 องศา ถัดลงมามีการติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสภาพอากาศและกล่องเก็บแบตเตอรี่และอุปกรณ์โซล่าชาร์จเจอร์ ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้า 12 โวล์ทให้กับสถานีตรวจวัดทั้ง 5 สถานีภายในแปลง ดัง Fig. 4C

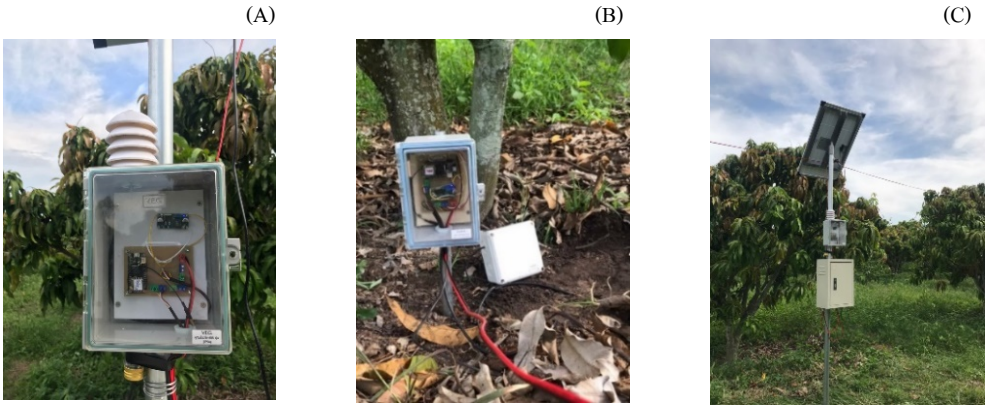


Fig. 4 Soil quality station (A), weather station (B) and power source (C)

Web Application จะแสดงในส่วนของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับอ่านค่าเซนเซอร์ และแสดงตำแหน่งของสถานีตรวจวัด ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ทั้ง 5 สถานีตรวจวัด โดยมีการแสดงค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของทั้งแปลงและแยกเป็นรายสถานีตรวจวัด เพื่อให้เกษตรกรสามารถติดตามข้อมูลต่าง ๆ ภายในแปลงได้ ดัง Fig. 5 ส่วนของ Mobile Application จะไม่มีการเข้าสู่ระบบเหมือนกับ Web Application เมื่อเข้าสู่แอปพลิเคชันจะแสดงผลการติดตามและตรวจสอบแบบภาพรวมทั้งสวน และแบบแบ่งสวน เมื่อเลือกค่าใดค่าหนึ่งจะแสดงผลในส่วนของพารามิเตอร์เช่นเดียวกับ Web Application ดัง Fig. 6 ส่วนการแจ้งเตือนสถานะของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวจะถูกกำหนดช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับการดูแลต้นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง โดยอ้างอิงช่วงค่าความเหมาะสมของข้อมูลจากคู่มือนักวิชาการส่งเสริมการเกษตรมะม่วง อารีพันธ์ (2551)

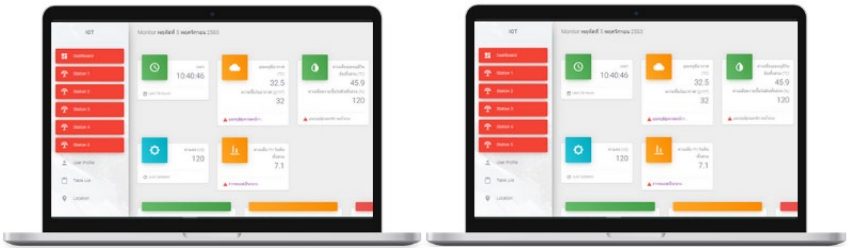


Fig. 5 Web Application

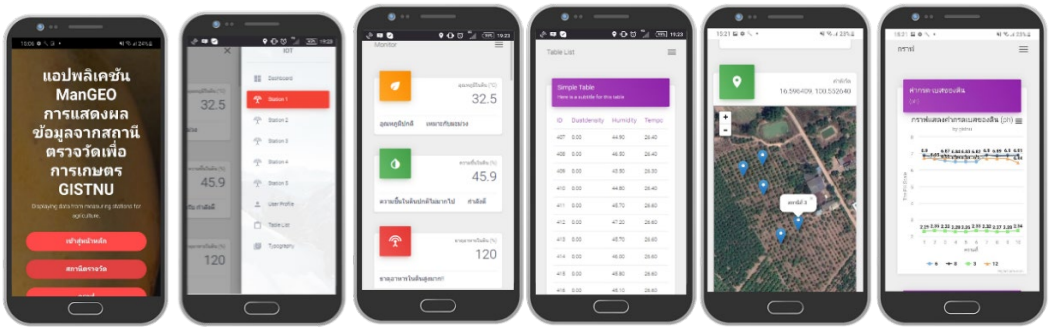


Fig. 6 Mobile Application

สรุป

การพัฒนาสถานีตรวจวัดทางการเกษตรและแอปพลิเคชัน ผลที่ได้คือ สถานีตรวจวัดทางการเกษตร 5 สถานี และแอปพลิเคชันสำหรับแสดงข้อมูลด้านปัจจัยต่าง ๆ ทางสภาพแวดล้อมภายในแปลง โดยสถานีตรวจวัดคุณภาพของดินถูกติดตั้งอยู่ภายในแปลงจำนวน 4 สถานี โดยทำหน้าที่ตรวจวัดคุณภาพของดิน จะตรวจวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิในดิน วัดค่าความเป็นกรดด่าง และวัดปริมาณธาตุอาหารในดิน ส่วนสถานีตรวจวัดสภาพอากาศจะติดตั้งอยู่ตำแหน่งกลางแปลง 1 สถานี ทำหน้าที่ตรวจวัดสภาพอากาศภายในแปลง จะตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ และค่าความเข้มของแสงแดด ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้พัฒนาสถานีตรวจวัดได้ทำการทดสอบการตรวจวัดค่าก่อนการนำไปติดตั้งจริงภายในแปลงทำให้ข้อมูลที่ได้จากสถานีมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ข้อดีของอุปกรณ์ที่ใช้พัฒนาสถานีตรวจวัดในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป มีราคาไม่สูงมาก และยังใช้งานได้จริง ส่วนข้อมูลปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้จากสถานีตรวจวัดจะถูกจัดเก็บบันทึกไว้อย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลผ่านแอปพลิเคชัน ตลอดจนแปลผลข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด เพื่อควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่นเซนเซอร์วัดค่าความชื้นในดินสามารถช่วยให้เกษตรกรตัดสินใจในการให้น้ำแก่ต้นมะม่วงได้ เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรดด่างและธาตุอาหารในดิน ช่วยในการให้ปุ๋ยได้ตามความเหมาะสมของสภาพดิน และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ ความเข้มของแสงแดด ถูกนำมาวางแผนในการเปิดตาดอกของต้นมะม่วง เป็นต้น ซึ่งค่าต่าง ๆ มีความสำคัญต่อพืชในด้านการผลิต ส่งผลให้เกิดความแม่นยำในด้านปริมาณและคุณภาพของผลผลิต และสามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบการให้คำแนะนำหรือการพยากรณ์ เพื่อให้เกษตรกรสามารถวางแผนการผลิตในแต่ละฤดูการเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มพัฒนาการผลิตมะม่วงเพื่อการส่งออกบ้านคลองวังเรือที่เอื้อเฟื้อสถานที่แปลงศึกษาทดลอง และขอขอบคุณอาจารย์จากภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่คอยให้คำปรึกษาให้งานวิจัยชิ้นนี้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กองพล อารีรักษ์. 2560. รายงานการวิจัยการควบคุมแบบอัตโนมัติของระบบปั๊มน้ำสำหรับไร่มันสำปะหลังที่ใช้แหล่งพลังงานโซลาร์เซลล์. คลังปัญญา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

จิตติพงษ์ บุษบา, กีรติ เฮงประเสริฐ, วณัฐพงศ์ ดอกพุฒ, เจษฎา ฤทธิ์สนธ, อัษฎา จันต๊ะนาขต, ศุภฤกษ์ มานิตพรสุทธ. 2561. ต้นแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการเกษตร. ใน: การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิชาการระดับชาติ UTCC Academic Day ครั้งที่ 2 กองส่งเสริมงานวิจัย, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, กรุงเทพฯ.

ปองพล นิลพฤกษ์, กีรติบุตร กาญจนเสถียร, บุรัสกร อยู่สุข. 2561. โปรโตไทพ์ระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนสภาพดินในสวนทุเรียน กรณีศึกษา ต.บึงกาสาม อ.หนองเสือ จ.ปทุมธานี. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 17: 33–44.

วีรศักดิ์ ฟองเงิน, สุรพงษ์ เพ็ชร์หาญ, รัฐสิทธิ์ ยะจ่อ. 2561. ออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศ และนวัตกรรม 5: 58– 69.

อารีพันธ์ อุปนิสากร. 2551. คู่มือนักวิชาการส่งเสริมการเกษตรมะม่วง. ส่วนบริหารศัตรูพืช, สำนักพัฒนาคุณภาพสินค้าเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ

Barbona, G., Margolisb, M., Palumboc, F., Raimondib, F., Weldinb, N. 2016. Taking Arduino to the Internet of Things: the ASIP programming model. Comput. Commun. 89–90: 128–140. doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.016

การประยุกต์ใช้ LINE Chatbot ในการบริการข้อมูลนักท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติ

Application of LINE Chatbot for tourist information service in national park

ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล*, กมลพรรณ ศรีกัน

Laddawan Rianthakool*, Kamonpan Srika

ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

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

บทคัดย่อ

การบริการข้อมูลในอุทยานแห่งชาติให้แก่นักท่องเที่ยวเป็นบริการพื้นฐานที่เจ้าหน้าที่อุทยานจะให้ข้อมูล และข่าวสารกับนักท่องเที่ยว ปัจจุบันสื่อสังคมออนไลน์ได้รับความนิยมและมีผู้ใช้งานอย่างกว้างขวาง สื่อสังคมออนไลน์ที่คนไทยนิยมใช้และมีแนวโน้มผู้ใช้เพิ่มมากขึ้นได้แก่ LINE ที่สามารถเข้าถึงผู้ใช้ได้ทุกช่วงอายุ สามารถพัฒนาระบบโต้ตอบอัตโนมัติ (chatbot) ได้ ปัจจุบันยังไม่ได้มีการใช้ LINE ในการส่งข่าวสารของอุทยานแห่งชาติ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบโต้ตอบอัตโนมัติ (chatbot) ของแอปพลิเคชัน LINE เพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่นักท่องเที่ยวและเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติในการถามและตอบบริการข้อมูลต่างๆ ช่วยให้ตอบคำถามหรือส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และตลอดเวลา ลดเวลารอของนักท่องเที่ยว รวมถึงช่วยแบ่งเบาภาระของเจ้าหน้าที่ ระบบโต้ตอบอัตโนมัตินี้อยู่ในรูปแบบของ บัญชีทางการ (LINE Official Account) เพื่อให้บริการข้อมูลของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยผู้ใช้สามารถเลือกข้อมูลจากเมนูภาพ (rich menu) ซึ่งเป็นเมนูลัดที่สามารถแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมตามที่ผู้ใช้ต้องการ ข้อมูลจากเมนูภาพนี้จะเป็นข้อมูลคำตอบจากคำถามที่พบบ่อย เช่น ที่พัก แหล่งท่องเที่ยว และกิจกรรม เป็นต้น เพื่อเพิ่มความสะดวกให้ผู้ใช้เข้าถึงได้ง่ายขึ้น หรือผู้ใช้สามารถถามเพิ่มเติมได้จากการสนทนาในระบบ ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ผ่านระบบนี้อยู่ในเกณฑ์พึงพอใจมากที่สุด

คำสำคัญ: การบริการข้อมูล, ระบบตอบรับอัตโนมัติ, อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่, แอปพลิเคชันไลน์

Abstract

Information service is a basic service in national park to provide information and news to tourists. Nowadays, social media are so popular and widely used. Social media platform LINE in Thailand tends to increase the number of users because easy for people of all ages and chatbot development can be applied. Currently, LINE is not being used in Thailand's national park. In this study, LINE chatbot was developed for alternative communication channels between tourists and national park staffs. It is quickly replying anytime and reduce waiting time for tourists. LINE Official Account with chatbot was created for case study Khaoyai national park. Users can meet the response by rich menu which is a shortcut menu to display users interact *by graphical interface*. This rich menu gives the answer that are frequently asked questions such as accommodation, sightseeing spots, activities and other to make it easy for users. Moreover, users can ask questions thru the conversation system. The satisfaction survey of users is high satisfaction.

Keywords: chatbot, information service, Khaoyai National Park, LINE application

คำนำ

อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มีเนื้อที่ประมาณ 2,165 ตารางกิโลเมตร มีอาณาเขตครอบคลุม 4 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดสระบุรี จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดปราจีนบุรี และจังหวัดนครนายก ซึ่งเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่จึงมีความหลากหลายทางธรรมชาติ เป็นผืนป่าใหญ่ต้นกำเนิดของต้นน้ำลำธารที่สำคัญ อุดมสมบูรณ์ไปด้วยพันธุ์ไม้และสัตว์ป่านานาชนิด ตลอดจนมีเอกลักษณ์ทางธรรมชาติที่สวยงาม ได้รับการยกย่องว่าเป็นอุทยานมรดกของกลุ่มประเทศอาเซียน และได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2548 เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีความหลากหลายทางชีวภาพและมีความสวยงาม จึงเป็นสถานที่ที่นิยมในหมู่นักท่องเที่ยวและมีนักท่องเที่ยวเข้ามาใช้บริการจำนวนมาก ในปี 2561 มีจำนวนนักท่องเที่ยวที่มาใช้บริการถึง 1,489,876 คน (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช, 2561) การที่มีผู้คนเข้ามาใช้บริการจำนวนมากนี้อาจทำให้เกิดปัญหาการอำนวยความสะดวกไม่ทั่วถึงของเจ้าหน้าที่ในด้านการให้บริการข้อมูล เช่น การสอบถามข้อมูลด้านการบริการที่พัก แหล่งท่องเที่ยว หรือตำแหน่งร้านอาหาร เป็นต้น จากการศึกษาของรุ่งฟ้า (2562) ได้อธิบายว่าการบริการของเจ้าหน้าที่ที่มีความรวดเร็วและมีอย่างเพียงพอเป็นหนึ่งในแรงจูงใจต่อการท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ รวมถึงผลการศึกษาพบว่านักท่องเที่ยวเข้าถึงแหล่งข้อมูลของอุทยานจากสื่อออนไลน์มากกว่าร้อยละ 50 ของจำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า Chatbot ที่สามารถตอบคำถามได้ทันทีและทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งสามารถเรียนรู้การโต้ตอบด้วยการนำ Machine learning มาประยุกต์ใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้การสื่อสารครอบคลุมตามเป้าหมายที่ต้องการ (จิรันดร, 2560) โดย Chatbot สามารถเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายสังคมออนไลน์ เช่น LINE ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันที่ได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทย (ขวัญฤดี, 2560; กรกานต์ และคณะ, 2563) สามารถใช้ในการสื่อสารทั้งข้อความ (Text) เสียง (Voice) ภาพ (Images) และวิดีโอ (Video) รวมทั้งยังมีสติ๊กเกอร์ตัวการ์ตูนที่เพิ่มความน่าสนใจในการสื่อสารของแอปพลิเคชัน

การศึกษานี้ได้พัฒนา LINE chatbot หรือ ระบบโต้ตอบอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชัน LINE เพื่อบริการข้อมูลของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ให้กับนักท่องเที่ยว ผู้ที่สนใจ รวมถึงเพิ่มช่องทางให้กับเจ้าหน้าที่อุทยานในการสื่อสารและประชาสัมพันธ์ให้นักท่องเที่ยวทราบได้อย่างรวดเร็ว

วิธีการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

การรวบรวมข้อมูลของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยค้นคว้าจากเว็บไซต์ และการทำแบบสอบถามนักท่องเที่ยวและเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่เพื่อให้ทราบถึงกลุ่มคำถาม-คำตอบที่พบบ่อย แล้วจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface Design)

การพัฒนา LINE Official Account หรือบัญชีทางการของแอปพลิเคชันไลน์ เพื่อเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้ ซึ่งการติดต่อแลกเปลี่ยนระหว่างผู้จัดการระบบ (Administrator) และผู้ใช้ (User) จะมี 2 วิธีการ (mode) คือ วิธีการสนทนา (Chat mode) และ วิธีการอัตโนมัติ (Bot mode) โดยวิธีการสนทนาจะสามารถโต้ตอบด้วยผู้จัดการระบบหรือสามารถตอบกลับอัตโนมัติ (Auto-Response) ตามคำสำคัญ (Keywords) ที่ได้กำหนดไว้ หากผู้ใช้พิมพ์ข้อความที่ตรงกับคำสำคัญระบบจะตอบกลับทันที ซึ่งวิธีการนี้จะจัดการผ่าน LINE Official Account Manager ส่วนวิธีการ

อัตโนมัติ จะจัดการผ่าน Dialogflow console วิธีการนี้ระบบจะมีความยืดหยุ่นในการเข้าใจข้อความหรือประโยคที่ผู้ใช้ถามมากกว่า นอกจากนี้ในส่วนของ LINE Official Account ยังสามารถออกแบบเมนูภาพ (rich menu) ซึ่งเป็นเมนูลัดที่สามารถแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมตามที่ผู้ใช้ต้องการผ่านรูปภาพที่สามารถกำหนดได้สูงสุด 6 ภาพในรูปแบบตารางทางด้านล่างของหน้าจอโทรศัพท์มือถือ

การสร้าง Dialogflow และการเชื่อมต่อกับ LINE Official Account การพัฒนา LINE Official Account ด้วยวิธีการอัตโนมัติ (Bot mode) จะใช้ Dialogflow เป็นเครื่องมือในการสร้างการโต้ตอบอัตโนมัติ ซึ่ง Dialogflow เป็นบริการหนึ่งของ Google ที่ใช้การเรียนรู้ของเครื่องหรือ Machine learning ในด้าน Natural Language Processing (NLP) (Google, 2021) ซึ่งสามารถเรียนรู้และเข้าใจความต้องการ (intent) และสิ่งที่ต้องการ (entity) จากประโยคหรือข้อความสนทนาของผู้ใช้ได้ดียิ่งขึ้น เพิ่มความยืดหยุ่นในการโต้ตอบโดยเข้าใจข้อความหรือประโยคของผู้ใช้แม้จะพิมพ์ความต้องการมาไม่ตรงกับคำสำคัญที่มีในระบบ Dialogflow จึงได้รับความนิยมนำมาใช้ในการสร้าง Chatbot ในงานด้านต่างๆ (นงนุช และคณะ, 2562; กรกานต์ และคณะ, 2563) การทำงานของ Dialogflow เริ่มจากสร้างตัวแทน หรือ Agent ทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้ (input/request) แล้วประมวลผลและตรวจสอบเจตนาหรือความต้องการของผู้ใช้ (intent) ว่าตรงกับเรื่องอะไรที่ได้กำหนดไว้แล้วจึงตอบกลับไปยังผู้ใช้ผ่าน Messaging API และ webhook (Fig. 1)

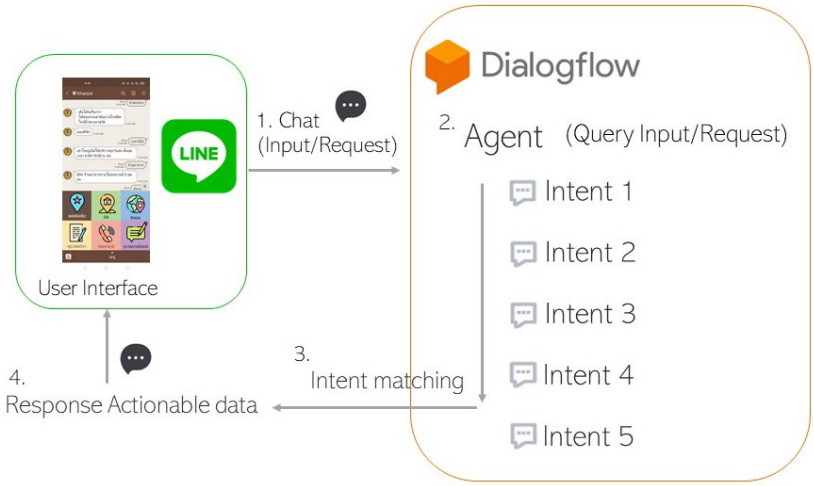


Fig. 1 Chatbot workflow diagram

การทดสอบและประเมินผลระบบ โดยให้ผู้ใช้เพิ่มเพื่อนหรือ LINE chatbot ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งกลุ่มผู้ใช้ที่ประเมินแบ่งออกเป็นนักท่องเที่ยว และเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติ โดยการทดสอบระบบว่าสามารถโต้ตอบคำถามจากผู้ใช้ทั้งสองกลุ่ม และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้จากแบบสอบถาม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการรวบรวมข้อมูลของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลหลักได้ 5 กลุ่ม ได้แก่ แหล่งท่องเที่ยวที่แนะนำ กิจกรรมในอุทยานแห่งชาติ การบริการที่พัก กฎระเบียบหรือข้อห้ามในอุทยานแห่งชาติ และการติดต่อเจ้าหน้าที่ ซึ่งเป็นคำถามหรือข้อมูลที่นักท่องเที่ยวสนใจ และเป็นคำถามที่เจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติพบได้บ่อย

ผลการพัฒนา LINE Official Account และส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) บัญชีทางการที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้บริการข้อมูลของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มีชื่อว่า “Khaoyai” หน้าแรกสำหรับการเพิ่มเพื่อน (add friend) แสดงรายละเอียดเวลาเปิดทำการ หมายเลขโทรศัพท์ เว็บไซต์อุทยาน การจองที่พัก และแผนที่อุทยาน (Fig. 2 A) เมื่อผู้ใช้เพิ่ม “Khaoyai” เป็นเพื่อนจะมีข้อความต้อนรับแสดงดัง Fig. 2 B

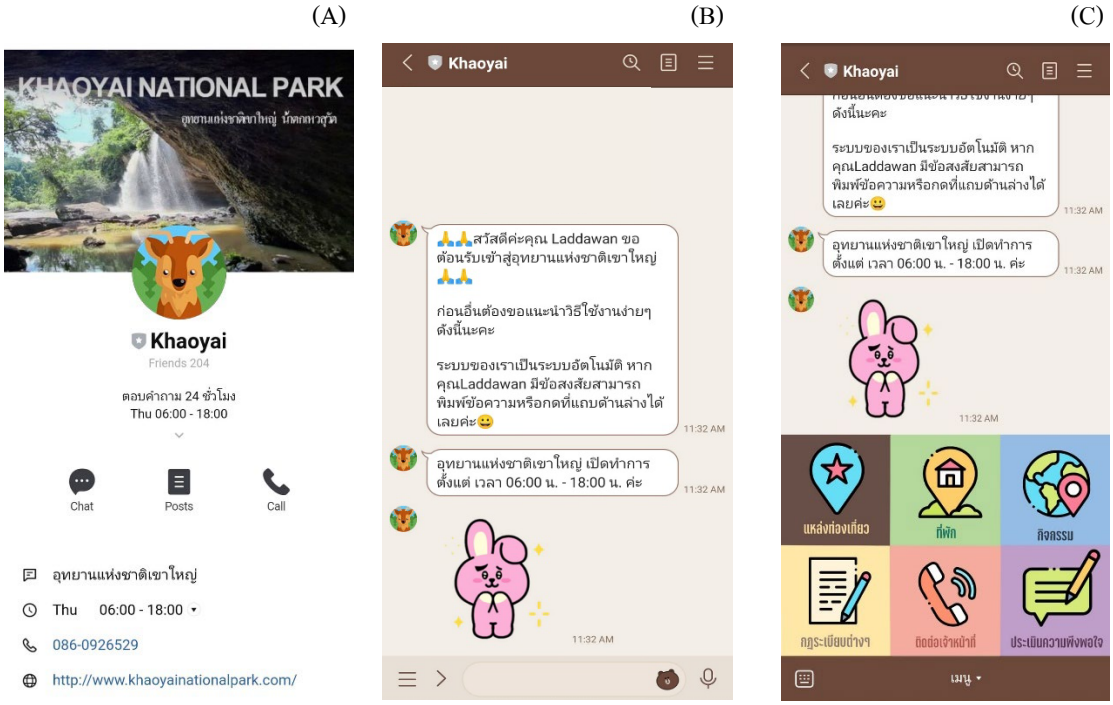


Fig. 2 Users Interface; A (Add friends screen), B (Greeting Message), และ C (Rich menu)

ส่วนหน้าจอหลักของผู้ใช้ประกอบด้วย ส่วนแสดงผลการสนทนาด้านบน และส่วนเมนูภาพ (rich menu) ด้านล่าง (Fig. 2 C) ในเมนูภาพจะจัดแบ่งเป็น 6 ภาพ โดยแต่ละภาพจะเป็นกลุ่มของคำถามหรือข้อมูลที่พบบ่อย 5 กลุ่ม ได้แก่ แหล่งท่องเที่ยว ที่พัก กิจกรรม กฎระเบียบต่างๆ และติดต่อเจ้าหน้าที่ ส่วนภาพสุดท้ายเป็นแบบประเมินความพึงพอใจของระบบ นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถพิมพ์บทสนทนาเองได้อีกช่องทางหนึ่ง

การโต้ตอบจะอยู่ในวิธีการอัตโนมัติ (Bot mode) ที่สามารถโต้ตอบได้อัตโนมัติทันทีที่ผู้ใช้ถาม หรือกดเลือกเมนูภาพ การตอบอัตโนมัติผ่าน Dialogflow จะสามารถตอบกลับได้หลายรูปแบบ (Fig.3) เช่น

ข้อความ (Text) จำนวนข้อความที่ตอบกลับภายใน 1 ครั้งสามารถส่งข้อความได้ 3 Bubbles ในกรณีการเปิดใช้งานบัญชีทางการของไลน์ (LINE Office Account) แบบไม่เสียค่าบริการ

รูปภาพ (Image) การส่งข้อความตอบกลับเป็นรูปภาพจะสามารถแสดงรายละเอียดได้มากยิ่งขึ้น ภาพที่ส่งอาจเป็น infographic หรือภาพประกาศ

แบบปุ่มกด (Buttons template) เป็นรูปแบบการส่งที่มีรูปภาพ หัวเรื่อง ข้อความ และปุ่มกดให้เลือกตามที่ต้องการ เมื่อผู้ใช้กดเลือกปุ่มแล้วจะนำไปยังการเชื่อมต่อ (Link) อื่นๆ เช่น แผนที่ เว็บไซต์อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ เป็นต้น

แบบภาพพร้อมข้อความและปุ่มกดที่สามารถเลื่อนเพิ่มเติมได้ (Carousel template) เป็นรูปแบบการแสดงผลแบบเป็นกลุ่มรายการที่เลื่อนดูได้โดยการเลื่อนไปทางขวามือของจอภาพ การตอบบทสนทนาแบบนี้มีภาพประกอบเพิ่มความน่าสนใจ และให้ข้อมูลผู้ใช้ได้มากขึ้น

แบบรายการภาพ (Image carousel template) เป็นการแสดงการสนทนาแบบที่นำรูปภาพมาสร้างเป็นรายการที่เลื่อนดูไปมาได้ ภาพที่แสดงจะมีขนาดใหญ่กว่าแบบ Carousel template

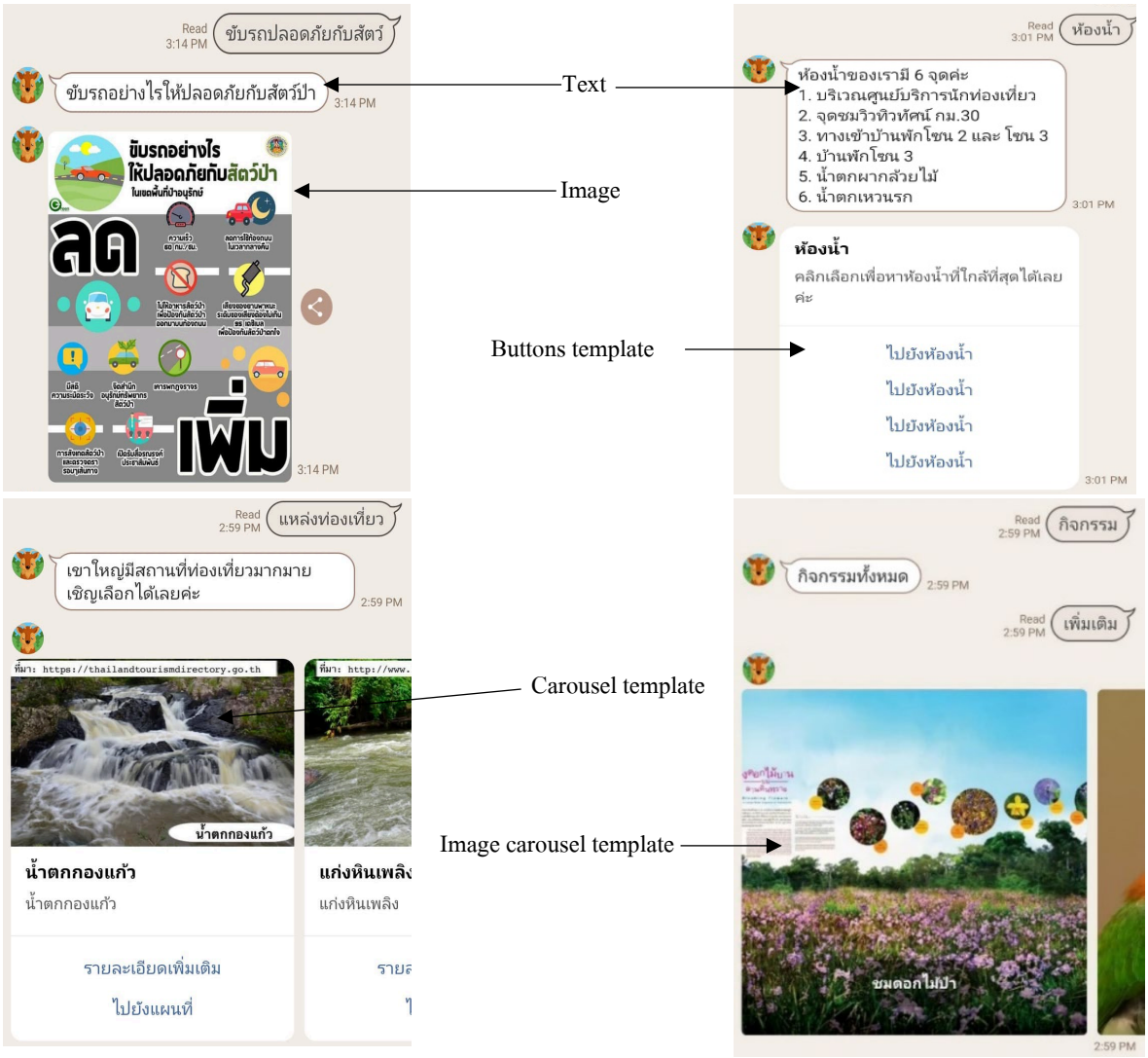


Fig. 3 Types of response messages

ผลการทดสอบประสิทธิภาพและความพึงพอใจในการตอบคำถามอัตโนมัติ จากผู้ใช้จำนวน 110 คนที่เข้ามาทดสอบการใช้งานระบบ พบว่าระบบสามารถตอบคำถามจากผู้ใช้ได้ และไม่สามารถตอบบางคำถามที่ไม่ได้อยู่ในฐานข้อมูลที่ออกแบบไว้ได้ และบางข้อความผู้ใช้พิมพ์ไม่ถูกต้อง แต่ระบบก็สามารถเลือกคำตอบที่คาดการณ์จากเจตนาหรือความต้องการของผู้ใช้ (intent) ที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่มีอยู่ ตัวอย่างข้อความคำถามและคำตอบดัง Table 1 ซึ่งมีคำถามหรือข้อมูลบางส่วนที่ยังไม่มีในระบบปัจจุบัน จากการทดสอบนี้จะช่วยให้นักพัฒนาเพิ่มเติมข้อมูลของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่เพื่อให้ระบบสามารถให้ข้อมูลได้ครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

Table 1 Sample of input and results from Dialogflow

Input	Response	Result	Description
อุทยานเปิดกี่โมงคะ	เปิดทำการเวลา 6:00 น. และปิดทำการเวลา 18:00 น. ค่ะ	Successful response	เนื่องจากคำว่า “อุทยานเปิดกี่โมงคะ” ไม่มีอยู่ในฐานข้อมูล แต่มีคำว่า “ปิดกี่โมง” ซึ่งมีความหมายแฝงเหมือนกัน ระบบจึงเลือกคำตอบมาตอบได้ถูก
สวัสดีค่ะ	สวัสดีค่ะ เขาใหญ่ยินดีให้บริการค่ะ>ต้องการสอบถามอะไรถามได้เลยค่ะ>สติ๊กเกอร์	Successful response	เนื่องจากคำว่า “สวัสดีค่ะ” มีอยู่ในฐานข้อมูล ระบบจึงเลือกคำตอบมาตอบได้ถูกต้อง
เสือ	ขออภัยครับถ้าต้องการสอบถามเพิ่มเติมสามารถติดต่อเจ้าหน้าที่โดยตรงได้ที่ โทรศัพท์ : ที่ทำการ 086-0926527 บ้านพัก 086-0926529 E-mail: khaoyai.np@gmail.com ขอบคุณค่ะ	Failed response	เนื่องจากคำว่า “เสือ” ไม่มีอยู่ในฐานข้อมูล ระบบจึงส่งข้อความกลับกรณีที่ไม่มีข้อมูล การแก้ไขคือปรับปรุงระบบโดยเพิ่มข้อมูลที่เกี่ยวกับเสือเข้าไปในฐานข้อมูล

จากการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบโต้ตอบอัตโนมัติ LINE Chatbot ในการบริการข้อมูลนักท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ มีผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมด 110 คน แบ่งเป็นเพศหญิงจำนวน 81 คน คิดเป็นร้อยละ 73.6 เพศชายจำนวน 29 คน คิดเป็นร้อยละ 26.4 โดยส่วนใหญ่มีอายุในช่วง 20–30 ปีจำนวน 67 คน คิดเป็นร้อยละ 60.9 อายุ 30–40 ปีมีจำนวน 21 คน คิดเป็นร้อยละ 19.1 อายุต่ำกว่า 20 ปีมีจำนวน 14 คน คิดเป็นร้อยละ 12.7 อายุ 40–50 ปีมีจำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 6.4 และอายุมากกว่า 50 ปีจำนวน 1 คน คิดเป็นร้อยละ 0.9 โดยจำนวนผู้ทำแบบสอบถามทั้งหมดมีสถานะเป็นนักท่องเที่ยว 97 คน คิดเป็นร้อยละ 88.2 และเป็นเจ้าหน้าที่อุทยานจำนวน 13 คน คิดเป็นร้อยละ 11.8 การประเมินความพึงพอใจประกอบด้วยสี่ด้าน คือ ความสะดวกในการใช้งาน ความรวดเร็วในการโต้ตอบ ความครอบคลุมของคำตอบ และความง่ายในการใช้งาน

จาก Table 2 พบว่านักท่องเที่ยวมีความพึงพอใจภาพรวมในระบบโต้ตอบอัตโนมัติผ่าน LINE Chatbot อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{x}$= 4.24, SD = 0.69) โดยมีความพึงพอใจด้านความง่ายในการใช้งานมากที่สุด ($\overline{x}$ = 4.26, SD = 0.74) รองลงมาคือความสะดวกในการใช้งาน และความรวดเร็วในการโต้ตอบ ($\overline{x}$ = 4.21, SD = 0.69 และ $\overline{x}$ = 4.21, *SD* = 0.76 ตามลำดับ) ส่วนเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติมีความพึงพอใจภาพรวมในระบบโต้ตอบอัตโนมัติผ่าน LINE Chatbot อยู่ในระดับมาก ($\overline{x}$ = 4.00, SD = 0.58) เจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติให้คะแนนด้านความสะดวกในการใช้งานอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด ($\overline{x}$ = 4.31, SD = 0.63) รองลงมาคือด้านความรวดเร็วในการโต้ตอบมีระดับความพึงพอใจมากที่สุด ($\overline{x}$ = 4. 23, SD = 0. 73) และในภาพรวมทั้งนักท่องเที่ยวและเจ้าหน้าที่อุทยานพบว่าโดยรวมแล้วผู้ใช้มีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด ($\overline{x}$ = 4.21, SD = 0.68) โดยมีระดับความพึงพอใจมากที่สุดในด้านความสะดวกในการใช้งาน และความรวดเร็วในการโต้ตอบ ($\overline{x}$ = 4.22, SD = 0.68 และ $\overline{x}$ = 4.21, SD = 0.76 ตามลำดับ) ระดับความพึงพอใจมากด้านความครอบคลุมของคำตอบ และความง่ายในการใช้งาน ($\overline{x}$ = 3.94, SD = 0.75 และ $\overline{x}$ = 4.20, SD = 0.76 ตามลำดับ) ซึ่งผู้ใช้ระบบโต้ตอบอัตโนมัติผ่าน LINE chatbot โดยส่วนใหญ่มีความพึงพอใจต่อการใช้งานเพราะใช้งานง่าย สะดวก และลดระยะเวลาในการติดต่อ สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุมนา และคณะ (2563) ที่พัฒนา chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษาพบว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจที่สามารถลดระยะเวลาในการติดต่อเจ้าหน้าที่ และการศึกษาของกรกานต์ และคณะ (2563) ที่ประยุกต์ใช้ chatbot ในการแสดงผลข้อมูลการเดินทางด้วยระบบรถไฟฟ้าก็อธิบายว่า Chatbot เป็นการเพิ่มช่องทางสื่อสารอีกช่องทางหนึ่งที่สร้างความสะดวกสบายและง่าย

ต่อผู้ใช้ นอกจากนี้หากระบบโต้ตอบอัตโนมัตินี้สามารถรวบรวมคำถามและคำตอบได้ครอบคลุมก็จะสามารถตอบทุกคำถามของผู้ใช้งานได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น (นงนุช และคณะ, 2562)

Table 2 Levels of Satisfaction

Evaluation topics	Tourist *n* = 97		National park staffs *n* = 13		Overall *n* = 110	
	$\overline{x}$	SD	$\overline{x}$	SD	$\overline{x}$	SD
Comfortable	4.21	0.69	4.31	0.63	4.22	0.68
Quickly reply	4.21	0.76	4.23	0.73	4.21	0.76
Cover information	3.98	0.71	3.62	0.96	3.94	0.75
Ease of use	4.26	0.74	3.77	0.83	4.20	0.76
Overall	4.24	0.69	4.00	0.58	4.21	0.68

สรุป

การศึกษานี้ได้พัฒนาระบบ LINE Chatbot มาประยุกต์ใช้ในการบริการข้อมูลนักท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่โดยการสร้างบัญชีทางการของไลน์ ออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ และได้รวบรวมคำถาม-คำตอบที่เป็นข้อมูลที่พบบ่อยในการสอบถามไว้เป็นฐานข้อมูลโดยจะเรียกใช้งานผ่าน dialogflow ผู้ใช้งานสามารถเลือกหมวดหมู่ข้อมูลที่ต้องการได้จากเมนูภาพ (rich menu) หรือพิมพ์คำถามได้ผ่านบทสนทนา การตอบของระบบจะส่งคำถามหรือข้อมูลนำเข้าไปยัง dialogflow เพื่อประมวลคำถามว่าตรงกับหรือใกล้เคียงกับข้อมูลที่มีอยู่หรือไม่ แล้วก็จะส่งคำตอบหรือข้อมูลกลับมายังผู้ใช้ในห้องสนทนา ซึ่งผลการศึกษาพบว่าระบบโต้ตอบอัตโนมัตินี้ใช้งานได้ดี แต่ข้อมูลในระบบยังไม่ครอบคลุมกับคำถามที่ผู้ใช้พิมพ์ถามมา และจากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ทั้งนักท่องเที่ยวและเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติในภาพรวมมีระดับความพึงพอใจมากที่สุดต่อระบบโต้ตอบอัตโนมัตินี้ โดยระบบใช้งานง่าย สามารถอำนวยความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และสามารถโต้ตอบได้อย่างรวดเร็ว จะเห็นได้ว่า LINE chatbot เป็นอีกช่องทางหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบริการข้อมูลอุทยานแห่งชาติ เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลต่างๆ และหากมีการรวบรวมและวิเคราะห์บทสนทนาจากระบบนี้ก็จะช่วยให้ผู้พัฒนาระบบสามารถเพิ่มหรือปรับปรุงข้อมูลให้ตรงกับผู้ใช้ได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดให้กับอุทยานแห่งชาติแห่งอื่นๆ เพื่อให้เข้าถึงผู้ใช้ในยุคสมัยใหม่ได้อีกช่องทางหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

กรกานต์ วรธรกุล, สมภพ ทองปลิว, ศจีมาจ ณ วิเชียร. 2563. การประยุกต์ใช้โปรแกรมสนทนาอัตโนมัติเพื่อแสดงผลข้อมูลการเดินทางด้วยระบบรถไฟฟ้า. ใน: รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 8 ราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง. มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง, ราชบุรี, หน้า 1940–1950.

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2561. การท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติ. https://www.dnp.go.th/statistics/2561/stat2561.asp, 15 กันยายน 2563.

ขวัญฤดี ฮวดหุ่น. 2560. อิทธิพลของแอพพลิเคชั่นไลน์ในการสื่อสารยุคปัจจุบัน. วารสารศิลปะการจัดการ. 1: 75–88.

จิรันดร บู๊ฮวดใช้. 2560. แนวทางการพัฒนาต้นแบบแชทบอทสำหรับให้คำแนะนำระบบขอทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. ใน: รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม, หน้า 1906–1913.

นงนุช เกตุ้ย, ขนิษฐา หอมจันทร์, วรวิทย์ ฟั่นคำอ้าย, เดชาวัต ฤชุโรจน์, อมิต โกชุ. 2562. การพัฒนาระบบสนับสนุนการตลาดออนไลน์โดยใช้เนื้อหาดิจิทัล กรณีศึกษากลุ่มผ้าทอย้อมสีธรรมชาติบ้านปางกอม อ.สองแคว จ.น่าน. สักทอง: วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 6: 33–42.

รุ่งฟ้า สะแกกลาง. 2562. พฤติกรรมและแรงจูงใจของนักท่องเที่ยวชาวไทยที่เดินทางมาท่องเที่ยวอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา. การค้นคว้าอิสระระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยกรุงเทพ, ปทุมธานี.

สุมนา บุษบก, ณัฐพร เพ็ชรพงษ์, จีรนุช สิงโตแก้ว. 2563. การพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษากองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 19: 85–94.

Google. 2021. Dialogflow. https://cloud.google.com/dialogflow/docs, 15 กันยายน 2563.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การฟื้นฟูทางชีวภาพของดินปนเปื้อนน้ำมันผสมโดยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับวิธีอื่น

Bioremediation of mixed-oil contaminated soil by surfactant co-amendments

ปิยาภรณ์ สมสมัคร*, กิตติศักดิ์ จีนาคม, ชัยทัต เชื้อไพบูลย์

Piyapawn Somsamak*, Kittisak Jeenakom, Chaitad Chuapaiboon

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Management and Technology, Faculty of Environment, Kasetsart University, 10900 Thailand.

* Corresponding author. Email address: fscipys@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกระตุ้นการฟื้นฟูดินปนเปื้อนน้ำมันผสมใช้แล้วด้วยวิธีทางชีวภาพ 3 แนวทางได้แก่ การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับกลุ่มจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้ การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับเศษพืช และการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับกากตะกอนจุลินทรีย์ ดินตัวอย่างปนเปื้อนน้ำมันผสมใช้แล้ววัดในรูป Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) 1130 มิลลิกรัม/กิโลกรัม การเติมสารลดแรงตึงผิวร่วมกับการเติมกากตะกอน และ การเติมสารลดแรงตึงผิวร่วมกับเศษพืช สามารถลด TPH ได้ถึงร้อยละ 80–90 เมื่อเติมปุ๋ยอนินทรีย์ร่วมด้วยสามารถลด TPH ได้มากกว่าร้อยละ 95 เทียบกับการใช้สารลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียวที่ลด TPH เหลือร้อยละ 42 การเติมจุลินทรีย์ย่อยสลายน้ำมันที่คัดเลือกร่วมกับลดแรงตึงผิวให้ผลไม่แตกต่างจากการใช้สารลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียว การเติมกากตะกอนช่วยเพิ่มจุลินทรีย์และสารอาหารให้แก่ดินเปื้อน อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ท้องถิ่นในดินปนเปื้อนสามารถเพิ่มจำนวนได้เมื่อมีการเพิ่มเศษพืชและธาตุอาหารให้แก่ดิน ส่งผลกระตุ้นการฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยไม่ต้องเติมจุลินทรีย์จากภายนอก

คำสำคัญ: การกระตุ้นจุลินทรีย์, การฟื้นฟูทางชีวภาพ, ดินปนเปื้อนน้ำมัน

Abstract

In this study, three multi-amendment strategies for biostimulation, namely surfactant with biosolid, surfactant with oil-degrading consortium, and surfactant with green waste, all with or without inorganic fertilizer, were examined for their effectiveness of treating used mixed-oil contaminated soil. The contaminated soil contained 1130 mg kg-1 hydrocarbon in form of Total Petroleum Hydrocarbon (TPH). Surfactant with biosolid co-amendments and surfactant with green waste co-amendments achieved 80–90% TPH removal. The addition of inorganic fertilizer to those treatments stimulated the TPH removal to 95%, while surfactant single amendment reduced TPH to 42%. Co-addition of oil-degrading consortium with surfactant exhibited no differences to surfactant single amendments. The addition of biosolid increased substrate and bacterial density in soil. However, indigenous microorganisms proliferated in mixed-oil contaminated soil when green waste and nutrients were added, resulting in stimulation of soil remediation without the addition of external microorganisms.

Keywords: bioremediation, biostimulation, oil contaminated soil

คำนำ

การใช้น้ำมันปิโตรเลียมกับเครื่องจักรเครื่องยนต์ทำให้มีน้ำมันปิโตรเลียมในรูปแบบต่างๆ รั่วไหลหรือปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม น้ำมันปิโตรเลียมมีสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักแต่น้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วมักมีการปนเปื้อนของโลหะหนักด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสามารถสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต และถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารได้ สารปนเปื้อนนี้จึงควรถูกกำจัดออกจากสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็ว โดยวิธีการบำบัดฟื้นฟูที่ถูกต้องและเหมาะสม

เทคโนโลยีการบำบัดและฟื้นฟูทางชีวภาพอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมทำการย่อยสลายมลสารให้มีความเข้มข้นลดลงและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง การฟื้นฟูทางชีวภาพนี้เป็นทางเลือกสำหรับพื้นที่ปนเปื้อนน้ำมันปิโตรเลียมที่ความเข้มข้นต่ำถึงปานกลางและเป็นพื้นที่มีความเสี่ยงต่อมนุษย์และระบบนิเวศในระดับที่ไม่สูงมากนัก (Atlas and Philp, 2005) กระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติมักใช้เวลานานและอาจไม่สามารถลดความเข้มข้นจนถึงระดับที่ต้องการได้ จึงได้มีการพัฒนาวิธีเพื่อกระตุ้นจุลินทรีย์และเร่งกระบวนการฟื้นฟู เช่น การเติมจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลายหรือ bioaugmentation และการกระตุ้นโดยการเติมสารอื่นหรือ biostimulation เช่น สารลดแรงตึงผิว ธาตุอาหาร อินทรีย์วัตถุ อากาศหรือสารให้ออกซิเจน หรือหลายวิธีร่วมกัน (Molina-Barahona et al., 2004; Suja et al., 2014; Patowarya et al., 2018; Koshlaf et al., 2019; Varjanis and Upasani, 2019; Gielnik et al., 2021) คณะผู้วิจัยได้เคยรายงานผลฟื้นฟูดินปนเปื้อนน้ำมันผสมจากบริเวณโรงงานเกี่ยวกับโลหะ โดยการเติมน้ำยาซักผ้าเพื่อชะน้ำมันออกจากอนุภาคดินเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้และการเติมกากตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นแหล่งอาหารและแหล่งจุลินทรีย์ (กิตติศักดิ์, 2557) ซึ่งผลการศึกษาชี้ว่า การกระตุ้นจุลินทรีย์ดินด้วยวิธีเดียวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูได้สูงกว่าสภาวะธรรมชาติแต่สามารถกำจัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนได้เพียงร้อยละ 50 เท่านั้น ส่วนการกระตุ้นร่วมกันจะเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูเป็นอย่างมาก คณะผู้วิจัยจึงนำผลการศึกษาดังกล่าวมาต่อยอดออกแบบการศึกษาครั้งนี้โดยใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นหลักและทดลองร่วมการเติมอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารโดยเลือกใช้สารเคมีและวัสดุจากในท้องถิ่น ได้แก่ กากตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เศษพืช และปุ๋ยเคมีทางการเกษตร เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนจริงต่อๆไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ดินปนเปื้อน

เก็บดินตัวอย่างมาจากส่วนซ่อมบำรุงรถยนต์ของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ขนาดพื้นที่ 400 ตารางเมตร มีการปนเปื้อนน้ำมันเครื่องและน้ำมันหล่อลื่นอย่างต่อเนื่องนานกว่า 5 ปี มีลักษณะสีดำเนื้อดินร่วน มีกลิ่นน้ำมันชัดเจน แบ่งพื้นที่เป็น 2×2 เมตร เก็บตัวอย่าง ณ จุดตัด เก็บหน้าดินที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร นำดินตัวอย่างผสมรวมกัน ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตรเพื่อกำจัดก้อนหินและเศษไม้ ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดลองในครั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติเป็นไปตามที่รายงานก่อนหน้า (กิตติศักดิ์, 2557) เนื้อดินเป็นดินทรายปนทรายแป้ง มีค่า C:N:P เท่ากับ 100 : 5.88 : 1.47 ปนเปื้อนน้ำมันในรูป TPH 1130 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งเป็นความเข้มข้นปานกลาง pH 9.7 และมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 20 ความหนาแน่นแบคทีเรียกลุ่ม

เฮทเธอโรโทรป (Heterotrophic bacteria) 7.1×10^{6} เอ็มพีเอ็น/กรัม นอกจากนี้ยังมีการตรวจพบโลหะหนักโครเมียม นิกเกิล แคดเมียมและตะกั่ว 893.66, 59.03, 1.14, 199.48 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การกระตุ้นจุลินทรีย์ด้วยวิธีต่างๆ

ทำการทดลองในถาดแตนเลสขนาด 32×22×4 เซนติเมตร ใช้ดินตัวอย่าง 500 กรัม (wet weight) ทำการทดลองทั้งสิ้น 12 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ โดยมีชุดการทดลองดังแสดงใน Table 1

Table 1 Summary of experimental conditions conducted in this study

Treatment	Surfactant addition	Co-amendment	Inorganic nutrient	Remark
1	✓	biosolid	-	
2	✓	biosolid	✓	
3	✓	oil-degrading bacteria	-	
4	✓	oil-degrading bacteria	✓	
5	✓	green waste	-	
6	✓	green waste	✓	
7	-	oil-degrading bacteria	-	
8	-	green waste	-	
9	-	biosolid	-	
10	-	-	✓	
11	✓		-	
12	-	-	-	moisture control only

กากตะกอนจุลินทรีย์และเศษพืชเติมในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยกากตะกอนจุลินทรีย์ ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง มีค่า C:N เท่ากับ 3.98: 1 ความชื้นร้อยละ 79 ความหนาแน่นแบคทีเรียกลุ่มเฮทเธอโรโทรป 7.8×10^{9} เอ็มพีเอ็น/กรัม (กิตติศักดิ์, 2557) เศษพืชได้จากหญ้าและเศษผักใบเขียว หั่นให้มีขนาดไม่เกิน 2.5 เซนติเมตร สารลดแรงตึงผิวใช้น้ำยาล้างจานทางการค้าความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร เติมในดินตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ธาตุอาหารอนินทรีย์ใช้ปุ๋ยยูเรียชนิดเม็ด ให้มีค่า C:N:P เท่ากับ 100: 10: 1.47 จุลินทรีย์บริสุทธิ์แยกมาจากดินปนเปื้อนน้ำมันที่ผ่านการฟื้นฟูแล้วจากการศึกษาครั้งก่อนหน้า (กิตติศักดิ์, 2557) โดยเตรียมหัวเชื้อเข้มข้น 10^{9} ซีเอฟยู/มิลลิลิตร เติมหัวเชื้อ 10 มิลลิลิตร ในดินตัวอย่าง ทุกชุดการทดลองจะปรับความชื้นเริ่มต้นให้อยู่ในช่วงร้อยละ 40–60 รักษาความชื้นให้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 40 ตลอด 60 วันของการทดลอง

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิเคราะห์สารอินทรีย์ในดินด้วยวิธี Walkley Black modified acid-dichromate digestion, $FeSO_4$ titration method (กองวิเคราะห์ดิน, 2540) วิเคราะห์ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (Total petroleum hydrocarbon) ตามวิธีของ Mehrasbi, 2003 โดยเติมโทลูอีน 10 มิลลิลิตร ผสมเบาๆ เพื่อให้ toluene กับดินผสมกันประมาณ 20–40 นาที นำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วยเครื่อง Uv-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยใช้โทลูอีนที่ไม่มีการเติมตัวอย่างดินเป็นแบลงค์ วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียเฮทเธอโรโทรบด้วยวิธี Standard plate count ตรวจวัดกิจกรรมเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส ตามวิธี Okuda et al., 2014 โดยชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัม เติม 0.1% 2,3,5–triphenyltetrazolium chloride 5 มิลลิลิตร และ 0.2 โมล/ลิตร Tris/HCl buffer (pH 7.6) เขย่าให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน 2 นาที จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เติม 1 M H_2SO_4 และ โทลูอีน 5 มิลลิลิตร เพื่อหยุดการทำปฏิกิริยา นำตัวอย่างบ่มต่อด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที นำไปทำการตรวจวัด Dehydrogenase activity ด้วยเครื่อง Uv-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 484 นาโนเมตร โดยจะแสดงออกเป็นปริมาณของ triphenylformazan

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เปรียบเทียบผลการศึกษาด้วยวิธี One Way Anova ใช้วิธีการเปรียบเทียบเชิงซ้อน ซึ่งอยู่ในกรอบของ equal variances assumed (ค่าแปรปรวนของแต่ละทรีตเมนต์เท่ากัน) เลือกวิธี LSD และ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาการกระตุ้นจุลินทรีย์ด้วยวิธีเดียวได้แสดงไว้ใน Fig. 1 ชุดควบคุม และชุดเติมธาตุอาหารอนินทรีย์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรคาร์บอนในรูป TPH ประมาณร้อยละ 5 คาดว่าเป็นผลจากกลไกทางกายภาพ เช่น การระเหยของ TPH เห็นได้ว่าการเพิ่มธาตุอาหารอนินทรีย์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูได้ ทั้งนี้ธาตุอาหารอาจไม่ใช่ปัจจัยจำกัดสำหรับการศึกษานี้หรือปัจจัยอื่นมีอิทธิพลต่อการทำงานของจุลินทรีย์มากกว่า

ชุดเติมกากตะกอนจุลินทรีย์มีไฮโดรคาร์บอนในรูป TPH คงเหลือร้อยละ 42 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับชุดเติมสารลดแรงตึงผิว ส่วนชุดเติมเศษพืชมี TPH คงเหลือร้อยละ 64 แม้ประสิทธิภาพการกำจัด TPH จะใกล้เคียงกัน แต่รูปแบบการลดลงของ TPH ของชุดเติมสารลดแรงตึงผิวแตกต่างจากชุดเติมเศษพืชและชุดเติมกากตะกอนจุลินทรีย์โดยสิ้นเชิง โดย TPH ในชุดเติมสารลดแรงตึงผิว ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3–7 วันแรกแล้วค่อยลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเหลือเพียงร้อยละ 40 ในวันที่ 20 ของการทดลอง หลังจากนั้น TPH มีค่าคงที่ ส่วน TPH ของชุดเติมเศษพืชและชุดเติมกากตะกอนจุลินทรีย์ลดลงช้าๆอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง ผลการทดลองบ่งชี้ว่ากลไกการกระตุ้นการฟื้นฟูของสารลดแรงตึงผิวแตกต่างจากกลไกการกระตุ้นของเศษพืชและกากตะกอน ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิวชะไฮโดรคาร์บอนออกมาจากอนุภาคดินและเพิ่มการละลายของไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น (Patowarya et al., 2018) ทำให้อัตราการกำจัด TPH เป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรก อย่างไรก็ดีการย่อยสลายกลับหยุดลงในช่วงหลังแสดงว่ายังมีปัจจัยจำกัดอื่นอยู่ การเติมเศษพืชและกากตะกอนจุลินทรีย์ลงไปในดินปนเปื้อนทำให้สารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนเจือจาง และปรับลักษณะทางกายภาพของดินปนเปื้อน (Molina-Barahona et al., 2004) อีกทั้งเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้ลงในดินปนเปื้อน ชี้ให้เห็นว่าอินทรีย์วัตถุซึ่งเป็นอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในดินมีต่ออัตราการย่อยสลาย นอกจากนี้การเติมกากตะกอนจุลินทรีย์ยังเป็นการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบด้วย (Varjanis and Upasani, 2019)

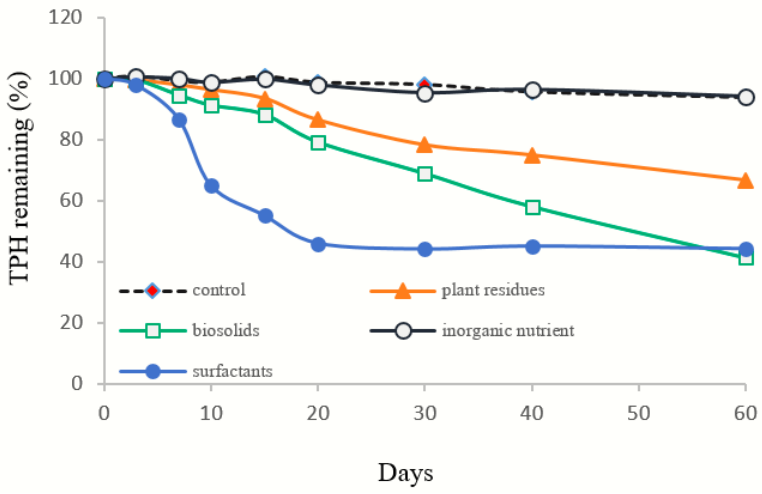


Fig. 1 TPH remaining profiles for single amendment treatment

การกระตุ้นจุลินทรีย์ร่วมหลายวิธีใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารกระตุ้นหลักและใช้ร่วมกับการกระตุ้นวิธีอื่นๆ จากผลการศึกษาที่แสดงไว้ใน Fig. 2 ชุดเติมสารลดแรงตึงผิวร่วมกับกากตะกอนจุลินทรีย์ และชุดเติมสารลดแรงตึงผิวร่วมกับกากตะกอนจุลินทรีย์และธาตุอาหารอนินทรีย์มีประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนมากกว่าร้อยละ 95 ภายในเวลาเพียง 20 วัน แสดงว่าชุดการทดลองดังกล่าวสามารถลดอิทธิพลของปัจจัยจำกัดได้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือชะน้ำมันที่ปนเปื้อนออกมาจากอนุภาคดิน และสามารถย่อยสลายน้ำมันนั้นได้เกือบทั้งหมด แสดงว่ากากตะกอนการเพิ่มจำนวนและความหลากหลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์เริ่มต้นและการเพิ่มอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายตลอดจนธาตุอาหารที่จำเป็นลงไปในดินเป็นการกระตุ้นจุลินทรีย์และส่งเสริมให้มีการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนเมื่อใช้ร่วมกับการเติมสารลดแรงตึงผิวจึงทำให้เกิดการฟื้นฟูอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ชุดเติมเศษพืชร่วมกับสารลดแรงตึงผิวและธาตุอาหารอนินทรีย์มีประสิทธิภาพในการกำจัด TPH มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากชุดเติมกากตะกอน ส่วนชุดเติมเศษพืชร่วมกับสารลดแรงตึงผิวก็มีประสิทธิภาพในการกำจัด TPH มากกว่าร้อยละ 80 มีความแตกต่างทางสถิติจากชุดการทดลองทั้งสามชุดที่กล่าวแล้ว อย่างไรก็ตามการทดลองชุดนี้แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์ท้องถิ่นสามารถฟื้นฟูดินปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสม การเติมเศษพืชช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุ อีกทั้งเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายเศษพืชเพื่อการเจริญเติบโตเป็นการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์และความหลากหลายทางชีวภาพคล้ายกับการทำปุ๋ยหมัก (Molina-Barahona et al., 2004) ส่วนการเติมจุลินทรีย์บริสุทธิ์ที่คัดเลือกได้จากตัวอย่างดินที่ผ่านการฟื้นฟูมาแล้วกลับไม่มีประสิทธิภาพแม้ว่าจะมีการเติมธาตุอาหารอนินทรีย์ร่วมด้วย ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากจุลินทรีย์เริ่มต้นที่เติมมีปริมาณไม่เหมาะสม สาเหตุอีกประการหนึ่งคือสภาวะของดินปนเปื้อนไม่ส่งเสริมการดำรงชีวิตและเพิ่มจำนวนของ

จุลินทรีย์ที่เติมลงไปโดยเฉพาะการขาดอินทรีย์วัตถุที่เป็นอาหารสำหรับจุลินทรีย์ ทำให้มีผลการฟื้นฟูใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่เติมสารลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียว

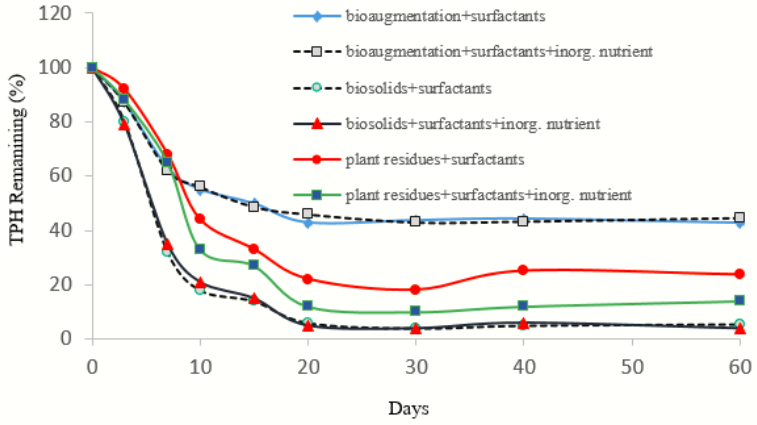


Fig. 2 TPH remaining profiles for surfactant and co-amendments

แบคทีเรียเฮทเทอโรโทรปเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงาน แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเพิ่มจำนวนเมื่อได้รับสับสเตรทและมีจำนวนลดลงเมื่อสับสเตรทหมดไป การเติมกากตะกอนจุลินทรีย์เป็นการเติมทั้งจุลินทรีย์และสับสเตรทดังนั้นจึงทำให้แบคทีเรียเฮทเทอโรโทรปเพิ่มขึ้นสูงสุด (Fig. 3A) การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียท้องถิ่นอันเป็นผลจากการกระตุ้นสามารถเห็นได้ชัดเจนในชุดการทดลองเติมสารลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียว การเพิ่มขึ้นของแบคทีเรียเฮทเทอโรโทรปอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ถูกสารลดแรงตึงผิวชะออกมากลายเป็นสับสเตรทให้จุลินทรีย์ในดิน การเติมเศษพืชเพียงอย่างเดียวแม้ว่าจะทำให้แบคทีเรียเพิ่มขึ้นช้ากว่าชุดการทดลองที่เติมสารลดแรงตึงผิวหรือกากตะกอนแต่ชุดการทดลองเติมเศษพืชจะสามารถรักษาความหนาแน่นแบคทีเรียเฮทเทอโรโทรปในระดับสูงได้นานกว่าชุดการทดลองเติมกากตะกอนหรือสารลดแรงตึงผิวพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของแบคทีเรียเฮทเทอโรโทรปตอบสนองการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนสับสเตรทซึ่งจุลินทรีย์จำนวนหนึ่งอาจไม่มีความเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในดินโดยตรงดังจะเห็นได้จากความหนาแน่นของแบคทีเรียเฮทเทอโรโทรปของชุดการทดลองกากตะกอนจุลินทรีย์ เศษพืช เศษพืชร่วมกับสารลดแรงตึงผิวร่วมกับธาตุอาหารอนินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกัน

กิจกรรมเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการบอกระดับการตอบสนองการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยจุลินทรีย์ กิจกรรมเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสมีค่าสูงระหว่างวันที่ 7–20 ของการทดลองซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่มีการลดลงของ TPH มากที่สุด (Fig. 3B) การแสดงออกของกิจกรรมเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสสามารถให้ข้อมูลในภาพ รวมถึงการตอบสนองของจุลินทรีย์ที่มีต่อการกระตุ้นแต่ละวิธีจึงมีเพียงชุดควบคุมที่มีการแสดงออกของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสในระดับต่ำตลอดการทดลอง ส่วนชุดเติมกากตะกอนร่วมกับสารลดแรงตึงผิวเป็นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพการฟื้นฟูสูงมากกว่าร้อยละ 90 และมีระดับกิจกรรมเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างชัดเจน

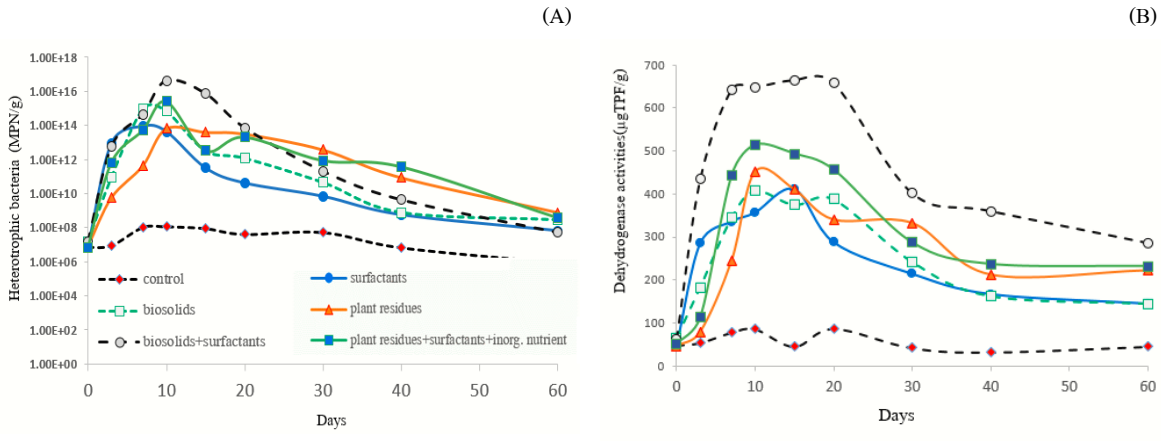


Fig. 3 Density of heterotrophic bacteria (A) and dehydrogenase activities (B) of selected treatments

สรุป

พื้นที่ปนเปื้อนน้ำมันในระดับความเข้มข้นที่ไม่สูงมากพบได้ทั่วไปทั้งในเขตชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม ในการฟื้นฟูพื้นที่ดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงเน้นกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าและไม่ส่งผลกระทบรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม ในสภาวะที่ศึกษาการทดลองที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวร่วมกับการกระตุ้นจุลินทรีย์วิธีอื่นสามารถกระตุ้นการฟื้นฟูได้สูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีเดียว เพราะสามารถเพิ่มความสามารถเข้าถึงมลสารของจุลินทรีย์และสร้างสภาวะที่สนับสนุนการดำรงชีวิตและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย ในการศึกษานี้การใช้สารลดแรงตึงผิวในรูปน้ำยาล้างจานทางการค้าความเข้มข้นร้อยละ 20 ปริมาตร 10 มล. ร่วมกับการเติมกากตะกอนในสัดส่วนร้อยละ 10 น้ำหนักเปียกของดินบำบัดได้สูงถึงร้อยละ 95 การใช้สารสารลดแรงตึงผิวร่วมกับเศษพืชในสัดส่วนร้อยละ 10 น้ำหนักเปียกของดินบำบัดได้ร้อยละ 80 โดยการเติมธาตุอาหารอนินทรีย์ในชุดเศษพืชเพิ่มประสิทธิภาพของบำบัดได้เป็นร้อยละ 90 การทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ท้องถิ่นสามารถฟื้นฟูดินปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องเติมจุลินทรีย์จากภายนอกแต่อย่างใด

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีงบประมาณ 2558

เอกสารอ้างอิง

กิตติศักดิ์ จีนาคม. 2557. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดทางชีวภาพของดินปนเปื้อนน้ำมันเครื่องโดยการเติมกากชีวภาพและสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กองวิเคราะห์ดิน. 2540. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีดินกับการวิเคราะห์ดินในห้องปฏิบัติการ. กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

Atlas, R.M., Philp, J.C. 2005. Bioremediation: Applied microbial solutions for real-world environmental cleanup. ASM press, Washington DC, USA.

Gielnik, A., Pechaud, Y., Huguenot, D., C´ebron, A., Esposito, G., Hullebusch, E. 2021. Functional potential of sewage sludge digestate microbes to degrade aliphatic hydrocarbons during bioremediation of a petroleum hydrocarbons contaminated soil. J. Environ. Management 280: 111648. doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111648

Koshlaf E., Shahsavari, E., Haleyur, N., Osborn, A., Ball., A.S. 2019. Effect of biostimulation on the distribution and composition of the microbial community of a polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated landfill soil during bioremediation. Geoderma 338: 216–225.

Mehrasbi, M., Haghighi, B., Shariat, M., Naseri, S., Naddafi, K. 2003. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil. Iran J. Public Health. 32: 28–32.

Molina-Barahona, L., Rodriguez-Vaquez, R., Hernandez-Velasco, M., Vega-JarQuin, C., Zapata-Paez, O., Mendoza Cantuand, A., Albores, A. 2004. Diesel removal from contaminated soil by biostimulation and supplement with crop residues. Appl. Soil Ecol. 27: 165–175.

Patowarya, R., Patowarya, K., Kalitab, M., Deka, S. 2018. Application of biosurfactant for enhancement of bioremediation process of crude oil contaminated soil. Int. Biodeter. Biodegr. 129: 50–60.

Suja, F., Rahim, F., Taha, M.R., Hambali, N., Razali, M.R., Khalid, A., Hamzah, A. 2014. Effects of local microbial bioaugmentation and biostimulation on the bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in crude oil contaminated soil based on laboratory and field observations. Int. Biodeter. Biodegr. 90: 115–122.

Varjani, S., Upasani, V.N. 2019. Influence of abiotic factors, natural attenuation, bioaugmentation and nutrient supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil. J. Environ. Management 245: 358–366.

การบำบัดเมโทรนิดาโซลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรี

Treatment of metronidazole in synthetic wastewater by venturi-type ozonation process

ศศิธร จิตติมา*, ชลอ จารุสุทธิรักษ์

Sasithorn Jittima*, 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: sasithorn.jm@gmail.com

บทคัดย่อ

เมโทรนิดาโซล (Metronidazole, MNZ) เป็นยาปฏิชีวนะที่ใช้รักษาโรคในมนุษย์และสัตว์ การปนเปื้อนของ MNZ ในน้ำเสียและแหล่งน้ำธรรมชาติอาจก่อให้เกิดปัญหาเชื้อดื้อยาได้ จึงต้องมีการบำบัดที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด MNZ ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรีในการผสมก๊าซ O_3 กับน้ำเสีย โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณ O_3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MNZ และ ค่า pH จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณ O_3 ระยะเวลา และ pH ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด MNZ เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของ MNZ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สภาวะที่เหมาะสมได้แก่ อัตราการผลิตก๊าซ O_3 เท่ากับ 72 mg/h ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MNZ เท่ากับ 40 mg/l และค่า pH เท่ากับ 9 และ 3 สามารถบำบัด MNZ ได้ถึง 92% ที่เวลา 120 นาที การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ O_3 และ MNZ เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.02 min^{-1}

คำสำคัญ: เมโทรนิดาโซล, ยาปฏิชีวนะ, เวนทูรี, โอโซเนชัน

Abstract

Metronidazole (MNZ) is an antibiotic used among humans and animals. Contamination of MNZ in wastewater and aquatic environment leads to antibiotic resistance of microorganisms. It is necessary to treat MNZ appropriately prior to release into the environment. This research aimed to study the removal efficiency and factors affecting removal efficiency in the treatment of MNZ containing in synthetic wastewater by using venturi-type ozonation process. The effects of ozone loading, initial concentration of MNZ and solution pH were investigated. The results showed that the increase of ozone loading, reaction time and pH enhanced the MNZ removal efficiency of MNZ. While the increase of MNZ concentration reduced the removal efficiency. An ozone loading of 72 mg/h, initial MNZ concentration of 40 mg/l and solution pH of 9 and 3 were optimum condition for MNZ removal with a removal efficiency of 92% at 120 min. The study of reaction kinetic indicated that reaction of MZN and ozone followed the pseudo-first order kinetic with a reaction rate constant (k) of 0.02 min^{-1}.

Keywords: antibiotic, metronidazole, ozonation, venture

คำนำ

เมโทรนิดาโซล (Metronidazole; MNZ) เป็นยาปฏิชีวนะที่จัดอยู่ในกลุ่ม nitroimidazole มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการรักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัว และ แบคทีเรียทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน มีฤทธิ์ในการต้านการอักเสบใช้ในการรักษามนุษย์และสัตว์ พบมีการใช้ยาชนิดนี้ทั้งใน ปศุสัตว์ และ อุตสาหกรรมปลาสวยงาม (Santana et al., 2017) อย่างไรก็ตามร่างกายของมนุษย์และสัตว์ไม่สามารถดูดซึมยาปฏิชีวนะได้ทั้งหมด ยาบางส่วนจึงถูกขับถ่ายออกนอกร่างกาย และมีโอกาสปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมผ่านน้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากโรงพยาบาล รวมทั้งน้ำทิ้งจากฟาร์มปลา และฟาร์มปศุสัตว์ต่างๆ (Fang et al., 2011) การตกค้างของ MNZ ในสิ่งแวดล้อมอาจก่อให้เกิดปัญหาเชื้อดื้อยาที่เป็นปัญหาด้านสาธารณสุขได้ (Nasseh et al., 2019) ดังนั้นต้องทำการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม การบำบัด MNZ ในน้ำเสียมีหลายวิธีได้แก่ การบำบัดทางชีวภาพ กายภาพ และ เคมี Kummerer et al. (2000) ได้ศึกษาการบำบัด MNZ ด้วยวิธีทางชีวภาพซึ่งเป็นวิธีที่ถูกกว่าวิธีอื่น ๆ แต่มีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจาก MNZ เป็นยาปฏิชีวนะที่มีคุณสมบัติคงตัว มีโครงสร้างที่เป็นวง และ มีฤทธิ์ยับยั้งการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิกของแบคทีเรียในระบบบำบัด วิธีกายภาพ เช่น การดูดซับด้วยเปลือกอัลมอนด์และเมล็ดกาแฟเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและเดินระบบง่ายแต่ใช้ระยะเวลานานและต้องมีกระบวนการกำจัดสารที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ (Regeneration) (Flores-Cano et al., 2016) วิธีการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (MBR) ควบคู่กับรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน (Reverse Osmosis: RO) สามารถลดปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนให้เหลือน้อยลงได้ แต่ต้องเพิ่มกระบวนการบำบัดน้ำส่วนที่ไม่ผ่านเมมเบรนด้วย (Dolar et al., 2012) วิธีการตกตะกอน MNZ ด้วยสารสร้างตะกอน (coagula) ให้ประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากคุณสมบัติของ MNZ ที่มีความคงตัวและละลายน้ำได้สูง ทำให้สามารถบำบัดได้เพียงบางส่วนเท่านั้น และก่อให้เกิดตะกอนในปริมาณมากซึ่งจำเป็นต้องมีกระบวนการจัดการกับตะกอนต่อไป (Ramavandi and Akbarzadeh, 2014) การบำบัดด้วยวิธีโอโซเนชันเป็นวิธีการออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด MNZ เนื่องจากโอโซน (O_3) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง สามารถทำลายโครงสร้างของ MNZ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วโดยผ่าน 2 กลไก คือ กลไกการทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ O_3 (Direct ozonation) กับกลไกการเกิดปฏิกิริยาผ่านแรดิคอล (Radical reactions) (Erol and Ozbelge, 2008) อย่างไรก็ตาม ในการเดินระบบโอโซเนชันโดยทั่วไปใช้ระบบหัวกระจายก๊าซในการผสมก๊าซ O_3 ลงในน้ำเสีย ซึ่งมีข้อจำกัดเนื่องจากก๊าซ O_3 มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด MNZ ไม่ดีเท่าที่ควร Liao et al. (2011) ศึกษาการบำบัด N-nitrosodimethylamine (NDMA) and nitrobenzene (NB) ด้วยกระบวนการโอโซเนชันโดยใช้ระบบเวนทูรี (Venturi) เปรียบเทียบกับระบบหัวกระจายก๊าซ พบว่าระบบเวนทูรีให้ประสิทธิภาพการบำบัด NDMA และ NB สูงกว่าระบบหัวกระจายก๊าซ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการผสมก๊าซ O_3 กับน้ำเสียโดยอาศัยหลักการทำงานของระบบเวนทูรีที่เป็นคอคอด เป็นการเพิ่มความเร็วของน้ำเสียเมื่อไหลผ่านระบบเวนทูรี และเกิดความดันลบในเส้นท่อ ทำให้ก๊าซ O_3 สามารถละลายในน้ำเสียได้ดีกว่าระบบหัวกระจายก๊าซ โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด MNZ ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรีได้แก่ ปริมาณก๊าซ O_3 ระยะเวลาบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MNZ และ ค่า pH ผลจากการศึกษาสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการโอโซเนชันเพื่อการบำบัดน้ำเสียชุมชน โรงพยาบาล ฟาร์มเลี้ยงสัตว์หรืออุตสาหกรรมอื่นๆที่มี MNZ หรือยาปฏิชีวนะชนิดอื่นปนเปื้อนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

สารโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) และโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) จากบริษัท Ajax finech ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต) Na_2HPO_4 (จากบริษัท Applichem โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต) NaH_2PO_4 (จากบริษัท Kemaus โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากบริษัท Carlo erba reagents และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยสารทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์ ส่วนสารมาตรฐาน MNZ ได้จากสำนักยาและวัตถุเสพติด กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ MNZ

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ MNZ4 0 mg/l โดยชั่งน้ำหนักยา Metrolex จากบริษัท Siam Bheasach 0.0724 mg นำมาละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เป็น 1000 ml ในขวดปรับปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาค่า MNZ ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 340 nm. (Naveed and Qamar, 2014)

การติดตั้งและเดินระบบโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรี

ระบบโอโซเนชันที่ใช้ (ดังแสดงใน Fig. 1) ประกอบด้วย: (1) เครื่องกำเนิดก๊าซ O_3 ที่สามารถปรับกำลังผลิตได้ 3 ระดับ ได้แก่ 58, 72 และ 128 mg/h โดยศึกษาอัตราการผลิตก๊าซ O_3 ด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลาย KI 2% ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที จากนั้นไทเทรตกับสารละลาย $Na_2S_2O_3$ ตามวิธีไอโอโดเมทรี (Iodometry) (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552); (2) ถังปฏิกิริยาทำจากแผ่นอะคริลิคทรงสี่เหลี่ยมขนาด 12×12×15 cm.; (3) ปั๊มหมุนเวียนน้ำและระบบท่อที่มีอุปกรณ์เวนทูรี ท่อนำก๊าซ O_3 จากเครื่องกำเนิดก๊าซ O_3 พร้อมจุดเก็บตัวอย่างน้ำหลังการบำบัด

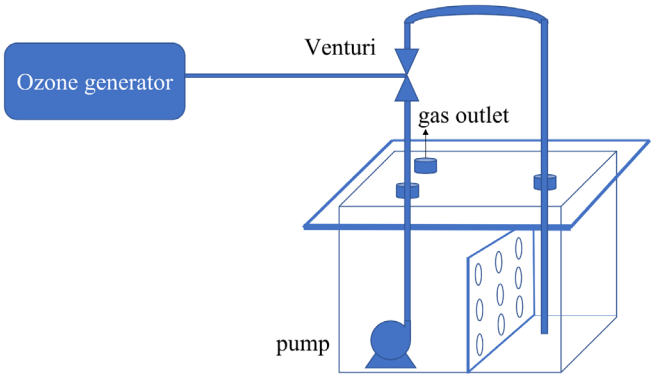


Fig. 1 The schematic of the venture–type ozone reactor

ทำการเดินระบบโดยเติมน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตรลงในถังปฏิกิริยา เปิดเครื่องกำเนิด O_3 และปั๊มหมุนเวียนน้ำ เมื่อน้ำถูกสูบจากถังปฏิกิริยาผ่านอุปกรณ์เวนทูรีจะเกิดสภาวะสุญญากาศบางส่วนทำให้เกิดแรงดูดก๊าซ O_3 จากเครื่องกำเนิด O_3 เข้าสู่แนวท่อและละลายผสมกับน้ำตัวอย่างก่อนปล่อยกลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยา โดยเบื้องต้นทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด MNZ เปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้เวนทูรีและหัวกระจายก๊าซ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด MNZ

ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ MNZ 40 mg/l ค่า pH 6 ปริมาตร 1 ลิตร ทำการแปรค่ากำลังการผลิตก๊าซ O_3 ที่ 58 72 และ 128 mg/h การศึกษาผลของความเข้มข้น MNZ แปรค่าความเข้มข้นที่ 10, 20 และ 40 mg/l ส่วนการศึกษาผลของค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ แปรค่า pH ในช่วง 3–9 ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที และหยุดปฏิกิริยาด้วย $Na_2S_2O_3$ ความเข้มข้น 0.1 N ก่อนนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาค่า MNZ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัด MNZ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัด MNZ

โดยนำความเข้มข้นของ MNZmg/lที่เหลือ (อยู่ในสารละลายกับเวลาการเกิดปฏิกิริยามาเขียนกราฟเชิงเส้น เพื่อเปรียบเทียบว่าการเกิดปฏิกิริยาสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยารูปแบบใด และหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา) k (Nasseh et al., 2019)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด MNZ ด้วยระบบเวนทูรีและการใช้หัวกระจายก๊าซ

ผลการศึกษาแสดงดัง Fig. 2 พบว่า ระบบเวนทูรีให้ประสิทธิภาพการบำบัด MNZ ดีกว่าถึง 77% ในขณะที่ระบบหัวกระจายก๊าซให้ประสิทธิภาพเพียง 52% เนื่องจากระบบเวนทูรีใช้ท่อที่มีคอคอดส่งผลให้ความเร็วน้ำเพิ่มขึ้นขณะไหลผ่าน และเกิดความดันลบในเส้นท่อ ทำให้ก๊าซ O_3 สามารถละลายในน้ำเสียได้ดีกว่าระบบหัวกระจายก๊าซ จึงช่วยลดระยะเวลาและเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่าง O_3 และน้ำได้ดีกว่าแบบหัวกระจายก๊าซ จึงมี O_3 เข้าทำปฏิกิริยากับ MNZ ได้มากกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ Liao et al. (2011) และ Carvalho et al. (2015) ในขั้นต่อไปใช้กระบวนการโอโซเนชันที่มีระบบเวนทูรีในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด MNZ

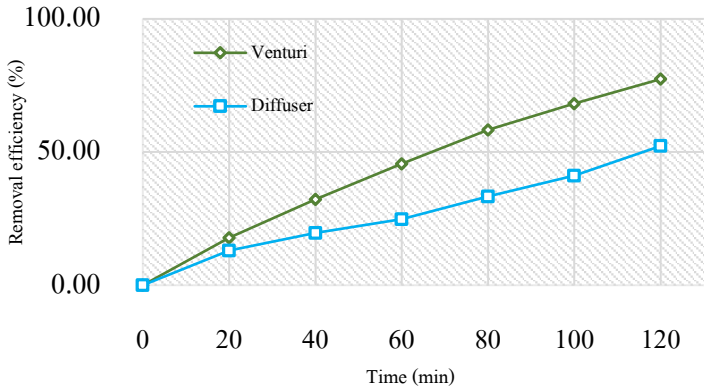


Fig. 2 MNZ removal efficiencies by ozonation processes comparison between venturi and diffuser types

Note: O_3 production = 72 mg/h, [MNZ] = 40 mg/L and pH = 6)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด MNZ

ผลของระยะเวลาและปริมาณ O_3 ต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ผลการทดลองแสดงดัง Fig. 3 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด MNZ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบำบัดและปริมาณก๊าซ O_3 เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาและปริมาณก๊าซ O_3 เป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซ O_3 สะสมที่ทำหน้าที่รับอิเล็คตรอนในการเกิดปฏิกิริยากับสาร MNZ อย่างไรก็ตามการเพิ่มกำลังการผลิตก๊าซ O_3 จาก 72 เป็น 128 mg/h ให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกันโดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > .05$) เนื่องจากการทดลองใช้ปริมาณสาร MNZ คงที่การเพิ่มปริมาณก๊าซ O_3 ถึง 128 mg/h เป็นปริมาณ O_3 ที่มากเกินพอในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Khataee et al. (2017) และ Qi et al. (2011)

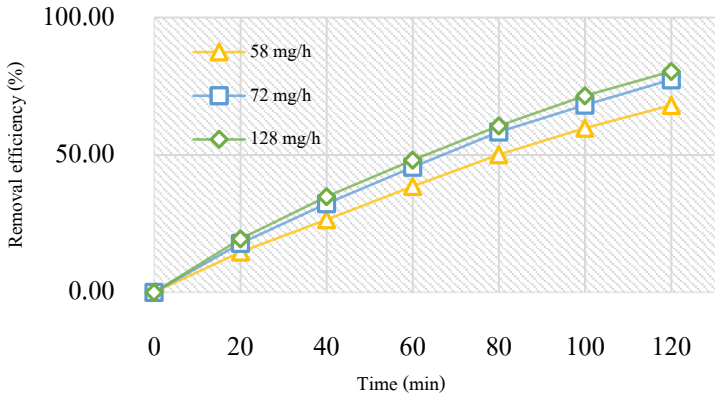


Fig. 3 Effect of ozone production on MNZ removal efficiency ([MNZ] = 40 mg/L and pH = 6)

ผลของความเข้มข้น MNZ ต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ผลการทดลองแสดงใน Fig. 4 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้น MNZ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นน้อยจะมีปริมาณสาร MNZ ที่ต้องถูกกำจัดน้อยกว่าที่ความเข้มข้นสูง ในขณะที่ก๊าซ O_3 ที่ใช้ในการทดลองมีอัตราการผลิตคงที่ สอดคล้องกับการศึกษาของ Khataee et al. (2017) อย่างไรก็ตาม ที่เวลา 120 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MNZ 10 และ 20 mg/L มีค่าใกล้เคียงกันโดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากปริมาณก๊าซ O_3 ที่เกินพอ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Li et al. (2014)

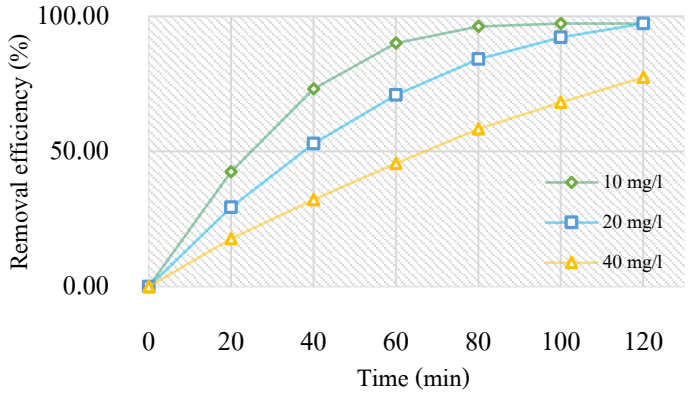


Fig. 4 Effect of MNZ initial concentration on MNZ removal efficiency

Note: O_3 production = 72 mg/h, pH = 6

ผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัด

จากผลการศึกษา พบว่าการเพิ่มค่า pH จาก 6 เป็น 7 และ 9 ให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม pH ส่งผลให้การบำบัดเกิดปฏิกิริยาผ่านกลไกแรดิคอล ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ O_3 และเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ($^{\bullet}OH$) ที่มีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูงกว่าก๊าซ O_3 ดังสมการ $O_3 + OH^- \longrightarrow O_3^{\bullet-} + {}^{\bullet}OH$ จึงมีส่วนทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Khataee et al. (2017) อย่างไรก็ตาม ที่ pH 3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัด MNZ มีค่าสูงใกล้เคียงกับที่ pH 9 โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่า O_3 สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ MNZ และผ่านกลไกแรดิคอลได้ดี โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาบริเวณพันธะคู่ของคาร์บอน (C = C) และพันธะคู่ของ C = N ในโมเลกุล MNZ (Malakootian et al.,2019)

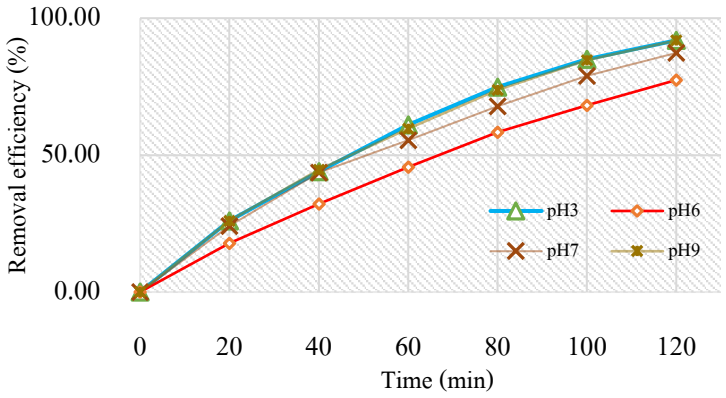


Fig. 5 Effect of pH on MNZ removal efficiency

Note: (O_3 production = 72 mg/h, [MNZ] = 40 mg/L)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของ MNZ เท่ากับ 40 mg/L โดยแปรค่าปริมาณ O_3 และค่า pH จากการวิเคราะห์สมการเชิงเส้นของจลนพลศาสตร์การเกิดพบว่าปฏิกิริยาการบำบัด MNZ ด้วย O_3 สอดคล้องกับสมการการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง แต่เนื่องจากการทดลองนี้มีการใช้ปริมาณก๊าซ O_3 ที่มากเกินพอ จึงทำให้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order kinetic) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Erol and OzbelGe (2008) และ Nasseh et al. (2019) Fig. 6 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k) ที่สภาวะต่างๆ พบว่าที่สภาวะกำลังการผลิตก๊าซ O_3 72 mg/h ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/L และ ค่า pH 3 และ 9 มีค่า k สูง แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 0.02 min^{-1}

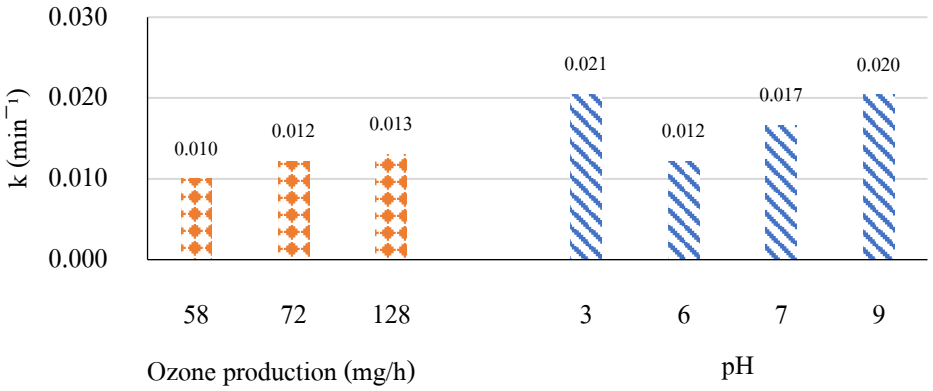


Fig. 6 Kinetic studies of MNZ degradation by ozone

ในการบำบัดสาร MNZ ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน หากปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ (Complete mineralization) อาจก่อให้เกิดสารมัธยันต์ (Intermediates) ชนิดต่างๆ ได้ จากงานวิจัยของ Kermani et al. (2015) พบว่า สารมัธยันต์ที่เกิดจากการบำบัด MNZ ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน ได้แก่ Chloroform ,2,4–Dimethyl oxazole, 3–acetyl–2–oxazolidinone, Dodecane และ 1–Eicosanol ซึ่งสารบางชนิดมีโอกาสก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาสารมัธยันต์ดังกล่าว ในการศึกษาขั้นต่อไปจึงควรศึกษาชนิดและปริมาณของสารมัธยันต์ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโอโซเนชัน รวมทั้งการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการโอโซเนชันเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซ CO_2 และ H_2O

สรุป

กระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรีให้ประสิทธิภาพการบำบัด MNZ ในน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าการใช้หัวกระจายก๊าซ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด MNZ ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรี พบว่าที่ปริมาณ O_3 ระยะเวลาการบำบัด และค่า pH มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของ MNZ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัด MNZ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/L ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ระบบเวนทูรี คือ กำลังการผลิต O_3 72 mg/h ค่า pH 3 และ 9 สามารถบำบัด MNZ ได้ถึง 92% ที่เวลา 120 นาที การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ O_3 และ MNZ เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยที่สภาวะดังกล่าวมีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.02 min^{-1}

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2563

เอกสารอ้างอิง

เจตนิพิฐ สุดคงทอง, ณัฐพงศ์ โปรยสุรินทร์, นาตยา สุขประเสริฐ. 2552. การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอกทีฟด้วยกระบวนการโอโซเนชัน. ปริญญานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

Carvalho, H.C., Melo, M.S., Lima, C.J., Silveira Jr, L., Zangaro, R.A. 2015. Effectiveness of ozone-liquid mass transfer aiming ozone therapy. IFMBE Proceedings. 5: 1283–1285.

Dolar, D., Gros, M., Rodriguez-Mozaz, S., Moreno, J., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., Barcelo, D. 2012. Removal of emerging contaminants from municipal wastewater with an integrated membrane system, MBR–RO. J. Hazard. Mater. 239: 64–69.

Erol, F., Ozbelge, T.A. 2008. Catalytic ozonation with non-polar bonded alumina phases for treatment of aqueous dye solutions in a semi-batch reactor. Chem. Eng. J. 139: 272–283.

Fang, Z., Chen, J., Qiu, X., Qiu, X., Cheng, W., Zhu, L. 2011. Effective removal of antibiotic metronidazole from water by nanoscale zero-valent iron particles. Desalination 268: 60–67.

Flores-Cano, J.V., Sanchez-Polo, M., Messoud, J., Velo-Gala, I., Ocampo-Perez, R., Rivera-Utrilla, J. 2016. Overall adsorption rate of metronidazole, dimetridazole and diatrizoate on activated carbons prepared from coffee residues and almond shells. J. Environ. Management. 169: 116–125.

Kermani, M., Farshad B.A., Mahdi F., Ali E., Soheila S.A., Mohammad K., Yousef D.S., Dariush Z., 2015. Heterogeneous catalytic ozonation by Nano-MgO is better than sole ozonation for metronidazole degradation, toxicity reduction, and biodegradability improvement. Desalination and Water Treatment. Taylor & Francis. London, UK, pp. 1–10.

Khataee, A., Kiransan, M., Karaca, S., Sheydaei, M. 2017. Photocatalytic ozonation of metronidazole by synthesized zinc oxide nanoparticles immobilized on montmorillonite. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 74: 196–204.

Kummerer, K., Al-Ahmad, A., Mersch-Sundemann, V. 2000. Biodegradability of some antibiotics, elimination of the genotoxicity and affection of wastewater bacteria in a simple test. Chemosphere 40: 701–710.

Li, M.M., Guan, E.Q., Bian, K. 2014. Effect of ozone treatment on deoxynivalenol and quality evaluation of ozonised wheat. Food Additives & Contaminants: Part A. 32: 544–553.

Liao, H., Fang, J.Y., Zeng, M.Z., Chen, Z., Ni, M.L., Liu, W. 2011. An integrated UV/ozone reactor with ozone generated from the same UV lamp. IUVA NEWS. 13: 22–26.

Malakootian, M., Mahdizadeh, H., Dehdarirad, A., Gharghani, M.A. 2019. Photocatalytic ozonation degradation of ciprofloxacin using ZnO nanoparticles immobilized on the surface of stones. Journal of Dispersion Science and Technology 40: 846–854.

Nasseh, N., Arghavan, F.S., Rodriguez-Couto, S., Panahi, A.H., Esmati, M., A-Musawi, T.J. 2019. Preparation of activated carbon@ZnO composite and its application as a novel catalyst in catalytic ozonation process for metronidazole degradation. Adv. Powder Technol. 31: 875–885.

Naveed, S., Qamar, F. 2014. Simple UV spectrophotometric assay of metronidazole. Open Access Library Journal. 1: 1–4.

Qi, L., Wang, X., Xu, Q. 2011. Coupling of biological methods with membrane filtration using ozone as pre-treatment for water reuse. Desalination 270: 264–268.

Ramavandi, B., Akbarzadeh, S. 2014. Removal of metronidazole antibiotic from contaminated water using a coagulant extracted from *Plantago ovata.* Desalin. Water Treat. 55: 2221–2228.

Santana, D.R., Espino-Estevez, M.R., Santiago, D.E., Mendez, J.A.O., Gonzalez-Diaz, O., Dona-Rodriguez, J.M. 2017. Treatment of aquaculture wastewater contaminated with metronidazole by advanced oxidation techniques. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management 8: 11–24.

การบำบัดออกซีเตตราซัยคลินในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน

Treatment of oxytetracycline in wastewater by photocatalytic ozonation

ณิชกุล ชาติทรัพยสิทธิ, ชลอ จารุสุทธิรักษ์*

Nichakun Chatsapphayasitti, 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

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออกซีเตตราซัยคลิน (OTC) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันโดยใช้เครื่องผลิตก๊าซโอโซน 1.23 มก./นาทีร่วมกับหลอดยูวีขนาด 9 วัตต์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดได้แก่ ระยะเวลา ความเข้มข้นของ OTC และค่าพีเอช ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด OTC เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบำบัด การเพิ่มความเข้มข้น OTC ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง โดยที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มก./ล. (เวลา 60 นาที และพีเอช 9) มีประสิทธิภาพ 88.39%, 86.65% และ 78.77% ตามลำดับ การเพิ่มพีเอชส่งผลเพิ่มประสิทธิภาพโดยพีเอช 4, 7 และ 9 ให้ประสิทธิภาพ 59.08%, 66.19% และ 78.77% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนอย่างเดียวพบว่ากระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าการบำบัด OTC ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันและโอโซเนชันเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยที่พีเอช 9 ให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 0.037 และ 0.019 ต่อนาที ตามลำดับ

คำสำคัญ: โฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน, ยาปฏิชีวนะ, ออกซีเตตราซัยคลิน, โอโซเนชัน

Abstract

This research studied factors affecting the performance of photocatalytic ozonation on removal of OTC containing in synthetic wastewater. The system consisted of an ozone generator with a generation rate of 1.23 mg/min, equipped with 9-watt UV-light. Factors affecting OTC removal efficiency including reaction time, initial concentration and pH, were investigated. The result showed that OTC removal efficiency became higher as the reaction time increased. The increase of OTC initial concentration reduced the removal efficiency. At initial concentrations of 10, 20 and 30 mg/l (reaction time of 60 min. and pH of 9), OTC removal efficiencies by photocatalytic ozonation were 88.39%, 86.65%, and 78.77%, respectively. An increase of solution pH enhanced the removal efficiency. At pH of 4, 7 and 9, OTC removal efficiencies were 59.08%, 66.19%, and 78.77%, respectively. Photocatalytic ozonation exhibited better performance on OTC removal than ozonation alone. The study of reaction kinetic exhibited that degradation of OTC by photocatalytic ozonation and ozonation alone followed the pseudo-first order reaction with the highest reaction rate constants (k) of 0.037 and 0.019 min^{-1}, at pH of 9.

Keywords: antibiotic, oxytetracycline, ozonation, photocatalytic ozonation

คำนำ

ปัจจุบันการใช้ยาปฏิชีวนะในการรักษาคนและสัตว์มีการใช้อย่างแพร่หลาย จึงทำให้เกิดปัญหาของการตกค้างและปนเปื้อนของยาในสิ่งแวดล้อม โดยพบยาตกค้างทั้งในน้ำผิวดิน น้ำทิ้ง น้ำใต้ดิน ปุ๋ย ดิน ฯลฯ ยาที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมมีทั้งยาปฏิชีวนะ ยาต้านการอักเสบ ยาแก้ปวด ยาลดไขมัน ฮอร์โมนเพศ และ ยาอื่นๆ กลุ่มยาปฏิชีวนะชนิดเตตราซัยคลิน ได้แก่ เตตราซัยคลิน (Tetracycline: TC), ออกซีเตตราซัยคลิน (Oxytetracycline: OTC) และ คลอเตตราซัยคลิน (Chlortetracycline: CTC) เป็นกลุ่มยาที่มีการใช้มากที่สุดในการรักษาสัตว์ 90% ของปริมาณยาที่ให้กับสัตว์จะถูกขับออกมาเป็นสารประกอบเดิมเนื่องจากการดูดซึมได้ไม่ดี (Conde-Cid et al., 2019) ยา OTC เป็นยาปฏิชีวนะที่ออกฤทธิ์ครอบคลุมแบคทีเรียในวงกว้างทั้งในแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ เมื่อ OTC ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่มีประโยชน์ต่อระบบนิเวศ หรือส่งผลให้จุลินทรีย์บางชนิดเกิดการพัฒนาจนเป็นเชื้อดื้อยา (Thiele-Bruhn and Beck, 2005) งานวิจัยที่ผ่านมาพบความเข้มข้นของ OTC ในแหล่งน้ำธรรมชาติของประเทศกานา ทวีปแอฟริกา 0.026 ไมโครกรัม/ลิตร สหรัฐอเมริกา 0.34–1.34 ไมโครกรัม/ลิตร ประเทศจีน 0.084–484 ไมโครกรัม/ลิตร และ ฝรั่งเศส 0.68 ไมโครกรัม/ลิตร (Danner et al., 2019) นอกจากนี้ในระบบบำบัดน้ำเสีย (WWTP) ของโรงงานผลิตยา OTC พบความเข้มข้นของ OTC หลังการบำบัดมีค่าเท่ากับ 19.5 ± 2.9 มิลลิกรัม/ลิตร (Li et al., 2008) ดังนั้นน้ำเสียที่ปนเปื้อน OTC จึงควรได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน OTC สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการทางชีวภาพ เช่น การใช้ *Pseudomonas* sp. อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดคือประสิทธิภาพการย่อยสลายต่ำจำเป็นต้องมีการใช้ร่วมกับ Cu^{2+} และ Fe^{3+} เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ (Qi et al., 2019) วิธีการทางเคมี เช่น การออกซิเดชันโดยใช้สารออกซิไดซ์ ได้แก่ คลอรีน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโอโซน โดยโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์สารที่มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สารค่อนข้างสูง แต่ข้อจำกัดของโอโซน คือ เป็นสารที่ไม่เสถียร (Hsu et al., 2001) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) เป็นการใช้อนุมูลอิสระในการออกซิไดซ์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันสูงกว่าการใช้สารออกซิแดนท์เพียงอย่างเดียว อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($OH^{\bullet}$) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วและออกซิไดซ์สารประกอบอันตรายได้หลายประเภท (García et al., 2018) กระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน (Photocatalytic ozonation: PCO) เป็นกระบวนการที่ใช้โอโซนร่วมกับแสงยูวีในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่รวดเร็ว โดยแสงยูวีช่วยเร่งให้เกิดอนุมูล $OH^{\bullet}$ ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงและมีประสิทธิภาพในการบำบัดยาปฏิชีวนะได้ดี (Beltrán et al., 2008) การศึกษาที่ผ่านมามีการใช้ PCO ในการบำบัดสาร เช่น Clofibric acid (Wang et al., 2019) และ Metronidazole (Khatraee et al., 2017) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาความเป็นไปได้รวมทั้งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด OTC

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด OTC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ PCO โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นของ OTC ค่าพีเอช และระยะเวลาการบำบัดรวมทั้งจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา โดยผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดยาปฏิชีวนะ หรือสารอินทรีย์อื่นๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การติดตั้งและเดินระบบโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน

ระบบ PCO (Fig. 1) ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนกำลังผลิต 1.23 มิลลิกรัมต่อนาที ถังปฏิกิริยาขนาด 1 ลิตร หลอดกำเนิดแสงยูวีขนาด 9 วัตต์ ปั๊มหมุนเวียนน้ำและระบบท่อที่มีอุปกรณ์เวนทูรี ในการเดินระบบเมื่อน้ำตัวอย่างจากถังปฏิกิริยาถูกสูบผ่านอุปกรณ์เวนทูรีจะเกิดสุญญากาศ ทำให้เกิดแรงดูดก๊าซโอโซนจากเครื่องกำเนิดโอโซนเข้าสู่ระบบท่อและเกิดการละลายผสมกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นน้ำตัวอย่างไหลผ่านหลอดยูวี ทำให้น้ำตัวอย่างที่มีโอโซนละลายเกิดปฏิกิริยากับแสงยูวีได้อย่างทั่วถึงก่อนปล่อยกลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยา ในการทดลองชุดควบคุมทำโดยการบำบัดด้วยระบบโอโซเนชันเพียงอย่างเดียวโดยไม่เปิดแสงยูวี และการบำบัดด้วยแสงยูวีเพียงอย่างเดียวโดยไม่เปิดเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

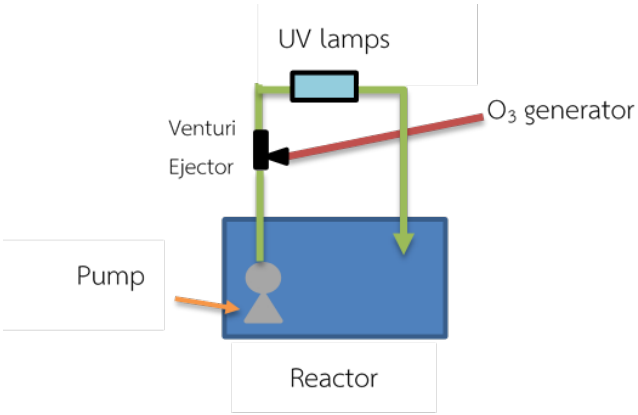


Fig.1 Schematic diagram of photocatalytic ozonation

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำสังเคราะห์โดยละลายสาร OTC ในน้ำ DI ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการศึกษา จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด OTC

1) ผลของระยะเวลาบำบัดและความเข้มข้นเริ่มต้นของ OTC

เตรียมน้ำสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใส่น้ำตัวอย่างลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 1 ลิตร เดินระบบและทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ที่เวลา 0, 15, 30, 45 และ 60 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

2) ผลของพีเอช

เตรียมน้ำสังเคราะห์ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชให้เท่ากับ 4, 7 และ 9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใส่น้ำตัวอย่างลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 1 ลิตร เดินระบบและทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ที่เวลา 0, 15, 30, 45 และ 60 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัด OTC

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาใช้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการทดลองขั้นต้นเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ PCO กับโอโซเนชันและแสงยูวีเพียงอย่างเดียว โดยนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาเป็นสมการเชิงเส้นตามแบบจำลองการเกิดอันดับปฏิกิริยาและหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ดัง Equation 1, 2 และ 3

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ $[OTC]_t = [OTC]_0 - kt$ (1)

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง $[OTC]_t = [OTC]_0 e^{(-kt)}$ หรือ $\ln[OTC]_t = \mathrm{In}[OTC]_0 - kt$ (2)

ปฏิกิริยาอันดับสอง $1/[OTC]_t = kt + 1/[OTC]_0$ (3)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด OTC ด้วยกระบวนการ PCO

1) ผลของระยะเวลาและความเข้มข้น

การศึกษาผลของระยะเวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด OTC ด้วยกระบวนการ PCO แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 9 ได้ผลดัง Fig.2 พบว่าการเพิ่มระยะเวลาการบำบัดส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นเนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณโอโซนให้แก่ระบบอย่างต่อเนื่องและเมื่อโอโซนละลายถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวีจะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจน (O_2) เป็นผลิตภัณฑ์การเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของ H_2O_2 ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^{\cdot}$) ที่มีศักยภาพในการรับอิเล็คตรอนได้ดี (Deng and Zhao, 2015) จึงส่งผลให้การบำบัด OTC ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ OTC พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง โดยที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 88.39%, 86.65% และ 78.77% ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซโอโซนมีค่าคงที่ทำให้สามารถผลิต $OH^{\cdot}$ ได้จำกัด จึงออกซิไดซ์สารได้อย่างจำกัดในขณะที่ปริมาณสาร OTC เพิ่มขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับ Beltrán et al. (2008)

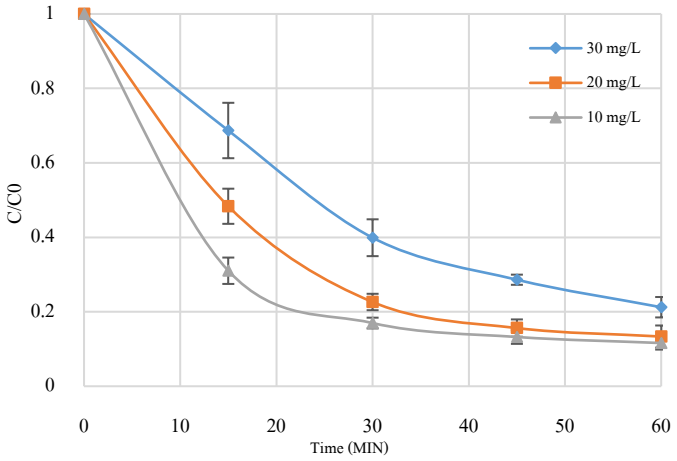


Fig.2 Effect of reaction time and initial concentration on OTC removal by photocatalytic ozonation

Note: O_3 generation = 1.23 mg/min, UV 9 watts, pH = 9

2) ผลของพีเอช

การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัด OTC ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น มิลลิกรัมต่อลิตร 30แปรค่าพีเอชที่ 4, 7 และ 9ได้ผลดังแสดงใน Fig. 3 พบว่าสภาวะที่พีเอชเป็นเบสมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าสภาวะกรด โดยที่พีเอช 4, 7 และ มีประสิทธิภาพการบำบัด 59 9.08%, 66.19% และ 78.77% ตามลำดับ ทั้งนี้แสงยูวีมีส่วนช่วยทำให้เกิดอนุมูล $OH^{\cdot}$ ดังได้กล่าวมาแล้ว ประกอบกับการเพิ่มพีเอชยังส่งผลให้โอโซนเกิดการสลายตัวและเกิดเป็น $OH^{\cdot}$ ที่มีศักยภาพในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์สูง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชทำให้ OTC มีรูปแบบโครงสร้างโมเลกุลที่มีประจุแตกต่างกัน เนื่องจากโมเลกุลของ OTC ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ฟีนอลิกและเอมีน ทำให้ OTC เป็นสารที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบในโมเลกุล (Amphoteric antibiotic) โดยค่า pKa ของ OTC มีค่าเท่ากับ 3.57, 7.5 และ 9.44 (Mohsin & Mohammed, 2021) ในสภาวะกรดที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3.57 OTC อยู่ในรูปประจุบวก (Cation) ที่พีเอชระหว่าง 3.57-7.5 OTC มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Zwitterion) และที่พีเอชมากกว่า 7.5 OTC อยู่ในรูปประจุลบ (Anion) รูปแบบของโครงสร้างโมเลกุลนี้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนและอนุมูล $OH^{\cdot}$ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Khataee et al. (2017)

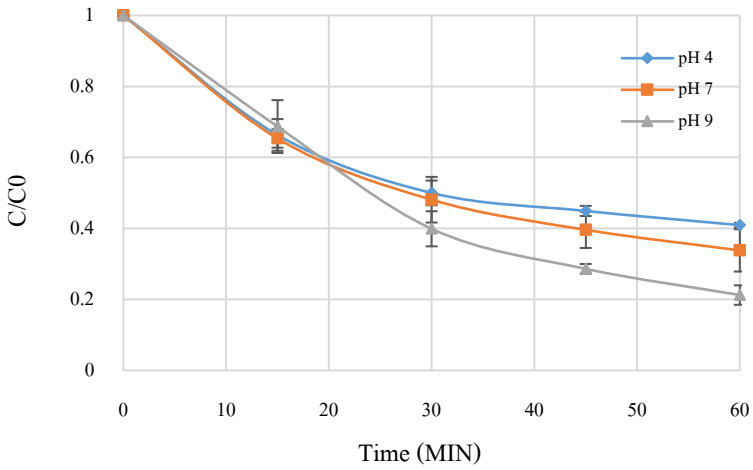


Fig. 3 Effect of pH on OTC removal by photocatalytic ozonation

Note: O_3 generation = 1.23 mg/min, UV 9 watts, [OTC] = 30 mg/L

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการบำบัด OTC

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด OTC ด้วยกระบวนการ PCO กระบวนการโอโซเนชัน และแสงยูวี ทำการทดสอบโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มี OTC เข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 ได้ผลการทดลองดังแสดงใน Fig. 4 จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าวิธีการบำบัดทั้งสามวิธีให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยกระบวนการ PCO ให้ประสิทธิภาพการบำบัด OTC สูงกว่ากระบวนการโอโซเนชันและการใช้แสงยูวีเพียงอย่างเดียว โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด OTC เท่ากับ78 .77%, 65.96% และ 11.17% ตามลำดับ เนื่องจากแสงยูวีช่วยส่งเสริมการแตกตัวของ O_3 ให้ $OH^{\cdot}$ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Wang et al. 2)019)

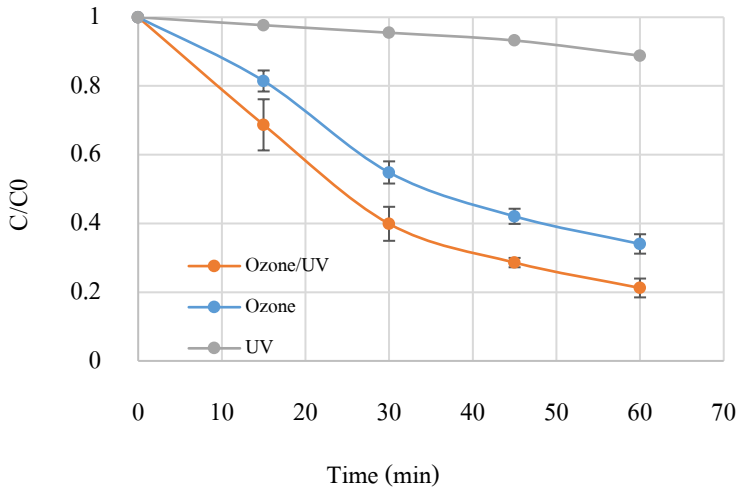


Fig. 4 OTC removal efficiencies by photocatalytic ozonation compared with ozonation and UV alone

Note: O_3 generation = 1.23 mg/min, [OTC]=30 mg/L, pH = 9

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาการบำบัด OTC เข้มข้น มิลลิกรัมต่อลิตร และ พีเอช 9 30 ด้วยกระบวนการ PCO เปรียบเทียบกับโอโซเนชันและแสงยูวีเพียงอย่างเดียว พบว่าการเกิดปฏิกิริยาการสลาย OTC สอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order kinetic) โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) แสดงใน Table 1 พบว่าปฏิกิริยา PCO มีค่า k สูงกว่าโอโซเนชันและแสงยูวีเพียงอย่างเดียวในทุกพีเอช ดังได้กล่าวมาแล้วแสงยูวีในกระบวนการ PCO มีส่วนเสริมการแตกตัวของโอโซนทำให้เกิดอนุมูล $OH^{\cdot}$ ที่ทำปฏิกิริยากับ OTC ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อพีเอชสูงขึ้น ค่า k มีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยค่า k ของปฏิกิริยา PCO ที่พีเอช 4, 9 และ 7 มีค่า 0.015, 0.018 และ 0.037 นาที$^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนค่า k สำหรับปฏิกิริยาโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว มีค่าเท่ากับ 0.002, 0.012 และ 0.019 นาที$^{-1}$ ตามลำดับ เนื่องจากการสลายตัวของโอโซนในสภาวะด่างทำให้เกิดอนุมูล $OH^{\cdot}$ ช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการสลาย OTC ส่วนในสภาวะเป็นกรดโอโซนเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาผ่าน $OH^{\cdot}$ (Gottschalk et al., 2000)

Table 1 Kinetic study of OTC degradation by photocatalytic ozonation, ozonation alone and UV alone

pH	Photocatalytic ozonation		Ozonation alone		UV alone	
	k (min^{-1})	R^2	k (min^{-1})	R^2	k (min^{-1})	R^2
4	0.015	0.9075	0.002	0.9955	0.001	0.9463
7	0.018	0.9576	0.012	0.9521	0.002	0.9962
9	0.037	0. 8408	0.019	0. 9884	0.003	0.9766

ในการบำบัด OTC ด้วยกระบวนการ PCO อาจก่อให้เกิดสารผลพลอยได้ (By products) ชนิดต่างๆ การศึกษาของ Yuan et al. (2017) และ Giler-Molina et al. (2020) พบว่า สารผลพลอยได้ที่เกิดจากการบำบัด OTC

ด้วยกระบวนการ Photodegradation ได้แก่ 1,4–benzenedicarboxylic acid, 4–oxopentanoic acid, propanedioic acid, hydroximalonic acid, glycerin และ butanedioic acid อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาสารผลพลอยได้ดังกล่าว ในการศึกษาขั้นต่อไปจึงควรศึกษาชนิดของสารผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ PCO รวมทั้งการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการ PCO เพื่อให้ OTC สามารถเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ (Complete mineralization) และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซ CO_2 และ H_2O

สรุป

การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด OTC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยา PCO ได้แก่ ระยะเวลาบำบัด ค่าความเข้มข้นของ OTC และค่าพีเอช พบว่า การเพิ่มระยะเวลาการบำบัดส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด OTC เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มความเข้มข้น OTC ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง โดยที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มก./ล. ที่ระยะเวลาบำบัด 60 นาที และพีเอช 9 มีประสิทธิภาพ 88.39%, 86.65% และ 78.77% ตามลำดับ การเพิ่มพีเอชส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยพีเอช 4, 7 และ 9 ให้ประสิทธิภาพ 59.08%, 66.19% และ 78.77% ตามลำดับ เนื่องจากการสลายตัวของโอโซนที่สภาวะด่างทำให้เกิดอนุมูล $OH^{\cdot}$ ที่มีศักยภาพในการออกซิไดซ์ OTC สูง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนอย่างเดียวพบว่ากระบวนการ PCO ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า เนื่องจากแสงยูวีในกระบวนการ PCO มีส่วนเสริมการแตกตัวของโอโซนทำให้เกิดอนุมูล OH• ที่ทำปฏิกิริยากับ OTC ได้อย่างรวดเร็ว การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าการบำบัด OTC ด้วยกระบวนการ PCO และโอโซเนชันเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยที่พีเอช 9 ให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 0.037 และ 0.019 ต่อนาที ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม และกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำโครงงานวิทยาศาสตร์ในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Alarcón, J.J. 2018 .Absorption of carbamazepine and diclofenac in hydroponically cultivated lettuces and human health risk assessment. Agri. Wat. Mgt. 206: 42–47. doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.018.

Beltrán, F.J., Aguinaco, A., García-Araya, J. F., Oropesa, A. 2008. Ozone and photocatalytic processes to remove the antibiotic sulfamethoxazole from water. Wat. Res. 14: 3799–3808. doi.org/10.1016/ j.watres.2008.07.019.

Conde-Cid, M., Ferreira-Coelho, G., Núñez-Delgado, A., Fernández-Calviño, D., Arias-Estévez, M., Álvarez-Rodríguez, E., Fernández-Sanjurjo, M. J. 2019. Competitive adsorption of tetracycline, oxytetracycline and chlortetracycline on soils with different pH value and organic matter content. Environ. Res. 178: 1–12. doi.org/10.1016/j.envres.2019.108669.

Danner, M-C., Robertson, A., Behrends, V., Reiss, J. 2019. Antibiotic pollution in surface fresh waters: Occurrence and effects. Sci. Total. Environ. 664: 793–804. doi.org/ 10.1016/j.scitotenv.2019.01.406.

Deng, Y., Zhao, R. 2015. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. Curr. Pollution Rep. 1: 167–176. doi.org/10.1007/s40726-015-0015

Giler-Molina, J.M., Zambrano-Intriago, L.A., Quiroz-Fernández, L.S., Napoleão, D.C., Vieira, J.D.S, Oliveira, N.S., Rodríguez-Díaz, J.M. 2020. Degradation of oxytetracycline in aqueous solutions: application of homogeneous and heterogeneous advanced oxidative processes. Sustainability 12: 8807. doi.org/10.3390/su12218807.

Gottschalk, C, Libra, J. A., Saupe, A. 2000. Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications, 2nd ed. Wiley-VCH. NY, USA.

Hsu, Y.C., Chen, J.T., Yang, H.C., Chen, J.H. 2001 .Decolorization of dyes using ozone in a gas-induced reactor. AIChE J. 47: 169–176. doi.org/10.1002/aic.690470116.

Khataee, A., Kiransan, M., Karaca, S., Sheydaei, M. 2017. Photocatalytic ozonation of metronidazole by synthesized zinc oxide nanoparticles immobilized on montmorillonite. J. Taiwan Ins. Chem. Eng. 74: 196–204. doi.org/10.1016/j.jtice.2017.02.014.

Li, D., Yang, M., Hu, J., Ren, L., Zhang, Y., Li, K. 2008. Determination and fate of oxytetracycline and related compounds in oxytetracycline production wastewater and the receiving river. Environ. Toxic Chem. 27: 80–86. doi.org/ 10.1897/07-080.1.

Mohsin, M.K., Mohammed, A.A. 2021. Catalytic ozonation for removal of antibiotic oxy-tetracycline using zinc oxide nanoparticles. Appl. Wat. Sci. 11: 9. doi.org/10.1007/s13201-020-01333-w.

Moreira, N.F.F., Sousa, J.M., Macedo, G., Ribeiro, A.R., Barreiros, L., Pedrosa, M., Faria, J.L., Fernando, M., Pereira, R., Castro-Silva, S., Segundo, M.A., Manaia, C.M., Nunes, O.C., Silva A.M.T. 2016. Photocatalytic ozonation of urban wastewater and surface water using immobilized TiO_2 with LEDs: micropollutants, antibiotic resistance genes and estrogenic activity. Wat. Res. 94: 10–22. doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.003.

Qi, W., Long, J., Feng, C., Feng, Y., Cheng, D., Liu, Y., Xue, J., Li, Z. 2019. Fe^{3+} enhanced degradation of oxytetracycline in water by *pseudomonas*. Wat. Res. 160: 361–370. doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.058.

Thiele-Bruhn, S., Beck, I.C. 2005. Effects of sulfonamide and tetracycline antibiotics on soil microbial activity and microbial biomass. Chemosphere 59: 457–465. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.023.

Wang, Y., Li, H., Yi, P., Zhang H. 2019. Degradation of clofibric acid by UV, O_3 and UV/O_3 processes: performance comparison and degradation pathways. J. Haz. Mat. 379: 1–11. doi.org/10.1016/j.jhazmat. 2019.120771.

Yuan, F., Hu, C., Hu, X., Wei, D., Chen, Y., Qu, J. 2011. Photodegradation and toxicity changes of antibiotics in UV and UV/H_2O_2 process. J. Haz. Mat. 185: 1256–1263. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.040.

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ด

Assessment of Greenhouse Gas Emission from Pakkret City Municipality's Waste Management

ธนพร กองสัมฤทธิ์*, จีมา ศรลัมพ์

Thanaphorn Kongsumrit*, Cheema Soralump

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

* Corresponding author. E-mail address: thanaphorn.ko@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ด ได้แก่ การจัดการขยะ และการจัดการน้ำเสีย โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลังแล้วนำมาคำนวณตามแนวทางคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร และแสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ผลการศึกษา พบว่า ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการน้ำเสีย ตั้งแต่เริ่มเดินระบบในเดือนพฤษภาคม–เดือนตุลาคม 2563 อยู่ในช่วง 21,826.46–25,188.51 $kgCO_2eq$ หรือเท่ากับ 0.1200–0.1833 $kgCO_2eq/m^3$ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการขยะทั่วไป ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2557–2563 มีค่าเท่ากับ 22,571.00, 23,565.17, 25,478.11, 26,120.02, 29,857.81, 29,705.46 และ 29,062.35 tCO_2eq ตามลำดับ และก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการขยะติดเชื้อ ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2557– 2563 มีค่าเท่ากับ 113.97, 122.70, 133.69, 132.13, 168.24, 198.67 และ 202.11 tCO_2eq ตามลำดับ

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก, การจัดการของเสีย, ระบบบำบัดน้ำเสีย

Abstract

The study aimed to assess the amount of greenhouse gas emission from Pakkret City Municipality's waste management such as the domestic wastewater management and municipal waste management. The data was collected and then calculated the amount of greenhouse gas emissions based on the organization's carbon footprint guidelines, which is indicating the amount of its emission shown in Carbon Dioxide equivalent unit. The result has been found that the greenhouse gas (GHG) emission from the wastewater management during May–October 2020 is in the range of 21,826.46–25,188.51 $kgCO_2eq$ or 0.1200–0.1833 $kgCO_2eq/m^3$. The emission is mainly arising from electricity consumption. While the GHG emission from the waste management from the fiscal years 2014 to 2020 is equal to 22,571.00, 23,565.17, 25,478.11, 26,120.02, 29,857.81, 29,705.46 and 29,062.35 tCO_2eq, respectively. And the GHG emission from the clinical waste management from the fiscal years 2014 to 2020 is equal to 113.97, 122.70, 133.69, 132.13, 168.24, 198.67 and 202.11 tCO_2eq, respectively.

Keywords: greenhouse gas, waste management, wastewater treatment

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมดุลทางพลังงานและสภาพภูมิอากาศระดับโลกอย่างรุนแรงและกว้างขวาง อันมีสาเหตุมาจากการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ การขยายตัวของชุมชน การใช้พลังงาน การลดลงของพื้นที่สีเขียว ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีมากมาย เช่น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบรรยากาศของโลก ปัญหาความแห้งแล้ง ปัญหาอุทกภัย เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2562)

ภาคการจัดการของเสีย ถูกกำหนดว่าเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก (IPCC, 2016) มีรายงานว่าในปี พ.ศ. 2556 (ค.ศ. 2013) ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเท่ากับ 232.56 $MtCO_2e$ โดยพิจารณาจากปริมาณรวมของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 318.66 $MtCO_2e$ หักลบกับปริมาณที่ดูดกลับ 86.10 $MtCO_2e$ หากพิจารณาข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรายสาขา พบว่า ภาคการจัดการของเสีย เป็นภาคที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 11.83 $MtCO_2e$ หรือคิดเป็นร้อยละ 3.71 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของประเทศ (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2017)

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization) หรือรายงานข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร เป็นการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กร ซึ่งจะช่วยให้องค์กรสามารถจำแนกสาเหตุและแหล่งของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญ อันนำไปสู่การกำหนดนโยบายหรือมาตรการบริหารจัดการ เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมุ่งสู่การเป็นเมืองคาร์บอนต่ำ (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน, 2561)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคการจัดการของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ดตามแนวทางคาร์บอนฟุตพริ้นขององค์กร รวมทั้งศึกษาหาแนวทางที่เหมาะสมตามหลักการพัฒนาที่ยั่งยืนในการลดก๊าซเรือนกระจกในภาคการจัดการของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ด ซึ่งคาดว่าผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ดครั้งนี้ จะเป็นการนำร่องให้เกิดโอกาสและแนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกไปสู่การปฏิบัติ โดยเชื่อมโยงกับแผนงานต่าง ๆ ของเทศบาลนครปากเกร็ด และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับภารกิจหลักของเทศบาลในการจัดการของเสีย ลดค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการของเสียชุมชน และสามารถลดก๊าซเรือนกระจกให้สอดคล้องกับนโยบายเทศบาลนครปากเกร็ดในการมุ่งสู่เมืองคาร์บอนต่ำ และเป็นมิตรสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาและการรวบรวมข้อมูลกิจกรรม

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ด ได้แก่ การจัดการขยะ และการจัดการน้ำเสียชุมชน โดยทำการรวบรวมข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกองสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม และสำนักการช่าง เทศบาลนครปากเกร็ด ซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามขอบเขตการประเมินที่กำหนดไว้ คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากการจัดการ

ขยะ ได้แก่ ปริมาณขยะมูลฝอยทั่วไป (ปีงบประมาณ 2556–2562) และปริมาณขยะติดเชื้อ (ปีงบประมาณ 2557 - 2563) ส่วนข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการจัดการขยะ ได้แก่ ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุกขยะ (ปีงบประมาณ 2561–2563) สำหรับข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากการจัดการน้ำเสียชุมชน ได้แก่ ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสีย และข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการจัดการน้ำเสียชุมชน ได้แก่ ปริมาณการใช้ไฟฟ้า สารเคมี น้ำประปา และการขนส่งกากตะกอนไปกำจัด (เดือนพฤษภาคม–เดือนตุลาคม 2563)

การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากการฝังกลบขยะมูลฝอย

สมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน ตามหลักการของ First order decay ตามคู่มือ 2006 IPCC Guidelines แสดงใน Equations 1–5

ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ในขยะมูลฝอยที่เข้าพื้นที่กำจัด ในปีที่ T ($DDOC_{mdT}$)

$$DDOC_{mdT} = W_T \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (1)$$

ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (แต่ยังไม่ถูกย่อยสลาย) ที่สะสมอยู่ในพื้นที่กำจัด ณ สิ้นปีที่ T

$$DDOC_{maT} = DDOC_{mdT} + (DDOC_{maT-1} \times e^{-k}) \quad (2)$$

ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้และถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทน ในปีที่ T

$$DDOC_{decomp\,T} = DDOC_{maT-1} \times (1 - e^{-k}) \quad (3)$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายสารคาร์บอนอินทรีย์

$$CH_{4\ generated\ T} = DDOC_{m\ decomp\ T} \times F \times {}^{44}/_{12} \quad (4)$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่ปล่อยจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอย

$$CH_{4\ Emission\ T} = [CH_{4\ generated\ ,T} - R_T] \times (1 - OX_T) \quad (5)$$

โดยที่ $DDOC_{mdT}$= ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ที่เข้าพื้นที่กำจัดในปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), $W_{,T}$ = ปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกนำไปพื้นที่กำจัดในปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), T = ปีที่จัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก, DOC = สัดส่วนของสารคาร์บอนอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ในของเสีย (fraction), DOC_f = สัดส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่สามารถย่อยสลายไปเป็นก๊าซชีวภาพ (fraction), MCF = ค่าปรับแก้สัดส่วนของขยะที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methane Correction Factor), $DDOC_{maT}$ = ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (แต่ยังไม่ถูกย่อยสลาย) ที่สะสมอยู่ในพื้นที่กำจัด ณ สิ้นปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), $DDOC_{maT-1}$ = ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายและสะสมอยู่ในพื้นที่กำจัด ณสิ้นปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), k = ค่าคงที่อัตราการผลิตก๊าซมีเทน ($ปี^{-1}$), $k = \frac{ln2}{t_{1/2}}$, $t_{1/2}$ = ค่าครึ่งชีวิต (ปี), $DDOC_{decompT}$ = ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทนได้ ในปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), $CH_{4\ generated\ T}$ = ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายสารคาร์บอนอินทรีย์ในปีที่ T (กิกะกรัม, Gg),

F = สัดส่วนของก๊าซมีเทนต่อปริมาตรของก๊าซทั้งหมด (fraction), 16/12 = ค่าการแปลงจาก C เป็น CO_2, $CH_{4\ Emission\ T}$ = ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนจากพื้นที่กำจัดมูลฝอยในปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), $CH_{4\ generated\ T}$ = ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายสารคาร์บอนอินทรีย์ในปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), R_T = ปริมาณก๊าซมีเทนที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ ในปีที่ T (กิกะกรัม, Gg), OX_T = สัดส่วนก๊าซมีเทนที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (fraction)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากการเผาขยะติดเชื้อ

$$CO_{2\ Emission}\ (Gg/yr) = (SW \times dm \times CF \times FCF \times OF) \times {}^{44}/_{12}$$
$$CH_{4\ Emission}\ (Gg/yr) = (SW \times EF) \times 10^{-6}$$
$$N_2O_{Emission}\ (Gg/yr) = (SW \times EF) \times 10^{-6}$$

โดยที่ CO_2 Emission = ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Gg/yr), CH_4 Emission = ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (Gg/yr), N_2O Emission = ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Gg/yr), SW = ปริมาณขยะติดเชื้อที่นำเข้าเตาเผา (Gg), dm = dry matter content (fraction), CF = fraction of carbon in the dry matter (total carbon content) (fraction), FCF = fraction of fossil carbon in the dry matter (fraction), OF = oxidation factor (fraction), 44/12 = conversion factor from C to CO_2, EF = CH_4 Emission factor (kg CH_4/Gg of waste) / N_2O Emission factor (kg N_2O/Gg of waste), 10^{-6}= conversion from kilogram to gigagram

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการขนส่งขยะไปกำจัด

$$GHG\ Emission = Activity\ Data \times Emission\ Factor$$

โดยที่ GHG Emission = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($kgCO_2eq/yr$), Activity Data = ปริมาณการใช้น้ำมันของรถบรรทุกขยะ (L), Emission factor = Emission factor ของการใช้น้ำมันดีเซลของรถบรรทุกขยะ แสดงดัง Table 1

การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการน้ำเสีย

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากการรวบรวมน้ำเสีย

$$GHG\ Emission = Activity\ Data \times Emission\ Factor$$

โดยที่ GHG Emission = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($kg\ CO_2eq/yr$), Activity Data = ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบ (m^3), Emission factor = Emission factor ของการรวบรวมน้ำเสีย แสดงดัง Table 1

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการบำบัดน้ำเสีย

$$GHG\ Emission = Activity\ Data \times Emission\ Factor$$

โดยที่ GHG Emission = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($kg\ CO_2eq/yr$), Activity Data = ปริมาณการใช้ไฟฟ้า / ปริมาณการใช้สารเคมี / ปริมาณการใช้น้ำประปา / ปริมาณตะกอนที่ขนส่งไปกำจัด, Emission factor = Emission factor ของการใช้ไฟฟ้า / การใช้สารเคมี / การใช้น้ำประปา / การใช้น้ำมันดีเซลของรถบรรทุกที่ขนส่งตะกอนไปกำจัด แสดงดัง Table 1

Table 1 Greenhouse Gas Emission Coefficients

Activity	Unit	Emission Factor ($kgCO_2eq./unit$)
Gravity Wastewater Collection (medium city; 10,000–50,000 capita)	m^3	0.0373 [a]
Electricity, grid mix	kWh	0.4999 [b]
Water Supply - Metropolitan Waterworks Authority	m^3	0.7948 [a]
Cation polymer	kg	1.4300 [a]

Table 1 (continued).

Activity	Unit	Emission Factor ($kgCO_2eq./unit$)
Chlorine	kg	1.0548 [a]
6 Wheel Truck, small Size 8.5 tons (Full Load)	ton-km	0.0677 [a]
6 Wheel Truck, Small Size 8.5 tons (No Load)	km	0.4273 [a]
Mobile Combustion (On road) - Gas/Diesel Oil	liter	2.7403 [b]

Note: [a] = Emission Factor CFP (TGO, 2020a), [b] = Emission Factor CFO (TGO, 2020b)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ต้องการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคการจัดการของเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ด ได้แก่ การจัดการขยะ และการจัดการน้ำเสียชุมชน ผลการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แสดงดัง Table 2, Table 3, Table 4, Fig.1, Fig. 2 และ Fig.3

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะทั่วไป

Table 2 Greenhouse Gas Emissions of Municipal Solid Waste Management during the Fiscal Years 2014–2020

Year of Landfill	Amount of MSW (ton)	Year of GHG Emission	Direct GHG Emissions		Indirect GHG Emissions from Transport ($ton\ CO_2\ eq$)	Total GHG ($ton\ CO_2\ eq$)	GHG per MSW Weight ($ton\ CO_2\ eq$/ ton MSW)
			$CH_{4\ Emission}$ ($ton\ CH_4$)	$GHG_{Emission}$ ($ton\ CO_2\ eq$)			
2013	78,363.87	2014	902.84	22,571.00	-	22,571.00	0.2880
2014	81,815.52	2015	942.61	23,565.17	-	23,565.17	0.2880
2015	88,457.01	2016	1,019.12	25,478.11	-	25,478.11	0.2880
2016	90,685.65	2017	1,044.80	26,120.02	-	26,120.02	0.2880
2017	98,069.92	2018	1,129.88	28,246.90	1,610.91	29,857.81	0.3045
2018	97,891.03	2019	1,127.81	28,195.37	1,510.08	29,705.46	0.3035
2019	96,283.72	2020	1,109.30	27,732.43	1,329.93	29,062.35	0.3018

Note: The fuel consumption data of the garbage truck is not collected during the fiscal years 2014–2017.

จากการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการขยะทั่วไป พบว่า ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2557–2563 มีค่าเท่ากับ 22,571.00, 23,565.17, 25,478.11, 26,120.02, 29,857.81, 29,705.46 และ 29,062.35 tCO_2eq ตามลำดับ โดยปีงบประมาณ 2561 เป็นปีที่มีก๊าซเรือนกระจกเกิดขึ้นมากที่สุด เท่ากับ 29,857.81 tCO_2eq เนื่องจากปีงบประมาณ 2560 เทศบาลฯ มีปริมาณขยะทั่วไปที่ถูกรวบรวมไปฝังกลบมากที่สุด คือ 98,069.92 ตัน และปีงบประมาณ 2557 เป็นปีที่มีก๊าซเรือนกระจกเกิดขึ้นน้อยที่สุด เท่ากับ 22,571.00 tCO_2eq เนื่องจากปีงบประมาณ 2556 เทศบาลฯ มีปริมาณขยะทั่วไปที่ถูกรวบรวมไปฝังกลบน้อยที่สุด คือ 78,363.87 ตัน จะเห็นได้ว่า ปริมาณขยะที่นำไปฝังกลบเป็นปัจจัยสำคัญที่

ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก และเมื่อเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดต่อน้ำหนักขยะ พบว่า มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ในช่วง 0.2880–0.3045 tCO_2eq/ton ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการฝังกลบของเทศบาลนครนครศรีธรรมราช เท่ากับ 0.38 tCO_2eq/ton (วัฒนณรงค์, 2019)

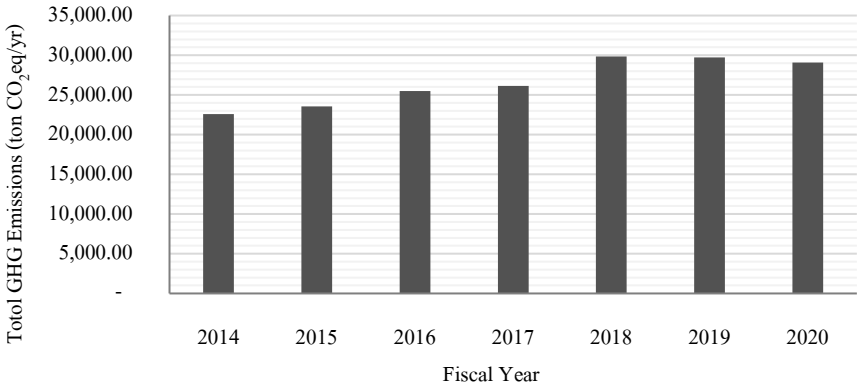


Fig. 1 Greenhouse Gas Emissions of Municipal Solid Waste Management during the Fiscal Years 2014– 2020

จาก Fig 1. จะเห็นได้ว่า เทศบาลนครปากเกร็ด มีแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะทั่วไปเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากเทศบาลนครปากเกร็ด เป็นพื้นที่ปริมณฑลที่รองรับการเจริญของกรุงเทพมหานคร ทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตทางสังคม และเศรษฐกิจสูง จำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้อัตราการเกิดขยะต่อวันสูงขึ้นตามไปด้วย

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะติดเชื้อ

Table 3 Greenhouse Gas Emissions of Clinical Waste Management during the Fiscal Years 2014–2020

Fiscal Years	Amount of Clinical Waste (ton)	Direct GHG Emissions	Indirect GHG Emissions	Total GHG Emission	GHG per Clinical Waste Weight
		GHG Emission (ton CO_2eq/yr)	from Transport (ton CO_2eq)	(ton CO_2eq/yr)	(ton CO_2 eq/ ton Clinical Waste)
2014	194.19	113.97	-	113.97	0.5869
2015	209.07	122.70	-	122.70	0.5869
2016	227.79	133.69	-	133.69	0.5869
2017	225.12	132.12	-	132.13	0.5869
2018	253.09	148.54	19.70	168.24	0.6648
2019	304.13	178.50	20.17	198.67	0.6532
2020	303.04	177.86	24.25	202.11	0.6669

Note: The fuel consumption data of the garbage truck is not collected during the fiscal years 2014 – 2017.

จากการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการขยะติดเชื้อ พบว่า ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2557–2563 มีค่าเท่ากับ 113.97, 122.70, 133.69, 132.13, 168.24, 198.67 และ 202.11 tCO_2eq ตามลำดับ โดยปีงบประมาณ 2562 มีก๊าซเรือนกระจกเกิดขึ้นมากที่สุด เท่ากับ 198.67 tCO_2eq เนื่องจากในปีงบประมาณ 2562 เทศบาลฯ มีปริมาณขยะติดเชื้อที่ถูกรวบรวมไปเข้าเตาเผามากที่สุด คือ 304.13 ตัน และปีงบประมาณ 2557 เป็นปีที่มีก๊าซเรือนกระจกเกิดขึ้นน้อยที่สุด เท่ากับ 113.97 tCO_2eq เนื่องจากในปีงบประมาณ 2556 เทศบาลฯ มีปริมาณขยะติดเชื้อที่ถูกรวบรวมไปเข้าเตาเผาน้อยที่สุด คือ 194.19 ตัน จะเห็นได้ว่า ปริมาณขยะติดเชื้อที่นำไปเข้าเตาเผา เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก

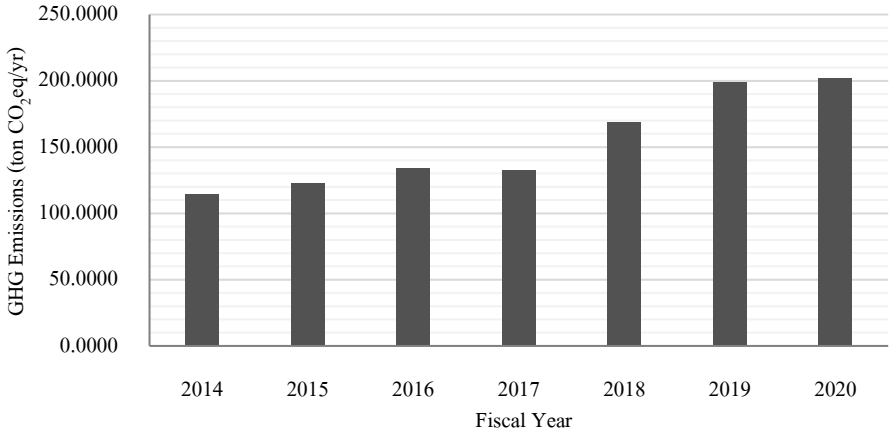


Fig. 2 Greenhouse Gas Emissions of Clinical Waste Management during the Fiscal Years 2014 - 2020

จาก Fig 2. จะเห็นได้ว่า มีแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะติดเชื้อเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เช่นเดียวกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะทั่วไป เนื่องจากมีสถานพยาบาล และคลินิกเปิดใหม่หลายแห่งรองรับการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร

จากการวิเคราะห์แนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เทศบาลนครปากเกร็ด จึงควรกำหนดนโยบาย มาตรการ และแผนงานการจัดการขยะประเภทต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับบริบทการเจริญเติบโตของเมืองในปัจจุบัน เพื่อช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น รวมทั้งช่วยลดงบประมาณในการจัดการขยะที่จะเกิดขึ้นอีกด้วย

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการน้ำเสีย

Table 4 Greenhouse Gas Emissions of Wastewater Management during May–October 2020

Activity	GHG Emissions (kg CO_2eq)					
	May 2020	Jun 2020	Jul 2020	Aug 2020	Sep 2020	Oct 2020
Scope 1 Direct GHG Emissions						
Wastewater Collection	5,126.95	6,804.94	5,659.16	7,065.44	6,784.09	6,875.36
Wastewater Treatment	–Do not emit greenhouse gases –(Activated Sludge Process)					
Total Scope 1 Direct GHG Emissions	5,126.95	6,804.94	5,659.16	7,065.44	6,784.09	6,875.36
Scope 2 Energy Indirect GHG Emissions						
Electricity from PEA	19,496.10	17,496.50	16,996.60	17,996.40	14,497.10	17,496.50

Table 4 (continued).

Activity	GHG Emissions (kg CO_2eq)					
	May 2020	Jun 2020	Jul 2020	Aug 2020	Sep 2020	Oct 2020
Total Scope 2 Energy Indirect GHG Emissions	19,496.10	17,496.50	16,996.60	17,996.40	14,497.10	17,496.50
Scope 3 Other Indirect GHG Emissions						
Water Supply (MWA)	85.84	142.27	70.74	72.33	66.76	67.56
Chlorine Use	316.44	316.44	326.99	326.99	316.44	326.99
Cation Polymer Use	135.85	17.16	143.00	157.30	143.00	114.40
Sludge Transport	27.33	6.59	23.91	25.05	19.07	17.24
Total Scope 3 Other Indirect GHG Emissions	565.45	482.46	564.64	581.67	545.27	526.19
Total GHG Emissions (Scope 1+2+3)	25,188.51	24,783.90	23,220.39	25,643.51	21,826.46	24,898.05
Total GHG Emissions per Wastewater Unit (kg CO_2 eq/m^3)	0.1833	0.1358	0.1530	0.1354	0.1200	0.1351

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการน้ำเสียชุมชนของเทศบาลนครปากเกร็ด ตั้งแต่เริ่มเดินระบบในเดือนพฤษภาคม 2563 – เดือนตุลาคม 2563 พบว่า ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากขอบเขตที่ 2 การใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อดำเนินงานของระบบ รองลงมาคือ ขอบเขตที่ 1 การรวบรวมน้ำเสีย และขอบเขตที่ 3 อื่น ๆ ได้แก่ การใช้คลอรีน การใช้พอลิเมอร์ การใช้น้ำประปา และการขนส่งกากตะกอนไปกำจัด ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดต่อปริมาณน้ำเสีย พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.1200 - 0.1833 kgCO_2eq/m^3

ในช่วง 0.1200 - 0.1833 kgCO_2eq/m^3

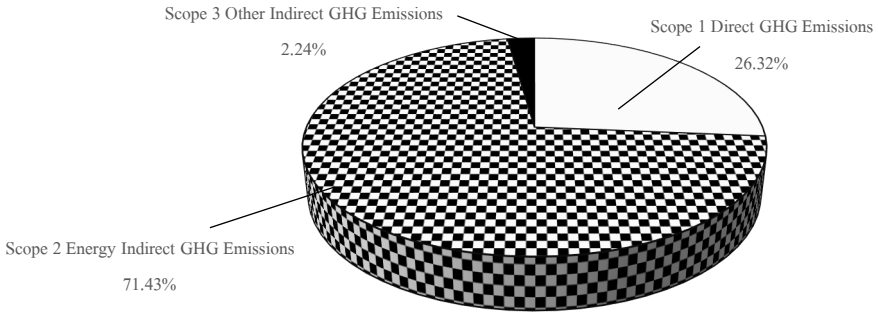


Fig. 3 Greenhouse Gas Emissions of Wastewater Management during May – October 2020

จาก Fig. 3 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบขอบเขตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการน้ำเสียของเทศบาลนครปากเกร็ด ในระหว่างเดือนพฤษภาคม 2563–เดือนตุลาคม 2563 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อดำเนินงานของระบบมีค่ามากที่สุด คิดเป็น 71.43% รองลงมาเป็นการรวบรวมน้ำเสีย 26.32%

และอื่น ๆ (การใช้คลอรีน การใช้พอลิเมอร์ การใช้น้ำประปา การขนส่งกากตะกอน) คิดเป็น 2.24% สอดคล้องกับการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบรวบรวมและระบบบำบัดน้ำเสียของเทศบาลนครราชสีมา ที่พบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นกิจกรรมที่มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด (ราชัน, 2561) ดังนั้น หากปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสีย จะสามารถช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการน้ำเสียลงได้

สรุป

1. ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะ ได้แก่ ปริมาณขยะมูลฝอยทั่วไป และปริมาณขยะติดเชื้อที่นำไปกำจัด เนื่องจากในขยะมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะทั่วไปที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเศษอาหาร เมื่อถูกนำไปฝังกลบภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน จะถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งจัดเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจก และปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการน้ำเสีย คือ การใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียของเทศบาลนครปากเกร็ด เป็นระบบ Activated Sludge จึงไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากการบำบัดน้ำเสีย แต่มีการเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงานไฟฟ้า

2. ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการขยะทั่วไปต่อน้ำหนักขยะ ในช่วงปีงบประมาณ 2557–2563 มีค่าอยู่ในช่วง 288.03–304.45 $kgCO_2eq/ton$ และก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการขยะติดเชื้อต่อน้ำหนักขยะในช่วงปีงบประมาณ 2557–2563 มีค่าอยู่ในช่วง 586.91–666.93 $kgCO_2eq/ton$ $kgCO_2eq/ton$

3. ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการจัดการน้ำเสียต่อหน่วยปริมาณน้ำเสีย ในช่วงเดือนพฤษภาคม 2563–เดือนตุลาคม 2563 มีค่าอยู่ในช่วง 0.1200–0.1833 $kgCO_2eq/m^3$ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้า

4. จากผลการศึกษา จะเห็นได้ว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น วิธีการลดก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะที่เหมาะสม เทศบาลนครปากเกร็ด ควรมุ่งเน้นรณรงค์ส่งเสริมให้มีการคัดแยกขยะต้นทางเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดปริมาณขยะที่ต้องนำไปฝังกลบ สำหรับการจัดการน้ำเสีย ควรปรับปรุงการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าของเครื่องจักรในระบบบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งส่งเสริมให้ประชาชนใช้น้ำอย่างประหยัด เพื่อลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด

ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาครั้งนี้ทำให้ได้แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการของเสียชุมชน กล่าวคือ เทศบาลนครปากเกร็ดควรกำหนดนโยบาย มาตรการ และวางแผนงานในการพัฒนาปรับปรุงระบบการจัดการของเสียชุมชนให้เหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นรณรงค์ส่งเสริมการใช้น้ำอย่างประหยัด และการคัดแยกขยะต้นทาง รวมทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าของเครื่องจักรในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะสามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และช่วยลดงบประมาณที่ต้องใช้ในการกำจัดของเสีย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ฝ่ายจัดการคุณภาพน้ำ ส่วนช่างสุขาภิบาล สำนักการช่าง และกองสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม เทศบาลนครปากเกร็ด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการน้ำเสีย และการจัดการขยะ

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2562. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

ราชัน ธีระพิทยาตระกูล. 2561. การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียของเทศบาลนครนครราชสีมา. Journal of Safety and Health. 12: 59–76.

วัฒนณรงค์ มากพันธ์, สมพงศ์ โอทอง. 2019. ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะมูลฝอย กรณีศึกษา: พื้นที่ฝังกลบเทศบาลนครนครศรีธรรมราช. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 28: 2064–2073.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2561. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์สำหรับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น, กรุงเทพฯ.

IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 5 Waste. IGES, Japan.

Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. 2017. Second biennial update report of Thailand. Bangkok, Thailand.

TGO. 2020a. ค่า Emission Factor โดยแบ่งตามประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม. http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_117a1351b6.pdf, 10 สิงหาคม 2563.

TGO. 2020b. ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) รวบรวมมาจากข้อมูลทุติยภูมิสำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร. http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_578cd2cb78.pdf, 10 สิงหาคม 2563.

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางเพื่อการขนส่งที่ยั่งยืนของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Evaluation of greenhouse gas emissions from transportation for development sustainable transport of Ubon Ratchathani University

ตระการ พรมสำลี, ทัศนีย์ เจียรพสุอนันต์*

Trakan Promsumlee, Tassanee Jiaphasuanan*

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand.

* Corresponding author. E-mail address: Tassanee.j@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของนักศึกษาและบุคลากรในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเพื่อพัฒนาการขนส่งที่ยั่งยืน ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพฤติกรรมการเดินทางในมหาวิทยาลัยปี พ.ศ. 2563 จากกลุ่มประชากร 17,501 คน สุ่มตัวอย่าง 400 คน สำรวจด้วยแบบสอบถามออนไลน์ แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง พบว่ามีการเดินทางด้วยรถส่วนบุคคลเป็นหลักโดยมีสัดส่วนรถจักรยานยนต์มากที่สุดร้อยละ 82.00 รองลงมา คือ รถยนต์ร้อยละ 14.00 ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด 1,035.70 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี เกิดจากรถจักรยานยนต์ 663.84 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี และรถยนต์ 337.09 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี คิดเป็นร้อยละ 64.09 และร้อยละ 32.55 คำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกด้วยวิธี Bottom–up ตามคู่มือการคำนวณก๊าซเรือนกระจกขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) และส่วนที่สอง พบว่ามีความต้องการให้มีรถขนส่งมวลชนไฟฟ้าร้อยละ 55.00 และปรับปรุงทางเท้าและทางจักรยานร้อยละ 23.80 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่ารถขนส่งมวลชนไฟฟ้าเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาการขนส่งที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก, การขนส่ง, มหาวิทยาลัย

Abstract

The research has the objective to assess greenhouse gas (GHG) emissions caused by transportation of students and staff in Ubon Ratchathani University for developing sustainable transportation. From the total population of 17,501, this study evaluated GHG emissions from commuting behaviors of 400 students and staff in 2020 from online survey. The study was divided into two parts. First, the results found that most students and staff commuted by motorcycles at 82.00%, followed by cars at 14.00%. The total GHG emissions from transport were equivalent to 1,035.70 tCO_2eq/year. GHG emissions caused by motorcycles were 663.84 tCO_2eq/year and by personal cars were 337.09 tCO_2eq/year, accounted for 64.09% and 32.55% respectively, calculate GHG by the bottom–up method according to manual of Thailand greenhouse gas management organization (Public Organization). Second, the results also revealed that most students and staff (55.00%) preferred the electric shuttle bus in the university as an alternative for sustainable transport in the university, followed by developing footpath and bike lanes (23.80%). In conclusion, the results of this research revealed that the electric shuttle bus was the suitable alternative for sustainable transport in the university.

Keywords: greenhouse gas, transportation, university

คำนำ

ก๊าซเรือนกระจก เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟาเรด ซึ่งก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศของโลกให้คงที่ หากในชั้นบรรยากาศมีก๊าซเรือนกระจกสะสมมากเกินไปอาจทำให้อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศของโลกเปลี่ยนแปลง ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ก๊าซไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF_3) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยเพิ่มขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมระดับโลก ทำให้ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกตื่นตัวในการดำเนินงานเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ทั้งการใช้พลังงาน การเกษตรกรรม การผลิตของภาคอุตสาหกรรม และการขนส่ง เป็นต้น (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน, 2554) จากข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้านการใช้พลังงานของประเทศไทย พบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเดินทางสูงเป็นอันดับสองของการใช้พลังงานทั้งหมด (United nations climate change, 2021) ซึ่งการเดินทางและการขนส่งเป็นกิจกรรมหลักในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ และเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ทั้งมลพิษทางอากาศและก๊าซเรือนกระจก (Qureshi and Lu, 2007) ดังนั้นการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืนจึงเป็นอีกทางเลือกในการช่วยลดก๊าซเรือนกระจกที่เห็นผลได้ชัดเจน การพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงผู้เดินทางทุกกลุ่ม ทั้งผู้ใช้ทางเท้า ผู้ใช้รถจักรยาน ผู้ใช้รถจักรยานยนต์ ผู้ใช้รถยนต์ และผู้ใช้รถขนส่งสาธารณะ รวมถึงกลุ่มของผู้ด้อยโอกาสทางสังคม เช่น ผู้มีรายได้น้อย ผู้สูงอายุ และผู้พิการ (สิทธา, 2557) รวมไปถึงส่งเสริมให้มีการใช้รถยนต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้รถยนต์ร่วมกัน การขับขี่อย่างประหยัด การใช้เชื้อเพลิงสะอาด และการให้บริการรถขนส่งสาธารณะมีส่วนช่วยในการลดก๊าซเรือนกระจกลงได้ จากการศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ พบว่า มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากยานพาหนะเท่ากับ 1,500 tCO_2/ปี คิดเป็นร้อยละ 43.24 มากเป็นอับดับที่ 2 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของมหาวิทยาลัย (สุรวุฒิ และดุษฎีพร, 2562) ในขณะที่มหาวิทยาลัยอื่นหลายมหาวิทยาลัยที่มีการดำเนินงานด้านมหาวิทยาลัยสีเขียวอย่างเป็นรูปธรรม เช่น มหาวิทยาลัยมหิดล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีการให้บริการรถรับส่งในมหาวิทยาลัยให้กับบุคลากรและนักศึกษาเพื่อเป็นการลดการใช้ยานพาหนะส่วนบุคคลและเป็นการลดก๊าซเรือนกระจกในมหาวิทยาลัย (Universitas Indonesia, 2017) ดังนั้นการพัฒนาให้มีรถขนส่งมวลชนไฟฟ้าและการพัฒนาทางเท้าและทางจักรยานในมหาวิทยาลัยจึงเป็นแนวทางในการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืน และยังช่วยลดก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศในมหาวิทยาลัยได้

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเป็นมหาวิทยาลัยขนาดใหญ่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง ที่มีนโยบายการพัฒนาการขนส่งภายในมหาวิทยาลัยให้มีความยั่งยืน (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2560) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วนักศึกษาและบุคลากรยังเดินทางด้วยยานพาหนะส่วนบุคคลและยังไม่มีการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการเดินทางและยังไม่มีแผนการพัฒนาการขนส่งที่ชัดเจน ดังนั้นการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยเทคนิค Bottom–up (สำนักงานนโยบายแผนและการขนส่งและจราจร, 2562) ที่เกิดจากการเดินทางจึงจำเป็นต่อการศึกษานี้ เพื่อเป็นการคาดการณ์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นและเป็นแนวทางในการจัดการการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืนในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) มีขอบเขตเพื่อศึกษาประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากรที่เกิดจากยานพาหนะส่วนบุคคลและรถสองแถวภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประกอบด้วย 3 พื้นที่ คือ (1) เขตที่พักอาศัย; (2) เขตสถานศึกษา; และ (3) เขตสถานพยาบาล ซึ่งเป็นพื้นที่หลักที่มีการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากร แสดงใน Fig 1.

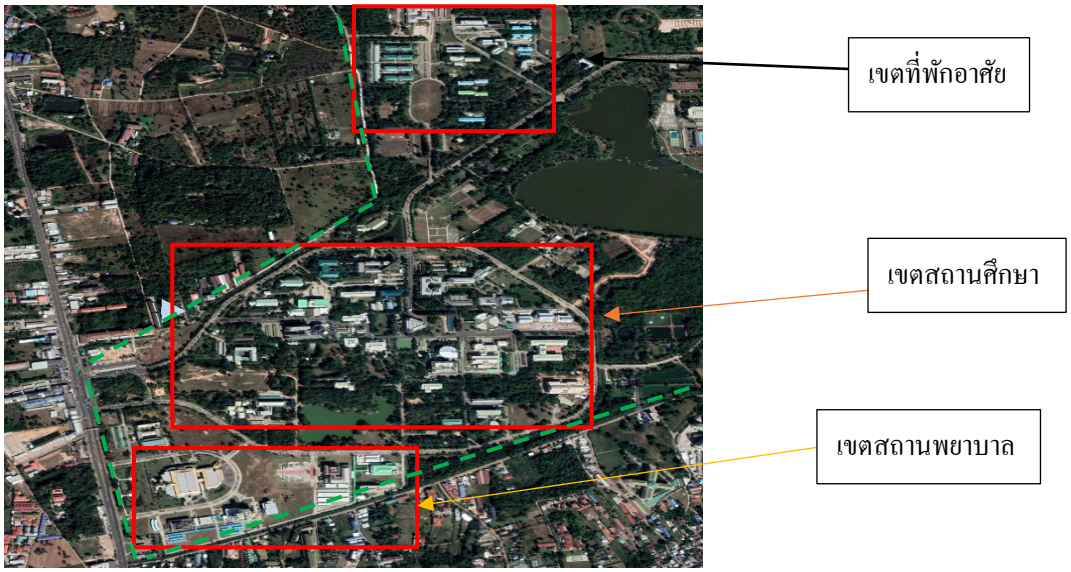


Fig 1. Boundary of the study site

โดยศึกษาลักษณะการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากรเพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2563 ดำเนินการสำรวจด้วยแบบสอบถามออนไลน์ ผ่านระบบ E- mail ของนักศึกษาและบุคลากร โดยเปิดให้ตอบระหว่างวันที่ 1–14 ธันวาคม 2563 การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสำรวจพฤติกรรมการเดินทางภายในมหาวิทยาลัยเพื่อประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเดินของนักศึกษาและบุคลากร และการสำรวจความต้องการของนักศึกษาและบุคลากรในด้านการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืนของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

กลุ่มตัวอย่างในการศึกษา คือ นักศึกษาและบุคลากรของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จากจำนวนประชากรของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทั้งหมด 17,501 คน ในปี พ.ศ. 2562 (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562) ผู้วิจัยได้เลือกกลุ่มตัวอย่างแบบกำหนดโควตา (Quota sampling) โดยการกำหนดโควตาของสัดส่วนตามจำนวนประชากรของนักศึกษาและบุคลากร ซึ่งแบ่งเป็นนักศึกษา 15,992 คน และบุคลากร 1,509 คน คิดเป็นร้อยละ 91.37 และ 8.63 ตามลำดับ โดยใช้สมการของ Yamane (1970) สามารถคำนวณกลุ่มตัวอย่างได้ 391 คน หรือประมาณ 400 คน ซึ่งแบ่งสัดส่วนกลุ่มตัวอย่างตามสัดส่วนจำนวนประชากรได้เป็นนักศึกษา 364 คน และ บุคลากร 36 คน

การสำรวจพฤติกรรมการเดินทางภายในมหาวิทยาลัย ผู้วิจัยได้แบ่งการสำรวจออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ข้อมูลการเดินทางไป–กลับจากที่พักจนถึงมหาวิทยาลัย (กรณีที่พักอยู่นอกมหาวิทยาลัย; คิดระยะทางจากประตูทางเข้ามหาวิทยาลัยถึงจุดหมายแรกภายในมหาวิทยาลัย กรณีที่พักอยู่ภายในมหาวิทยาลัย; คิดระยะทางจากที่พักถึง

จุดหมายแรกภายในมหาวิทยาลัย) และ (2) ข้อมูลการเดินทางระหว่างวันภายในมหาวิทยาลัย เนื่องจากขอบเขตการศึกษาของงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นภายในมหาวิทยาลัยและระยะทางระหว่างอาคารเรียนมีระยะทางที่ไม่ไกลมาก อาจทำให้การเดินทางระหว่างวันของนักศึกษาและบุคลากรเป็นไปได้หลายรูปแบบ เช่น การเดิน การใช้ยานพาหนะร่วมกัน หรือรถสองแถว เป็นต้น

การสำรวจความต้องการในด้านการพัฒนาการขนส่งที่ยั่งยืนของนักศึกษาและบุคลากรของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีผู้วิจัยได้ออกแบบให้เป็น 2 รูปแบบ คือ การพัฒนาให้มีรถขนส่งมวลชนไฟฟ้า และการพัฒนาทางเท้าและทางจักรยาน ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้หลักการการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืนและความเหมาะสมกับพื้นที่ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีจากการแบ่งขอบเขตการศึกษา

การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทาง ประกอบด้วย ก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางโดยยานพาหนะส่วนบุคคลของนักศึกษาและบุคลากร และก๊าซเรือนกระจกจากรถสองแถวที่มีปลายทางถึงภายในมหาวิทยาลัย โดยการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกใช้สมการขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน, 2559) ซึ่งมีสมการดังนี้ (Equation 1)

$$\text{ปริมาณก๊าซเรือนกระจก} = \frac{\text{ข้อมูลกิจกรรม} \times \text{ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก}}{\text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของยานพาหนะ}} \qquad (1)$$

ข้อมูลกิจกรรม คือ ข้อมูลการเดินทาง ได้แก่ ระยะทางที่เดินทางจากที่พักถึงจุดหมายแรก และระยะทางที่เดินทางระหว่างวันภายในมหาวิทยาลัยมีหน่วยเป็นกิโลเมตร ซึ่งผู้วิจัยได้ข้อมูลการเดินทางจากการตอบแบบสอบถามและข้อมูลระยะทางจากการวัดระยะทางในโปรแกรม Google earth pro

ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยกิจกรรมมีหน่วยเป็นกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยกิจกรรม โดยเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามประเภทของยานพาหนะ ขนาดของเครื่องยนต์ และชนิดของเชื้อเพลิง โดยงานวิจัยในครั้งนี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของยานพาหนะที่รวบรวมโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน, 2559) ซึ่งเป็นองค์กรที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยที่ได้รับการยอมรับในระดับชาติ แสดงใน Table 1

กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณตามสถานการณ์จริงในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางส่วนใหญ่เกิดขึ้นเฉพาะวันที่ทำการปกติใน 2 ภาคการศึกษา รวมทั้งสิ้น 35 สัปดาห์ต่อปีการศึกษา โดยการเดินทางด้วยยานพาหนะส่วนบุคคลคำนวณตามวันทำการปกติ 175 วัน (ไม่รวมวันเสาร์-อาทิตย์) ส่วนรถสองแถวคำนวณทั้งวันทำการปกติและวันเสาร์-อาทิตย์รวม 245 วัน

Table 1 Emission factor of fuel type

Fuel of type	Unit	Emission factor
Motor Gasoline – uncontrolled[1]	Liter	2.2373
Gas/Diesel Oi1[1]	Liter	2.7403
Liquified Petroleum Gas[1]	Liter	1.7273
Gasohol 91/95[2]	Liter	1.9632
Gasohol E 20[2]	Liter	1.7449
Gasohol E 85[2]	Liter	0.3270

Note:[1]Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization) (2020); [2]Office of Planning and Transportation and Traffic Policy (2019)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการสำรวจข้อมูลพบว่านักศึกษาและบุคลากรส่วนใหญ่เดินทางด้วยรถจักรยานยนต์ 328 คน คิดเป็นร้อยละ 82.00 รถยนต์ส่วนบุคคล 56 คน คิดเป็นร้อยละ 14.00 รถสองแถว 8 คน และรถจักรยาน 8 คน คิดเป็นร้อยละ 2 และ 2 ตามลำดับ แสดงดัง Table 2

Table 2 Number and percentage of respondents classified by travel

Type of vehicle	Number of people	Percent
Motorcycle	328	82.00
Personal car	56	14.00
Pick-up truck taxi	8	2.00
Bicycle	8	2.00
Total	400	100

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเดินทางด้วยรถจักรยานยนต์ รถยนต์ และรถสองแถวของนักศึกษาและบุคลากรใน 1 ปี ผลการวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกพบว่ามหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากรทั้งหมด 1,035.70 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี (tCO_2eq/ปี) หรือคิดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดต่อคนเท่ากับ 0.06 tCO_2eq/ปี เกิดจากการเดินทางด้วยรถจักรยานยนต์เท่ากับ 663.84 tCO_2eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 64.09 ซึ่งเกิดจากการเดินทางจากที่พัก – จุดหมายแรกเท่ากับ 267.99 tCO_2eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 40.37 และเกิดจากการเดินทางระหว่างวันเท่ากับ 395.85 tCO_2eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 59.63 โดยมีระยะทางเฉลี่ยที่เกิดจากการเดินทางด้วยรถจักรยานยนต์เท่ากับ 2.96 กิโลเมตร/วัน เกิดจากการเดินทางด้วยรถยนต์เท่ากับ 337.09 tCO_2eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 32.55 ซึ่งเกิดจากการเดินทางจากที่พัก– จุดหมายแรกเท่ากับ 124.36 tCO_2eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 36.89 และเกิดจากการเดินทางระหว่างวันเท่ากับ 212.73

tCO_2eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 63.11 โดยมีระยะทางเฉลี่ยที่เกิดจากการเดินทางด้วยรถยนต์เท่ากับ 2.97 กิโลเมตร/วัน และเกิดจากรถสองแถว 34.77 tCO_2eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 3.36 แสดงดัง Table 3

Table 3 The greenhouse gas emission from transportation in Ubon Ratchathani University

Commuting distance	Personal transportation				Public transportation	
	Motorcycle		Car		Pick-up truck taxi	
	GHGs (tCO_2eq/year)	Percent	GHGs (tCO_2eq/year)	Percent	GHGs (tCO_2eq/year)	Percent
Home to University	267.99	40.37	124.36	36.89	-	-
Within University	395.85	59.63	212.73	63.11	34.77	100
Total	663.84		337.09		34.77	
Total	1,035.70					

จากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากรมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พบว่ามีปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากรถจักรยานยนต์มากกว่ารถยนต์เป็น 2 เท่า เนื่องจากนักศึกษาและบุคลากรมีการใช้รถจักรยานยนต์เป็นส่วนใหญ่และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถยนต์บางส่วนเป็นพลังงานทางเลือก เช่น แก๊สโซฮอล์ E 20 และ แก๊สโซฮอล์ E 85 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถจักรยานยนต์ จึงบ่งชี้ได้ว่า พลังงานทางเลือกเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้น และการเดินทางระหว่างวันภายในมหาวิทยาลัยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่าการเดินทางจากที่พักถึงจุดหมายแรกทั้งการเดินทางด้วยรถจักรยานยนต์และรถยนต์ จึงอาจกล่าวได้ว่าหากมีการจัดรถบริการสาธารณะรับ - ส่งภายในมหาวิทยาลัย หรือการส่งเสริมให้เกิดการเดินทางโดยไม่ใช้เครื่องยนต์โดยการพัฒนาทางเดินเท้าหรือทางจักรยาน จะช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการเดินทางระหว่างวันนี้ลงได้ เนื่องจากอาคารเรียนและคณะต่าง ๆ ส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันและมีระยะทางไม่ไกลมาก

เมื่อเปรียบเทียบการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเดินทางภายในมหาวิทยาลัยของมหาวิทยาลัยอื่น พบว่ามหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเดินทางทั้งหมด 3 ภาคการศึกษา โดยเก็บข้อมูลครั้งละ 7 วันต่อ 1 ภาคการศึกษา พบว่ามีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 1,500.00 tCO_2eq/ปี ซึ่งมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิมีประชากรทั้งหมด 6,499 คน หรือคิดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดต่อคนเท่ากับ 0.23 tCO_2eq/ปี โดยมีระยะทางเฉลี่ยในการเดินทางเท่ากับ 4.34 กิโลเมตร/วัน เนื่องจากมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิมีจุดที่ตั้งของอาคารเรียนที่ห่างกัน จึงมีการใช้ยานพาหนะเดินทางภายในมหาวิทยาลัยเป็นจำนวนมากซึ่งมีการเดินทางด้วยรถจักรยานยนต์สูงถึงร้อยละ 96.03 และยังไม่มีการให้บริการรถขนส่งสาธารณะภายในมหาวิทยาลัย จึงส่งผลต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้น (สุรวุฒิ และ ดุษฎีพร, 2562) เมื่อเปรียบเทียบกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีพบว่ามหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นน้อยกว่า เนื่องจากมีระยะทางในการเดินทางที่น้อยกว่า และมีบางส่วนที่มีการเดินทางด้วยรถสองแถวและรถจักรยาน

การสำรวจความต้องการในด้านการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืนของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พบว่านักศึกษาและบุคลากรส่วนใหญ่มีความต้องการในเรื่องการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืน โดยพบว่ามีผู้เลือกการ

พัฒนาให้มีรถขนส่งมวลชนไฟฟ้าสูงถึง 220 คน คิดเป็นร้อยละ 55.00 เมื่อคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นเมื่อมีการพัฒนาให้มีรถขนส่งมวลชนไฟฟ้า พบว่ามีปริมาณก๊าซเรือนกระจกลดลง 577.53 tCO_2eq/ปี จากปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในปีที่ศึกษา ความต้องการการพัฒนาให้มีการปรับปรุงทางเท้าและทางจักรยาน 95 คน คิดเป็นร้อยละ 23.80 และผู้ที่ยังเลือกการเดินทางโดยรถส่วนบุคคลและรถสองแถวที่เกิดขึ้นตามปกติ 85 คน คิดเป็นร้อยละ 21.20 แสดงใน Table 4

Table 4 Choices of sustainable transport in Ubon Ratchathani University

Type of transportation	Number of people	Percent
Electric vehicle	220	55.00
Footpath and bike lane	95	23.80
Personal car, Motorcycle and Pick-up truck taxi	85	21.20
Total	400	100

จากผลการสำรวจความต้องการแสดงให้เห็นว่านักศึกษาและบุคลากรส่วนใหญ่มีความตระหนักในเรื่องการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืน เพื่อช่วยลดการใช้เชื้อเพลิง และลดปัญหามลพิษทางอากาศทั้ง ฝุ่น ควัน และก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในมหาวิทยาลัย เนื่องจากส่วนใหญ่เลือกรถขนส่งมวลชนไฟฟ้า ซึ่งมีการปล่อยมลพิษทางอากาศ และส่งเสียงรบกวนน้อยเมื่อเทียบกับการเดินทางด้วยรถส่วนบุคคล โดย ชุดะ (2546) ได้ทำการศึกษาแล้วในโครงการขนส่งมวลชนมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่ารถไฟฟ้าสามารถบรรเทาปัญหาจราจร และมลพิษทางอากาศลงได้

สรุป

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการเดินทางภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พบว่านักศึกษาและบุคลากรส่วนใหญ่เดินทางด้วยยานพาหนะส่วนบุคคล คิดเป็นร้อยละ 96.00 ซึ่งส่งผลต่อการเกิดก๊าซเรือนกระจกภายในมหาวิทยาลัยสูงถึง 1,000.93 tCO_2eq/ปี หรือคิดเป็นร้อยละ 96.64 ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเดินทางภายในมหาวิทยาลัย และการสำรวจความต้องการในด้านการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืนของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พบว่านักศึกษาและบุคลากรส่วนใหญ่เลือกรูปแบบการพัฒนาให้มีรถขนส่งมวลชนไฟฟ้าสูงที่สุด รองลงมาคือการพัฒนาทางเดินเท้าและทางจักรยาน ดังนั้นแนวทางของการพัฒนาการขนส่งอย่างยั่งยืนของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีจึงชัดเจนว่าความเพิ่มรถขนส่งมวลชนโดยต้องเป็นรถไฟฟ้าที่ประหยัดพลังงานและลดมลพิษทางอากาศ และควรเพิ่มทางเดินเท้าและทางจักรยานเพื่อสนับสนุนให้เกิดการเดินทางที่ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักศึกษาและบุคลากรมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาครั้งนี้ และทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

ซุดะ โคอิชิ. 2546. ประสิทธิภาพของโครงการขนส่งมวลชนมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยรถไฟฟ้าเพื่อการบรรเทาปัญหาจราจร และมลพิษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2560. แผนยุทธศาสตร์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ระยะ 5 ปี พ.ศ. 2560–2564. http://www.ubu.ac.th/web/files_up/03f2017080210191586.pdf, 17 มกราคม 2563.

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2562. รายงานประจำปี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 2562. http://www.ubu.ac.th/web/planning, 17 มกราคม 2563.

สิทธา เจนศิริศักดิ์. 2557. การวางแผนการขนส่งอย่างยั่งยืน: บทเรียนจากยุโรปสำหรับประเทศไทย. วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 1: 81–92.

สุรวุฒิ สุดหา, ดุษฎีพร หิรัญ.2562. ศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 26: 227–223.

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและการจราจร. 2562. โครงการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ต้นทุนส่วนเพิ่มในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมาตรการและนโยบายด้านการขนส่งเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ [รายงานฉบับสมบูรณ์].

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2554. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โครงการการส่งเสริมการทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร, พิมพ์ครั้งที่ 1. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2559. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร, พิมพ์ครั้งที่ 5. บริษัท พีทู ดีไซน์ แอนด์ พริ้นท์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2563. ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) สำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร. http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_578cd2cb78.pdf, 25 เมษายน 2563

Qureshi, I. A., Lu, H. 2007. Urban Transport and Sustainable Transport Strategies: A Case Study of Karachi, Pakistan, Tsinghua Science and Technology 12: 309–317. doi.org/10.1016/S1007-0214(07)70046-9.

Universitas Indonesia. 2017. คู่มือการจัดอันดับมหาวิทยาลัยสีเขียวโลก ยูไอ กรีนเมตริก. http://greenmetric.ui.ac.id/wpcontent/uploads/2015/07/UI-GreenMetric-Guideline-2017_Thai.pdf, 17 มกราคม 2563.

United Nations climate change. 2021. THAILAND THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/BUR3_Thailand_251220%20.pdf, 20 มีนาคม 2564

Yamane, T. 1970. Statistic–An Introductory Analysis, 2nd ed. John Weather Hill Inc. Tokyo, Japan.

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

1. รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและวิจัย	ที่ปรึกษา
2. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ	ที่ปรึกษา
3. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์	ประธานกรรมการ
5. รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหาร สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	รองประธานกรรมการ
6. นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร	กรรมการและเลขานุการ
7. นางสาวทิสยา ทิศเสถียร	ผู้ช่วยเลขานุการ
8. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	ผู้ช่วยเลขานุการ
9. นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์	ผู้ช่วยเลขานุการ

10. กรรมการหมวดวิชาการเกษตรศาสตร์

10.1 สาขาพืช

1. คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ กิตติภาดากุล	ประธานกรรมการ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สราวุธ รุ่งเมฆารัตน์	รองประธานกรรมการ
4. รองศาสตราจารย์ธานี ศรีวงศ์ชัย	กรรมการ
5. รองศาสตราจารย์ธิดา เดชฮวบ	กรรมการ
6. รองศาสตราจารย์เฉลิมพล ภูมิไชย์	กรรมการ
7. รองศาสตราจารย์อรอุมา เพียซ้าย	กรรมการ
8. รองศาสตราจารย์เสาวนุช ถาวรพฤกษ์	กรรมการ
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฌอมาลย์ วงศ์ชาวจันท์	กรรมการ
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจนจิรา ชุมภูคำ	กรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทัศไนย จารุวัฒนพันธ์	กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เบญญา มะโนชัย	กรรมการ
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริยานุช จุลกะ	กรรมการ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิจิตรา แก้วสอน	กรรมการ
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัณณ์ชญาน์ มงคลชัยพฤกษ์	กรรมการ
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนพล ไชยแสน	กรรมการ
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจินต์ เจนวีรวัฒน์	กรรมการ

18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงยศ โชติชุติมา	กรรมการ
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติพงษ์ โตบันลือภพ	กรรมการ
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริชาติ พรมโชติ	กรรมการ
21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล	กรรมการ
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนตรนภิส เขียวขำ	กรรมการ
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนงค์นุช สาสนรักกิจ	กรรมการ
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัศเลข รัตนวรรณี	กรรมการ
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เพชรดา ปินใจ	กรรมการ
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม	กรรมการ
27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาวรรณ เงินกลั่น	กรรมการ
28. นางสาวกาญจนา บุญเรือง	กรรมการ
29. นางสาวจรีรัตน์ ฉันทวุฒิพร	กรรมการ
30. นางสาวจุติภรณ์ ทัสสกุลพนิช	กรรมการ
31. นายวีรชัย มัธยัสถ์ถาวร	กรรมการ
32. นางสาวอรุณี วงษ์แก้ว	กรรมการ
33. นางสาววรรณสิริ วรรณรัตน์	กรรมการ
34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัศจี คงศีล	กรรมการและเลขานุการ
35. นางสาวชิดชนก ประกอบ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

10.2 สาขาสัตว์

1. คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
2. นายกสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทย	ที่ปรึกษา
3. รองศาสตราจารย์พรรณวดี โสพรรณรัตน์	ประธานกรรมการ
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สโรช แก้วมณี	รองประธานกรรมการ
5. ศาสตราจารย์ชัยภูมิ บัญชาศักดิ์	กรรมการ
6. รองศาสตราจารย์ศกร คุณวุฒิฤทธิรณ	กรรมการ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จำเริญ เที่ยงธรรม	กรรมการ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาทิพย์ สุวรรณโสภี	กรรมการ
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัจฉรา ขยัน	กรรมการ
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิริยา ลุ้งใหญ่	กรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวิทย์ เป่ยคำภา	กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ธร คงมั่น	กรรมการ

13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กนกพร พ่วงพงษ์	กรรมการ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญวิทย์ แก้วตาปี	กรรมการ
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์วิทย์ ระฆังทอง	กรรมการ
16. นายดนัย จัตวา	กรรมการ
17. นางสาวพนัดดา บึงศรีสวัสดิ์	กรรมการ
18. นายสมบัติ ประสงค์สุข	กรรมการ
19. นางสาวอัญชลี บวดขุนทด	กรรมการ
20. นางสาวสุภาพร ย้อนโคกสูง	กรรมการ
21. นางสาวนิภารัตน์ โคตะนนท์	กรรมการ
22. นางสาว ก.ทีปลักษณ์ ระงับเหตุ	กรรมการและเลขานุการ
23. นางสาววัชราภรณ์ ศรีพลน้อย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

10.3 สาขาประมง

1. คณบดีคณะประมง	ที่ปรึกษา
2. ศาสตราจารย์อุทัยรัตน์ ณ นคร	ที่ปรึกษา
3. รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะประมง	ประธานกรรมการ
4. หัวหน้าศูนย์บริหารงานวิจัยและสนับสนุนวิชาการ	กรรมการ
5. รองศาสตราจารย์วราห์ เทพาหุดี	กรรมการ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมธี แก้วเนิน	กรรมการ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิราภรณ์ ไตรศักดิ์	กรรมการ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา มุสิกสินธร	กรรมการ
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒนพล ขยันสำรวจ	กรรมการ
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กังสดาลย์ บุญปราบ	กรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุกรณ์ บุตรสันติ์	กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาย วรชนะนันท์	กรรมการ
13. นายประพันธ์ศักดิ์ ศิรษะภูมิ	กรรมการ
14. นายถิรวัฒน์ รายรัตน์	กรรมการ
15. นายวชิระ ใจงาม	กรรมการ
16. นายธนัสพงษ์ โภควนิช	กรรมการและเลขานุการ
17. นางสาวกาญจนา ทองเครือ	ผู้ช่วยเลขานุการ
18. นางศุภินทรา ภู่เงิน	ผู้ช่วยเลขานุการ

10.4 สาขาสัตวแพทยศาสตร์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ คงศักดิ์ เที่ยงธรรม	ที่ปรึกษา
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง สิริรัตน์ นิยม	ที่ปรึกษา
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ เมธา จันดา	ประธานกรรมการ
4. รองศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง สุนทรี เพ็ชรดี	รองประธานกรรมการ
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ นิรุตติ์ สุวรรณา	กรรมการ
6. ผู้ช่วยศาสตรตราจารย์อรรถวิทย์ โกวิทวที	กรรมการ
7. สัตวแพทย์หญิง นิอร รัตนภพ	กรรมการ
8. สัตวแพทย์หญิง ยลยง วุ้นวงษ์	กรรมการ
9. สัตวแพทย์หญิง กานต์สุดา ลีฬหาพงศธร	กรรมการ
10. นางสาววริศรา มารยาท	กรรมการและเลขานุการ
11. นางสาวญาดา หาญปัญญาพิชิต	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
12. ว่าที่ร้อยตรีหญิง จรัสพิมพ์ ทรงประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

10.5 สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์

1. อธิบดีกรมส่งเสริมการเกษตร	ที่ปรึกษา
2. คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
3. หัวหน้าภาควิชาส่งเสริมและนิเทศศาสตร์เกษตร คณะเกษตร	ที่ปรึกษา
4. หัวหน้าภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร	ที่ปรึกษา
5. รองศาสตราจารย์สาวิตรี รังสิภัทร์	ที่ปรึกษา
6. รองศาสตราจารย์จำนงรักษ์ อุดมเศรษฐ์	ที่ปรึกษา
7. รองศาสตราจารย์อบเชย วงศ์ทอง	ที่ปรึกษา
8. รองศาสตราจารย์ทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ	ที่ปรึกษา
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชราวดี ศรีบุญเรือง	ประธานกรรมการ
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพร เรียบร้อย คิม	รองประธานกรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้องนุช ศิริวงศ์	รองประธานกรรมการ
12. นางสาวนริศรา อินทะสิริ	รองประธานกรรมการ
13. รองศาสตราจารย์พัฒนา สุขประเสริฐ	กรรมการ
14. รองศาสตราจารย์พิชัย ทองดีเลิศ	กรรมการ
15. รองศาสตราจารย์สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ	กรรมการ
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนามาศ ตรีวรรณกุล	กรรมการ
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพัตรา ศรีสุวรรณ	กรรมการ

18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำพร แจ่มผล กรรมการ
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร กรรมการ
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาริษา ภู่ภิญโญกุล กรรมการ
21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์ กรรมการ
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานต์สุดา วันจันทึก กรรมการ
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งทิพย์ ลุยเลา กรรมการ
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชุติมา ชวลิตมณเฑียร กรรมการ
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต กรรมการ
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลภา แต้มทอง กรรมการ
27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวิตรี พังงา กรรมการ
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทิพวรรณ ดวงปัญญา กรรมการ
29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธานินทร์ คงศิลา กรรมการ
30. นางสาวชลาธร จูเจริญ กรรมการ
31. นางสาวเมตตา เร่งขวนขวาย กรรมการ
32. นางปพิชญา จินตพิทักษ์สกุล กรรมการ
33. นายปรีดา สามงามยา กรรมการ
34. นายเศกศักดิ์ เชยชม กรรมการ
35. นางสาวสุจิตตา เรืองรัศมี กรรมการ
36. นางสุขกมล ปัญญาจันทร์ กรรมการ
37. นางสาววสพร นิชรัตน์ กรรมการ
38. นายสถาพร ประดิษฐพงษ์ กรรมการ
39. นางกรกฎ แพทย์หลักฟ้า กรรมการ
40. นายวิภูษณะ ศุภนคร กรรมการ
41. นางทิพากร ม่วงถึก กรรมการ
42. นายเสถียร แสงแถวทิม กรรมการและเลขานุการ
43. ว่าที่ร้อยตรี สหภาพ ศรีโท กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
44. นางสาวมณินทร เดชแห้ว กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
45. นางสาวกรรณิกา พุ่มสาหร่าย กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
46. นายภูคิษฐ์คมณ์ แสงตรีเพชรกล้า กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
47. นางสาวสวรรญา แย้มวันเพ็ง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
48. นางวลีรัตน์ บรรจงจิต กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
49. นางสาวภิญญาพัชญ์ โทนหงส์ษา กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

50. นางธรรมสร ทองดอนเกลื่อง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
51. นางสาวธนัชชา กุญแจทอง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

11. กรรมการหมวดวิชาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

11.1 สาขาวิทยาศาสตร์

1. รองศาสตราจารย์อภิสิฏฐ์ ศงสะเสน ที่ปรึกษา
2. รองศาสตราจารย์อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต ประธานกรรมการ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพบูลย์ เงินมีศรี รองประธานกรรมการ
4. รองศาสตราจารย์วรรณวิภา วงศ์แสงนาค กรรมการ
5. รองศาสตราจารย์ศิริกาญจนา ทองมี กรรมการ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐสมน เพชรแสง กรรมการ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันทิพย์ โตแก้ว กรรมการ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธันวาวรรณ ด้วงทองอยู่ กรรมการ
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อิงอร กิมกง กรรมการ
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชามญชุ์ เกียรติวุฒินนท์ กรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุดสวาสดิ์ ดวงศรีไสย์ กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะดา จันทวงศ์ กรรมการ
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มีนา เลา กรรมการ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วชิรญาณ์ ธงอาสา กรรมการ
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์เทพ ประจงทัศน์ กรรมการ
16. นายฤทธี มีสัตย์ กรรมการ
17. นางสาวสุนทรี คุ้มไพโรจน์ กรรมการ
18. นางสาวลัดดา แต่งวัฒนานุกูล กรรมการ
19. นางสาวพรทิพย์ บุญมหามงคล กรรมการและเลขานุการ
20. นายรัฐพันธ์ ตรงวิวัฒน์ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
21. นายสาธิต ประเสริฐมานะกิจ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
22. นางสาวแพรวไพลิน กังวานสุระ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
23. นางสาวภัสรา นวะบุศย์ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
24. นายพิชัย สิริแสงสว่าง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

11.2 สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

1. ศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ	ประธานกรรมการ
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นวลวรรณ ทวยเจริญ	รองประธานกรรมการ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตร์ทัศน์ ฝักเจริญผล	รองประธานกรรมการ
4. ศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช	กรรมการ
5. ศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์	กรรมการ
6. รองศาสตราจารย์ดวงฤดี ฉายสุวรรณ	กรรมการ
7. รองศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์	กรรมการ
8. รองศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ	กรรมการ
9. รองศาสตราจารย์วรดร วัฒนพานิช	กรรมการ
10. รองศาสตราจารย์จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน	กรรมการ
11. รองศาสตราจารย์กฤษณะ ไวยมัย	กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรชัย ชัยวรพฤกษ์	กรรมการ
13. นายพสิษฐ์ สืบสุวงศ์	กรรมการ
14. นางสาวสุทัตตา พาหุมันโต	กรรมการและเลขานุการ
15. นางชุติณัท ขุนทอง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
16. นางสาวพัชรียา บุบผาชาติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
17. นางดารณี ยงยืน	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

11.3 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชราภรณ์	ประธานกรรมการ
2. รองศาสตราจารย์สุนทรี สุวรรณสิชณน์	รองประธานกรรมการ
3. รองศาสตราจารย์พรธิภา องค์คุณารักษ์	รองประธานกรรมการ
4. รองศาสตราจารย์เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล	กรรมการ
5. รองศาสตราจารย์สุดสาย ตรีวานิช	กรรมการ
6. รองศาสตราจารย์ประกิต สุขใย	กรรมการ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิต พุทธพงษ์ศิริพร	กรรมการ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล	กรรมการ
9. นางสาวภัทรินทร์ ลีลาภิวัฒน์	กรรมการ
10. นางสาวพรรณภัทร พรหมเพ็ญ	กรรมการ
11. นางสาวสุมัลลิกา โมรากุล	กรรมการ
12. นางสาวสุวิมล เจริญสิทธิ์	กรรมการ

13. นายนิพัฒน์ ลิ้มสงวน กรรมการ
14. นายประมวล ทรายทอง กรรมการ
15. นางสาวนัฏพร ขนุนก้อน กรรมการ
16. นางสาวสุพนิดา วินิจฉัย กรรมการ
17. รองศาสตราจารย์ณัฐดนัย หาญการสุจริต กรรมการและเลขานุการ
18. นางดวงสมร นามกระโทก กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
19. นางศศิธร พลโยธา กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

11.4 สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กอบศักดิ์ วันธงไชย ที่ปรึกษา
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ ที่ปรึกษา
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ ประธานกรรมการ
4. นายณัฐวัฒน์ คลังทรัพย์ รองประธานกรรมการ
5. รองศาสตราจารย์วัฒนชัย ตาเสน กรรมการ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรอนงค์ ผิวนิล กรรมการ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ กรรมการ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นฤมล แก้วจำปา กรรมการ
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิตยา เมี้ยนมิตร กรรมการ
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร กรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พยัตติพล ณรงคะชวนะ กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรเทพ เหมือนพงษ์ กรรมการ
13. นางสาวแอน กำภู ณ อยุธยา กรรมการ
14. นายกฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ กรรมการ
15. นายปวีร์ คล่องเวสสะ กรรมการ
16. นายวรงค์ สุขเสวต กรรมการ
17. นายสุธี จรรยาสุทธิวงศ์ กรรมการ
18. นางสาวละอองดาว เถาว์พิมาย กรรมการและเลขานุการ
19. นางสาวจินตลา กลิ่นหวล กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
20. นางสาวศิรภัสสร ชมเชย กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

12. กรรมการหมวดวิชาการมนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศึกษาศาสตร์

12.1 สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ

๑. รองศาสตราจารย์ภัทรกิตติ์ เนตินิยม	ที่ปรึกษา
๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุชนาถ มั่งคั่ง	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์หฤทัย นำประเสริฐชัย	ที่ปรึกษา
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรารัตน์ วรพิเชฐ	ที่ปรึกษา
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิทวัส เอื้อสังคมเศรษฐ์	ที่ปรึกษา
๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลพรรณ แสงมหาชัย	ปรึกษา
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรายุทธ เรืองสุวรรณ	ที่ปรึกษา
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พลวัฒน์ เลิศกุลวัฒน์	ประธานกรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์ประพิณวดี ศิริศุภลักษณ์	รองประธานกรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์ทิพย์รัตน์ เลาหวิเชียร	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ คูวัฒนเธียรชัย	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธงชัย ศรีวรรธนะ	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภฤกษ์ สุขสมาน	กรรมการ
๑๔. นางสาวกรรณิกา มิตรปล้อง	กรรมการ
๑๕. นางสาวปรารถนา ประสงค์สิน	กรรมการและเลขานุการ
๑๖. นางสาวอรการณ์ วีระชยาภรณ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๗. นายทองปาน ขันตีกรม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๘. นายฉัตรชัย พ่วงพลับ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๙. นางสาวอารีย์ สีแสงมุข	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๐. นางลัดดา ปัญทะภูรีเวท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

12.2 สาขาศึกษาศาสตร์

1. คณบดีคณะศึกษาศาสตร์	ที่ปรึกษา
2. คณบดีคณะศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์	ที่ปรึกษา
3. รองคณบดีฝ่ายบริหาร คณะศึกษาศาสตร์	ที่ปรึกษา
4. รองคณบดีฝ่ายวิชาการ คณะศึกษาศาสตร์	ที่ปรึกษา
5. รองศาสตราจารย์พรทิพย์ ไชยโส	ที่ปรึกษา
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิกุล เอกวรางกูร	ประธานกรรมการ
7. รองศาสตราจารย์วรรณดี สุทธินรากร	รองประธานกรรมการ
8. รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท สุมิตร สุวรรณ	กรรมการ

9. รองศาสตราจารย์ศศิเทพ ปิติพรเทพิน	กรรมการ
10. รองศาสตราจารย์จิตตินันท์ บุญสถิรกุล	กรรมการ
11. รองศาสตราจารย์ชาตรี ฝ่ายคำตา	กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิกร สุมาลี	กรรมการ
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญเลิศ อุทยานิก	กรรมการ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัตสาตรี ดิถียนต์	กรรมการ
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี ลัภนโชคดี	กรรมการ
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์	กรรมการ
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อังคณา ขันตรีจิตรานนท์	กรรมการ
18. นางสาวสถิดาพร คำสด	กรรมการ
19. นางสาวฐาปณีย์ แสงสว่าง	กรรมการ
20. นางสาวธนนันท์ ธนารัชตะภูมิ	กรรมการ
21. นายชูศักดิ์ เอื้องโชคชัย	กรรมการ
22. นางสาวสุวรรณา ปรมาพจน์	กรรมการและเลขานุการ
23. นายณรงค์ศักดิ์ หวังรัตนปราณี	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
24. นายธีระภัณฑ์ ศิริสุวรรณ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

12.3 สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

1. คณบดีคณะมนุษยศาสตร์	ที่ปรึกษา
2. คณบดีคณะสังคมศาสตร์	ที่ปรึกษา
3. นางวัณณนา สุนทรนฤรังษี	ประธานกรรมการ
4. รองศาสตราจารย์โกวิทย์ พิมพวง	รองประธานกรรมการ
5. รองศาสตราจารย์วิไลศักดิ์ กิ่งคำ	กรรมการ
6. รองศาสตราจารย์กังสดาล เชาว์วัฒนกุล	กรรมการ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บารมี อริยะเลิศเมตตา	กรรมการ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทพทวี โชควศิน	กรรมการ
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญเลิศ วิวรรณ์	กรรมการ
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มริสสา พงษ์ศิริกุล	กรรมการ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปนันดา เลอเลิศยุติธรรม	กรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตตินาถ เรขาลิลิต	กรรมการ
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุชนารถ รัตนสุวงศ์ชัย	กรรมการ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูริวัจน์ เดชอุ่ม	กรรมการ

15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมขวัญ สิงห์วี กรรมการ
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวีร์ บุนนาค กรรมการ
17. นางสาววิริยา หล้าเพชร กรรมการ
18. นายขจร ฝ้ายเทศ กรรมการ
19. นางวรรณา ศิลามาตร์ กรรมการ
20. นางสาวฐิติรัตน์ สุพลธวณิชย์ กรรมการ
21. นางสาวตรีสุคนธ์ ศิริทรัพย์ กรรมการ
22. นายสัตยา สวัสดิผล กรรมการ
23. นางสาวจริยา สุพรรณ กรรมการ
24. นางสาวศรีวรรณ บุญประเสริฐ กรรมการ
25. นางสาวผาณิตา ชัยดิเรก กรรมการ
26. นายพรนริน พูลภิรมย์ กรรมการ
27. นางรัชดาภรณ์ เหง้าพรหมมินทร์ กรรมการ
28. นางสาวนภาภรณ์ หาญวิรุฬห์ กรรมการ
29. นางสุพิญญา กาวไธสง กรรมการ
30. นายเกษม ทับทิมศรี กรรมการ
31. นายวิริยะ คงสมบูรณ์ กรรมการ
32. นายศักดา นาคำ กรรมการ
33. นางสาวสมัย สุวรรณทอง กรรมการ
34. นางสาวอภิชา ชุติพงศ์พิสิฏฐ์ กรรมการ
35. นางสาวธีรพร ชื่นพี กรรมการ
36. นางสาวพรพรรณ เหมะพันธุ์ กรรมการ
37. นางสาวพรรณรัตน์ ดิษฐ์เจริญ กรรมการ
38. นายภาณุพงศ์ ปิยาพันธ์ กรรมการ
39. นางสาวนันทิยา อาภานันท์ กรรมการ
40. นางสาวกมลนิตย์ ลิมปรังษี กรรมการ
41. นางสาวนภัสสร รักวรนิต กรรมการ
42. นายสรศักดิ์ มงคลสมบูรณ์ กรรมการ
43. นางสาวนิภาพร อินคะเณย์ กรรมการ
44. นางสาวพิทชญา สารภิรมย์ กรรมการ
45. นายติโรธ ทองนวล กรรมการและเลขานุการ
46. นางสาวสายทิพย์ เหล่าทองมีสกุล กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ดร.กรอร วงษ์กำแหง	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
2. รศ.ดร.จุฑาภรณ์ สินสมบูรณ์ทอง	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
3. ผศ.ดร.เจษฎา โพธิรัตน์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
4. ดร.ชนิตา บุญมาก	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
5. ผศ.ดร.ชัยยะ เหลืองวิริยะ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
6. ดร.ณัฐวัชร เชื้อนพรัตน์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
7. ผศ.ดร.เดือนรัตน์ ชลอุดมกุล	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
8. ผศ.ดร.ธีรศักดิ์ เอโกบล	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
9. ดร.ธีระชาติ ลี้ประเสริฐ	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
10. ผศ.ดร.ปกรณ์ วรรธณอมร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
11. อาจารย์พงศกร จิวาภรณ์คุปต์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
12. ผศ.ดร. พงศ์พล เรือนคง	ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
13. ดร.พัชราภรณ์ ศิวายพราหมณ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
14. ผศ.ดร.พิชามญชุ์ เกียรติวุฒินนท์	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
15. รศ.ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
16. ผศ.ดร. ไพบูลย์ เงินมีศรี	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
17. ดร.ภานุ ตรัยเวช	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
18. ผศ.ดร.ภุชงค์ กิจอำนาจสุข	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
19. ผศ.ดร.วรรณา มาลาพันธุ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
20. ผศ.ดร.วันชัย ปลื้มภาณุภัทร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
21. ผศ.ดร.วิชชา อิ่มอร่าม	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
22. ดร.วิศิษฎ์ หิรัณย์ภิญโญภาศ	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
23. ผศ.ดร.วีกิตติ์ ศิริศักดิ์สุนทร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
24. ดร.สุดารัตน์ นิจสุนกิจ	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
25. ผศ.ดร.สุธารัตน์ โชติกประคัลภ์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
26. ดร.สุนิสา อัคคะรัสมิโย	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
27. รศ.ดร.สุปิยนิตย์ ไม้แพ	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
28. รศ.ดร.อัญชณี คูเบอร่า	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
29. รศ.ดร.อิงอร กิมกง	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
30. รศ.ดร.อุษณีย์ ลีรวัฒน์	ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

Editorial Board

Subject: Science (Internal)

1. Dr.Koraon Wongkamhaeng	2. Assoc.Prof.Dr.Juthaphorn Sinsomboonthong
3. Asst.Prof.Dr.Chetsada Pothiratana	4. Dr.Chanita Boonmak
5. Asst.Prof.Dr.Chaiya Luengviriya	6. Dr.Nutthawat Chuanopparat

7. Asst.Prof.Dr.Duenrut Chonudomkul
8. Asst.Prof.Dr.Teerasak E-kobon
9. Dr.Theerachart Leepasert
10. Asst.Prof.Dr.Pakorn Wattana-Amorn
11. Mr.Pongsakorn Jiwapornkupt
12. Asst.Prof.Dr.Pongpol Ruankong
13. Dr.Patcharaporn Siwayaprahm
14. Asst.Prof.Dr.Pichamon Kiatwuthinon
15. Assoc.Prof.Dr.Pitak Chuawong
16. Asst.Prof.Dr.Paiboon Ngernmeesri
17. Dr.Panu Trivej
18. Asst.Prof.Dr.Puchong Kijamnajsuk
19. Asst.Prof.Dr.Wanna Malaphan
20. Asst.Prof.Dr.Wanchai Pluempanupat
21. Asst.Prof.Dr.Witcha Imaram
22. Dr.Wisit Hirunpinyopas
23. Asst.Prof.Dr.Weekit Sirisaksoontorn
24. Dr.Sudarat Nidsunkid
25. Asst.Prof.Dr.Sutharat Chotikaprakhan
26. Dr.Sunisa Akkarasamiyo
27. Assoc.Prof.Dr.Supiyanit Maiphae
28. Assoc.Prof.Dr.Anchanee Cubera
29. Assoc.Prof.Dr.Ingorn Kimkong
30. Assoc.Prof.Dr.Utsanee Leerawat

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.สุธาริน สถาปิตานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
2. รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
3. รศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
4. ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
5. ผศ.ดร.ฆนิศา รุ่งแจ้ง	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
6. รศ.ดร.สันติ ชินานุวัติวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
7. ศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
8. รศ.ดร.ดีบุญ เมธากุลชาติ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
9. รศ.รอ.พิพัฒน์ สอนวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
10. ผศ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
11. รศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
12. ผศ.ดร.บารเมศ วรรรธนภูติ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
13. รศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
14. รศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
15. รศ.ดร.ชวเลข วณิชเวทิน	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
16. ผศ.พท.ดร.สรวิศ สุภเวชย์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
17. รศ.ดร.ศุภกิจ นนทนานันท์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
18. ผศ.ธนัช สุขวิมลเสรี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
19. ศ.ดร.อมร พิมานมาศ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
20. รศ.ดร.เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
21. รศ.ดร.ทรงพล จารุวิศิษฏ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
22. รศ.ดร.ก่อโชค จันทวรางกูร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
23. ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

24. รศ.ดร.ปิยะ โชติกไกร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
25. รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
26. รศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
27. ผศ.ดร.วิลาสินี อยู่ชัชชาล ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
28. รศ.ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
29. รศ.ดร.เฉลิมราช วันทวิน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
30. รศ.ดร.เชาวลิต มิตรสันติสุข ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
31. ผศ.ดร.วินัย พฤกษะวัน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
32. ผศ.ดร.กาญจนพันธ์ สุขวิชชัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
33. รศ.ดร.ไพศาล คงคาฉุยฉาย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
34. รศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
35. รศ.ดร.นันทิยา หาญศุภลักษณ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
36. รศ.ดร.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
37. ผศ.ดร.อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. รศ.ดร.วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
39. รศ.ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
40. อ.ดร.สุดารัตน์ วงศ์วีระเกียรติ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
41. อ.สุวิวัฒน์ สืบสานกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
42. อ.เริงทิวา ทิพยศักดิ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
43. ผศ.ดร.พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
44. รศ.ดร.อดิชัย พรพรหมินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
45. รศ.สุรชัย ลิปิวัฒนาการ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
46. อ.ดร.เปรม รังสิวณิชพงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
47. ศ.ดร.นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. รศ.ดร.ชีวลัค พงษ์บูรณกิจ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2. รศ.ดร.ณพล อยู่บรรพต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
3. ผศ.ดร.นิภาวรรณ กุลสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
4. ดร.อภิวรรธน์ โชติสังกาศ สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง
5. รศ.ดร.ศุวศา กานตวนิชกูร ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. ดร.เพ็ญศิริ ประชากิตติกุล สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี

7. รศ.ดร.นุตา ศุภคต	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8. ผศ.ดร.วนารัตน์ กรอิสรานุกูล	สาขาเทคโนโลยีเพื่อการยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
9. ผศ.ดร.ธาริณี รามสูต	สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
10. รศ.ดร.ยิ่งสวัสดิ์ ไชยกุล	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
11. ผศ.ดร.ศุภชัย วรพจน์พิศุทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
12. ผศ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13. ดร.ชัยพร ศิลาวัชนาไนย	ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
14. รศ.ดร.ชาคริต สุวรรณจำรัส	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
15. รศ.ดร.เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย	ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
16. รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์	ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
17. รศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
18. ศ.ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Editorial Board

Subject: Engineering and Architecture (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Sutharin Sthapitanonda	2. Assoc.Prof.Dr.Prasert Suwanvitaya
3. Assoc.Prof.Dr. Suphawut Malaikrisanachalee	4. Asst.Prof.Dr.Saroch Boonsiripant
5. Asst.Prof.Dr.Kanisa Rungjang	6. Assoc.Prof.Dr.Santi Chinanuwatwong
7. Prof.Dr.Wanchai Yodsudjai	8. Assoc.Prof.Dr.Deeboon Methakullachat
9. Assoc.Prof.Piphat Sornwong	10. Asst.Prof.Dr.Susit Chaiprakaikeow
11. Assoc.Prof.Dr.Thaweesak Pitikhunpongsuk	12. Asst.Prof.Dr.Barames Vardhanabhuti
13. Assoc.Prof.Dr.Kitjapat Phuvoravan	14. Assoc.Prof.Dr.Weerakaset Suanpaga
15. Assoc.Prof.Dr.chavalek vanichavetin	16. Asst.Prof.Dr.Soravis Supavetch
17. Assoc.Prof.Dr.Supakij Nontananandh	18. Asst.Prof.Thanutch Sukwimolseree
19. Prof.Dr.Amorn Pimanmas	20. Assoc.Prof.Dr.Ackchai Sirikijpanichkul
21. Assoc.Prof.Dr.Songpol Charuvisit	22. Assoc.Prof.Dr.Korchoke Chantawarangul

23. Asst.Prof.Dr.Piyanut Wethyavivorn
24. Assoc.Prof.Dr.Piya Chotickai
25. Assoc.Prof.Dr.Suttisak Soralump
26. Assoc.Prof.Dr.Ratcha Chaichana
27. Asst.Prof.Dr.Wilasinee Yoochatchaval
28. Assoc.Prof.Dr.Pongsak Noophan
29. Assoc.Prof.Dr.Chalermraj Wantawin
30. Assoc.Prof.Dr.Chowarit Mitsantisuk
31. Asst.Prof.Dr.Winai Plueksawan
32. Asst.Prof.Dr.Kanjanapan Sukvichai
33. Assoc.Prof.Dr.Paisan Kongkachuichay
34. Assoc.Prof.Dr.Manop Charoenchaitrakool
35. Assoc.Prof.Dr.Nanthiya Hansupalak
36. Assoc.Prof.Dr.Apirat Laobuthee
37. Asst.Prof.Dr.Amornrat Lertworasirikul
38. Assoc.Prof.Dr.Weerachai Chaiworapuek
39. Assoc.Prof.Dr.Chansiri Singhtaun
40. Dr.Sudaratana Wongweragiat
41. Suwiwat Suebsankul
42. Rerngtiwa Tippayasak
43. Asst.Prof.Dr.Punpim Puttaraksa Mapiam
44. Assoc.Prof.Dr.Adichai Pornprommin
45. Assoc.Prof.Surachai Lipiwattanakarn
46. Dr.Prem Rangsiwanichpong
47. Prof.Dr.Nuchanart Sriwongsitanon

Subject: Engineering and Architecture (External)

1. Assoc.Prof.Dr.Chivaluck Pongburanakit
2. Assoc.Prof.Dr.Naphol Yoobanpot
3. Asst.Prof.Dr.Nipawan Kunsuwan
4. Dr.Apivat Jotisankasa
5. Assoc.Prof.Dr.Suwasa Kantawanichkul
6. Dr.Pensiri Prachakittikul
7. Assoc.Prof.Dr.Nuta Supakata
8. Asst.Prof.Dr.Wanarat Konisanukul
9. Asst.Prof.Dr.Tarinee Ramasoot
10. Assoc.Prof.Dr.Yingsawad Chaiyakul
11. Asst.Prof.Dr.Supachai Vorapojpisut
12. Asst.Prof.Dr.Channarong Banmongkol
13. Dr.Chaiyaporn Silawatchananai
14. Assoc.Prof.Dr.Chakrit Suvanjumrat
15. Assoc.Prof.Dr.Ekasit Kositsakulchai
16. Assoc.Prof.Dr.Varawoot Vudthivanich
17. Assoc.Prof.Dr.Sanit Wongsa
18. Prof.Dr.Chavalit Chaleeraktrakoon

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ผศ.ดร.กนิฐพร วังใน	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
2. รศ.ดร.กมลวรรณ แจ้งชัด	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
3. ผศ.ดร.กฤษกมล ณ จอม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
4. ผศ.ดร.ขนิษฐา วัชราภรณ์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
5. ดร.คุณาลัย พลอยดนัย	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
6. รศ.ดร.ฆรณี ตุ้ยเต็มวงศ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
7. รศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
8. ผศ.ดร.จุมพล วรสายัณห์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

9. น.ส.ช่อลัดดา เที่ยงพุก	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
10. ผศ.ดร.ชุติมา ไวศรายุทธ์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
11. อ.ณัฐดนย์ รุ่งเรืองกิจไกร	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
12. ดร.ณัฐทินี บำบัดสรรพโรค	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
13. ผศ.ดร.ทานตะวัน พิรักษ์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
14. ผศ.ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
15. รศ.ดร.ธนโชติ บุญวรโชติ	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
16. ผศ.ดร.ธนิต พุทธพงษ์ศิริพร	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
17. ผศ.ดร.นพรัตน์ ปราบสงบ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
18. น.ส.นราพร พรหมไกรวร	ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
19. รศ.ดร.นันทวัน เทอดไทย	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
20. รศ.ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
21. ดร.บัณฑิตา วานิกร	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
22. ดร.บุญทิวา นิลจันทร์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
23. ดร.ปฐมา จาตกานนท์	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร
24. ผศ.ดร.ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
25. รศ.ดร.ปรารถนา ปรารถนาดี	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
26. ผศ.ดร.ปัทธิมา อุดมไพจิตรกุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
27. รศ.ดร.ปาริฉัตร หงสประภาส	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
28. รศ.ดร.ปิติพร ฤทธิเรืองเดช	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
29. ผศ.ดร.ปิติยา กมลพัฒนะ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
30. รศ.ดร.พรธิภา องค์คุณารักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
31. ดร.พรรณภัทร พรหมเพ็ญ	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
32. ดร.พิศมัย ศรีชาเยช	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
33. รศ.ดร.ภคมน จิตประเสริฐ	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
34. ผศ.ดร.มัสลิน นาคไพจิตร	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
35. ผศ.ดร.มาศอุบล ทองงาม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
36. รศ.ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิรณ	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
37. ผศ.ดร.รวิพิมพ์ ฉวีสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

38. รศ.ดร.รังรอง ยกส้าน	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
39. รศ.ดร.รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
40. รศ.ดร.วรรณี จิรภาคย์กุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
41. ผศ.ดร.วศะพร เพรททิเซย์ จันทร์พุฒ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
42. อ.วัชรพงศ์ เลิศสุรวัฒน์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
43. ดร.วิชชา ตรีสุวรรณ	ฝ่ายโภชนาการและสุขภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
44. ดร.วิภา สุโรจนะเมธากุล	ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
45. ดร.วิลาวัลย์ สินธุประภา	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
46. ผศ.ดร.วิษฐิดา จันทราพรชัย	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
47. รศ.ดร.วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
48. ผศ.ดร.ศศิธร ตรงจิตภักดี	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
49. ดร.ศันสนีย์ อุดมระติ	ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
50. ดร.ศิวาพร โอเจริญ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
51. ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
52. รศ.ดร.สาโรจน์ ศิริศันสนียกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
53. รศ.ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
54. ผศ.ดร.สุดาทิพย์ แซ่ตั้น	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
55. รศ.ดร.สุนทรี สุวรรณสิชณน์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
56. ผศ.ดร.สุมัลลิกา โมรากุล	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
57. รศ.ดร.เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
58. รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมคีรี	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
59. ผศ.ดร.อภิชญา ลีลาวณิชกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
60. ผศ.ดร.อัจฉรา เกษสุวรรณ	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
61. รศ.ดร.อำพร เสน่ห์	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
62. รศ.ดร.อุทัย กลิ่นเกษร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
63. ผศ.ดร.อุลัยวรรณ์ วิทยเกียรติ	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
64. ผศ.ดร.อุศมา สุนทรนฤรังษี	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ดร.กรกช ฮามสุโพธิ์	สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2. ผศ.ดร.กิติพงศ์ อัศตรกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. รศ.ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. รศ.ดร.จิรชัย พุทธกุลสมศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบการผลิต สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
6. ผศ.ดร.จิรวรรณ อภิรักษากร	สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
7. รศ.ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8. รศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
9. รศ.ดร.ชวลิต จีนอนันต์	ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการ สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
10. รศ.ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11. ผศ.ดร.ดนุพล หุ่นโสภณ	ภาควิชาการตลาด คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12. ผศ.ดร.ทัศนีย์ สติมานนท์	คณะพัฒนาการเศรษฐกิจ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
13. ผศ.ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
14. รศ.ดร.ประภาศรี เทพรักษา	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
15. รศ.ดร.ประเวทย์ ตุ้ยเต็มวงศ์	ศูนย์ความปลอดภัยอาหาร สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
16. ดร.ปาริชาติ เทียนจุมพล	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
17. ผศ.ดร.พนิตา งามเชื้อชิต	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

18. รศ.ดร.พรชัย ราชตนะพันธุ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
19. รศ.ดร.พิชญอร ไหมสุทธิสกุล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
20. ผศ.ดร.รัชนี เจริญ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี
21. ผศ.ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
22. ผศ.ดร.รุจริน ลิ้มศุภวานิช ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
23. รศ.ดร.วรวรรณ พันพิพัฒน์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
24. รศ.ดร.วราคณา สมพงษ์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
25. ผศ.ดร.วิชัย ลีลาวัชรมาศ ศูนย์วิจัยการหมักเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
26. ดร.วิไลลักษณ์ ชัยสิทธิ์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
27. รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
28. ผศ.ดร.ศิรินันท์ แก่นทอง ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
29. ผศ.ดร.ศิวัฒ ไทยอุดม สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
30. ผศ.ดร.สุธีรา วัฒนกุล สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
31. รศ.ดร.สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (อาจารย์เกษียณ)
32. รศ.ดร.อรไท สุขเจริญ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

Editorial Board

Subject: Agro-Industry (Internal)

1. Asst.Prof.Dr.Kanithaporn Vangnai
2. Assoc.Prof.Dr.Kamolwan Jangchud

3. Asst.Prof.Dr.Kriskamol Na Jom
4. Asst.Prof.Dr.Kanitta Watcharaporn
5. Dr.Kunalai Ploydanai
6. Assoc.Prof.Dr.Kooranee Tuitemwong
7. Assoc.Prof.Dr.Jantip Setthayanond
8. Asst.Prof.Dr.Jumpol Vorasayan
9. Miss Chowladda Teangpook
10. Asst.Prof.Dr.Chutima Waisarayutt
11. Mr.Nattadon Rungruangkitkrai
12. Dr.Nattinee Bumbudsanpharoke
13. Asst.Prof.Dr.Tantawan Pirak
14. Asst.Prof.Dr.Thepkunya Harnsilawat
15. Assoc.Prof.Dr.Tanachote Boonvorachote
16. Asst.Prof.Dr.Thanit Puthpongsiriporn
17. Asst.Prof.Dr.Nopparat Prabsangob
18. Miss Naraporn Phomkaivon
19. Assoc.Prof.Dr.Nantawan Therdthai
20. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong
21. Dr.Bandhita Wanikorn
22. Dr.Boontiwa NInchan
23. Dr.Pathama Chatakanonda
24. Asst.Prof.Dr.Pramuk Parakulsuksatid
25. Assoc.Prof.Dr.Parthana Parthanadee
26. Asst.Prof.Dr.Pathima Udompijitkul
27. Assoc.Prof.Dr.Parichat Hongsprabhas
28. Assoc.Prof.Dr.Pitiporn Ritthiruangdej
29. Asst.Prof.Dr.Pitiya Kamonpatana
30. Assoc.Prof.Dr.Pornthipa Ongkunaruk
31. Dr.Phannaphat Phromphen
32. Dr.Phisamai Srichayet
33. Assoc.Prof.Dr.Pakamon Chitprasert
34. Asst.Prof.Dr.Massalin Nakphaichit
35. Asst.Prof.Dr.Masubon Thongngam
36. Assoc.Prof.Dr.Ronnarit Rittiron
37. Asst.Prof.Dr.Ravipim Chaveesuk
38. Assoc.Prof.Dr.Rangrong Yoksan
39. Assoc.Prof.Dr.Rungnaphar Pongsawatmanit
40. Assoc.Prof.Dr.Wannee Jirapakkul
41. Asst.Prof.Dr.Wasaporn Preteseille Chanput
42. Mr.Watcharaphong Leartsurawat
43. Dr.Witcha Treesuwan
44. Dr.Vipa Surojanametakul
45. Dr.Wilawan Sintuprapa
46. Asst.Prof.Dr.Withida Chantrapornchai
47. Assoc.Prof.Dr.Weerachet Jittanit
48. Asst.Prof.Dr.Sasitorn Tongchitpakdee
49. Dr.Sunsanee Udomrati
50. Dr.Siwaporn O'Charoen
51. Dr.Sumaporn Kasemsumran
52. Assoc.Prof.Dr.Sarote Sirisansaneeyakul
53. Assoc.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
54. Asst.Prof.Dr.Sudathip Sae-tan
55. Assoc.Prof.Dr.Suntaree Suwonsichon
56. Asst.Prof.Dr.Sumallika Morakul
57. Assoc.Prof.Dr.Saowanee Lertworasirikul
58. Assoc.Prof.Dr.Hathairat Rimkeeree
59. Asst.Prof.Dr.Apichaya Lilavanichakul
60. Asst.Prof.Dr.Ajchara Kessuvan
61. Assoc.Prof.Dr.Amporn Sane
62. Assoc.Prof.Dr.Utai Klinkesorn
63. Asst.Prof.Dr.Ulaiwan Withayagiat
64. Asst.Prof.Dr.Aussama Soontrunnarudrungsri

Subject: Agro-Industry (External)

1. Dr.Korakoch Hamsupo
2. Asst.Prof.Dr.Kitipong Assatarakul
3. Asst.Prof.Dr.Kiattisak Duangmal
4. Assoc.Prof.Dr.Kanitha Tananuwong
5. Assoc.Prof.Dr.Jirachai Buddhakulsomsiri
6. Asst.Prof.Dr.Jirawan Apiraksakorn
7. Assoc.Prof.Dr.Jirarat Anuntagool
8. Assoc.Prof.Dr.Charoenchai Khompatraporn
9. Assoc.Prof.Dr.Chawalit Jeenanunta
10. Assoc.Prof.Dr.Chaleeda Borompichaichartkul

11. Asst.Prof.Dr.Dnupol Hoonsopon
12. Asst.Prof.Dr.Thasanee Satimanon
13. Asst.Prof.Dr.Bootsrapa Leelawat
14. Assoc.Prof.Dr.Prapasri Theprugsa
15. Assoc.Prof.Dr.Pravate Tuitemwong
16. Dr.Parichat Theanjumpol
17. Asst.Prof.Dr.Panita Ngamchuachit
18. Assoc.Prof.Dr.Pornchai Rachtanapun
19. Assoc.Prof.Dr.Pitchaon Maisuthisakul
20. Asst.Prof.Dr.Ratchanee Charoen
21. Asst.Prof.Dr.Rattanaphol Mongkholrattanasit
22. Asst.Prof.Dr.Rutcharin Limsupavanich
23. Assoc.Prof.Dr.Worawan Panpipat
24. Assoc.Prof.Dr.Warangkana Sompongse
25. Asst.Prof.Dr.Vichai Leelavatcharamas
26. Dr.Wilailuk Chaiyasit
27. Assoc.Prof.Dr.Saksit Chanthai
28. Asst.Prof.Dr.Sirinun Keanthong
29. Asst.Prof.Dr.Siwatt Thaiudom
30. Asst.Prof.Dr.Suteera Vatthanakul
31. Assoc.Prof.Dr.Sunee Nitisinprasert
32. Assoc.Prof.Dr.Oratai Sukcharoen

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.ชนัตถ์ โชคเจริญรัตน์ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
2. รศ.ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
3. รศ.ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
4. รศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
5. รศ.ดร.สราวุธ สังข์แก้ว ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
6. ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
7. ผศ.ดร.ณัฏฐา เสนีวาส ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
8. ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
9. ผศ.ดร.ปิยพงษ์ ทองดีนอก ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
10. ผศ.ดร.ภาสิณี วรชนะนันท์ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
11. ผศ.ดร.รุ่งเรือง พูลศิริ ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
12. ผศ.ดร.สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
13. ดร.ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์
14. ดร.ชาลิสา วีสมหมาย ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
15. ดร.ธนิศร์ ปัทมพิฑูร ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
16. ดร.นฤชิต ดำปิน ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
17. ดร.ปิยาภรณ์ สมสมัคร ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
18. ดร.ภาคภูมิ ชูมณี ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
19. ดร.ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์
20. ดร.วัชรพงษ์ วาระรัมย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
21. ดร.วีรศิลป์ สอนจรูญ วิทยาลัยบูรณาการศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
22. ดร.สุธี จรรยาสุทธิวงศ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. รศ.ดร.แหลมไทย อาษานอก	สาขาเกษตรป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ แพร่ – เฉลิมพระเกียรติ
2. รศ.ดร.รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์	คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
3. ผศ.ดร.อัจฉริยะ โชติขันธ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ม.สงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
4. ดร.สุจิต พงษ์นุ่มกุล	บริษัท อินคิวเบทจำกัด
5. ดร.บารมี สกลรักษ์	กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
6. ดร.ปริชาติ เวชยนต์	ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
7. ดร.วินันท์ดา หิมะมาน	กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
8. ดร.ศุภกิจ วินิตพรสวรรค์	กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
9. ดร.สุธีระ เหิมฮึก	คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
10. ดร.อิสรีย์ ฮาวปินใจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ แพร่ – เฉลิมพระเกียรติ

Editorial Board

Subject: Natural Resources and Environment (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Chanat Chokejaroenrat	2. Assoc.Prof.Dr.Tunlawit Satapanajaru
3. Assoc.Prof.Dr.PatthraPeng thamkeerati	4. Assoc.Prof.Dr.Ratcha Chaichana
5. Assoc.Prof.Dr.Sarawood Sungkaew	6. Asst.Prof.Dr.Jukkrit Mahujchariyawong
7. Asst.Prof.Dr.Nuttha Sanevas	8. Asst.Prof.Dr.Prapaipid Chairattanamanokorn
9. Asst.Prof.Dr.Piyapong Tongdeenok	10. Asst.Prof.Dr.Pasinee Worachananant
11. Asst.Prof.Dr.Roongreang Poolsiri	12. Asst.Prof.Dr.Sapit Diloksumpun
13. Dr.Chakrit Na Takuathung	14. Dr.Chalisa Veesommai
15. Dr.Thanit Pattamapitoon	16. Dr.Narouchit Dampin
17. Dr.Piyapawn Somsamak	18. Dr.Parkpoom Choomanee
19. Dr.Laddawan Rianthakool	20. Dr.Watcharapong Wararam
21. Dr.Weerasin Sonjaroon	22. Dr.Suthee Janyasuthiwong

Subject: Natural Resources and Environment (External)

1. Assoc.Prof.Dr.Lamthai Asanog	2. Assoc.Prof.Dr.Rattanawat Chaiyarat
3. Asst.Prof.Dr.Aujchariya Chotikhun	4. Dr.Suchit Pongnumkul
5. Dr.Baramee Sakolrak	6. Dr.Parichat Wetchayont
7. Dr.Winanda Himaman	8. Dr.Supagit Vinitpornsawan
9. Dr.Sutheera Hermhuk	10. Dr.Itsaree Howpinjai

กรรมการฝ่ายจัดทำเอกสารทางวิชาการ

1. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราภา มหากาญจนกุล)	ที่ปรึกษา
2. รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหาร สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (รองศาสตราจารย์ ดร. เอกไท วิโรจน์สกุลชัย)	ที่ปรึกษา
3. รองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (อาจารย์ ดร. วราพรรณ อภิศุภะโชค)	ประธานกรรมการ
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตตินาถ เรขาลิลิต	กรรมการ
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นัทธ์ชนัน นาถประทาน	กรรมการ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ธร ศศิธรากรแก้ว	กรรมการ
7. อาจารย์ ดร. ดลฤทัย เจียรกุล	กรรมการ
8. อาจารย์ ดร. ศิริพร เลิศไพศาลวงศ์	กรรมการ
9. อาจารย์ศุภพงศ์ ตันเงิน	กรรมการ
10. ว่าที่ร้อยตรี ปิยะภัทร คงแสนคำ	กรรมการ
11. นางสาวทิสยา ทิศเสถียร	กรรมการ
12. นางสาววนิดา รัตตมณี	กรรมการ
13. นายวิทวัส ยุทธโกศา	กรรมการ
14. นายวิโรตม์ เอื้ยะตะกูล	กรรมการ
15. นางสาวศุภิสรา เกียรติสันติสุข	กรรมการ
16. นายนันทิศักดิ์ ประทีปสุข	กรรมการ
17. นางสาวรติกร สมิตไมตรี	กรรมการ
18. นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร	กรรมการและเลขานุการ
19. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
20. นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

“มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เป็นสถาบันที่มีปณิธานมุ่งมั่นในการสั่งสม เสาะแสวงหา
และพัฒนาความรู้ให้เกิดความเจริญงอกงามทางภูมิปัญญา
ที่เพียบพร้อมด้วยวิชาการ จริยธรรม และคุณธรรม
ตลอดจนเป็นผู้ชี้นำทิศทาง สืบทอดเจตนารมณ์ที่ดีของสังคม
เพื่อความคงอยู่ ความเจริญ
และความเป็นอารยะของชาติ”

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ร่วมกับ
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
กระทรวงศึกษาธิการ
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม
สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ฝ่ายเลขานุการคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 59
สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

kuannualconf@gmail.com
http://annualconference.ku.ac.th http://www.rdi.ku.ac.th